

ESTUDIO DEL FUTURO DE LA GESTIÓN DEL ATM ATENDIENDO A LAS RESTRICCIONES POR LAS EMISIONES DE LOS MOTORES DE AVIACIÓN

Memoria del Trabajo Final de
Máster Universitario en Gestión
Aeronáutica
realizado por
Tsonko Totev Totev
y dirigido/supervisado por
Pablo Torrejón Plaza
Sabadell, 1 de Julio de 2020

Resumen

El objetivo de este estudio es estimar tres posibles escenarios viables de cómo podrá ser el futuro a medio plazo, aproximadamente sobre el año 2035, de la gestión del tráfico aéreo atendiendo a las previsibles restricciones debidas a la contaminación de los motores.

Los escenarios que se estudian son; un escenario en el que se contempla la prohibición de sobrevolar ciertas zonas del espacio aéreo, el segundo escenario plantea imponer restricciones de diferente naturaleza que pueden llevar a reducir la cantidad de vuelos en la Unión Europea perfilándose como el más viable y por último un escenario normativo que consiste en la inclusión de los gases que no tienen base en carbono en el comercio de emisiones.

Summary

The objective of this study is to estimate three possible viable scenarios of what the future may be like in the medium term, approximately around the year 2035, of air traffic management, taking into account the foreseeable restrictions due to engine contamination.

The scenarios that are studied are; a scenario in which the prohibition to fly over certain areas of airspace is contemplated, the second scenario proposes imposing restrictions of a different nature that can lead to reducing the number of flights in the European Union, outlining itself as the most viable and finally a regulatory scenario consisting of the inclusion of non-carbon-based gases in emissions trading.

Resum

L'objectiu d'aquest estudi és estimar tres possibles escenaris viables de com pot ser el futur a mig termini, aproximadament sobre l'any 2035, de la gestió de l'trànsit aeri atenent a les previsibles restriccions degudes a la contaminació dels motors.

Els escenaris que s'estudien són; un escenari en el qual es contempla la prohibició de sobrevolar certes zones de l'espai aeri, el segon escenari planteja imposar restriccions de diferent naturalesa que poden portar a reduir la quantitat de vols a la Unió Europea perfilant com el més viable i finalment un escenari normatiu que consisteix en la inclusió dels gasos que no tenen base en carboni en el comerç d'emissions.

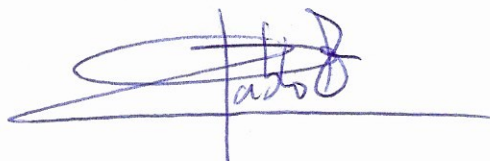
El/La abajo firmante, Pablo Torrejón Plaza

Profesor/a de los estudios de Máster Universitario en Gestión
Aeronáutica de la UAB,

CERTIFICA:

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

Y para que conste firma la presente.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Pablo Torrejón Plaza', with a horizontal line underneath.

Firmado: Pablo Torrejón Plaza

Sabadell, 1 de Julio de 2020

0. Índice general

Contenido

0. Índice general	3
0.1 Índice de figuras y tablas.	6
1. Abreviaturas	7
2. Introducción	9
3. Objetivo	11
4. Justificación	12
5. Metodología.....	14
6. Motores aeronáuticos y sus emisiones.	16
6.1 Estado actual, tecnología y emisiones, principales fabricantes y sus motores.	16
6.2 Emisiones	17
6.3 Problemáticas para no poder conseguir motores más eficientes.	26
7. Formas de reducir emisiones.....	28
7.1 Operativas o procedimentales.	28
7.1.1 Velocidad.....	29
7.1.2 Vuelos en formación	31
7.1.3 Ascenso y descenso continuos.....	31
Aterrizajes verdes.....	32
7.1.4 Reducción de rodaje en pistas.....	33
7.1.5 A-CDM.....	33
7.1.6 Procedimiento Punto Merge y Trombón.....	33
Maniobras de precisión P-RNAV	38
7.1.7 SIRMA, Webtrack y REDAIR	39
7.1.8 Cielo Único Europeo I & II+	40
7.1.9 SESAR	42
7.1.10 Free Route Airpace.....	43
7.1.11 Cross-Border Arrival Management (XMAN).	45
7.1.12 Otras iniciativas.....	45
7.2 Nuevas tecnologías.	46
7.2.1 Materiales.....	47
7.2.2 Reducción de peso.	47
7.2.3 Factor de ocupación.	47
8. Futuro del ATM.....	49

8.1 Estado actual y gestión ATM.....	49
8.2 Zonas que se van a restringir.....	50
Zonas por región del planeta.	50
Zonas restringidas por estar muy contaminadas.....	51
Zonas restringidas por el tipo de vuelos.....	52
Zonas restringidas a tipos de aeronaves y tipo de operación.....	53
8.3 Escenarios.....	53
8.3.1 Reducción o prohibición de sobrevuelos sobre ciertos espacios aéreos con el fin de no contaminarlos.	53
Presentación del escenario y de la idea.....	54
Situaciones actuales parecidas al escenario.....	57
¿Qué zonas serán las prohibidas?.....	57
Metodología, condiciones y calendario de implantación.....	58
Estudio de viabilidad y sostenibilidad (pros y contras).	60
Breve comentario final.	61
8.3.2 Condicionamiento del tráfico aéreo mediante la imposición de restricciones.	61
Presentación del escenario y de la idea.....	62
Situaciones actuales parecidas al escenario.....	63
¿Qué zonas serán las restringidas?.....	63
Metodología, condiciones y calendario de implantación.....	65
Estudio de viabilidad y sostenibilidad (pros y contras).	74
Breve comentario final.	76
8.3.3 Inclusión de gases como NOx y el H2O en el mercado de emisiones de CO2 y la imposición de nuevas tasas y normativas reguladoras.....	77
9. Resultados.	80
10. Conclusiones, propuestas y sugerencias.....	83
11. Bibliografía.....	85
12. Anexos.....	87

[Índice de anexos](#)

Anexo I. Tablas y gráficas sobre niveles de emisiones y densidad de tráfico.....	87
Anexo II. Formas de reducir emisiones.....	92
II.1 Combustibles y alternativas.....	92
II.2 Medidas normativas y económicas.....	96
Kioto.....	96
Acuerdo de París.....	96
Pacto Verde Europeo.....	97
Iniciativas de IATA y OACI.....	98
II.2.1 Sistemas de derechos de emisiones y CORSIA.....	98
CORSIA.....	99
II.2.2 Gravámenes medioambientales.....	100
Anexo III. Tabla de proyectos de aviones híbridos y eléctricos.....	101
Anexo IV. Aeropuertos alternativos.....	103
Anexo V. Legislación aplicable.....	104

0.1 Índice de figuras y tablas.

Tabla 1.1 Abreviaturas

Tabla 1.1 Abreviaturas
Figura 6.1 Emisiones de un avión a reacción típico de dos motores durante un vuelo de 1 hora con 150 pasajeros.
Figura 6.2 Emisiones de NO ₂ en Europa, European Space Agency, 2020. Imágenes obtenidas del programa Copernicus de los satélites Sentinel-4 y 5.
Figura 6.3 Media de emisiones de NO ₂ en Europa, 2018-2019.
Figura 6.4 Operaciones vs NO ₂ , Enero 2020.
Figura 6.5 Operaciones vs NO ₂ , Mayo 2020.
Figura 6.6 Operaciones vs CO ₂ , Mayo 2020.
Figura 6.7 NO ₂ mundial.
Figura 6.8 Concentraciones de CO globales concentradas en el Ecuador.
Figura 6.9 Rutas de aeronaves de los principales aeropuertos europeos.
Figura 6.10 Densidad de tráfico aéreo europeo.
Figura 6.11 Emisiones vs densidad de tráfico europeo.
Figura 7.1 Emisiones de CO ₂ según fases del vuelo.
Figura 7.2 Tiempo de consumo de combustible CCO/CDO en Europa.
Figura 7.3 Punto Merge.
Figura 7.4 Opciones de configuración del Punto Merge.
Figura 7.5 Dirección de los “legs” del Punto Merge y configuración en dos conos con punto en común.
Figura 7.6 Procedimiento Trombón.
Figura 7.7 Estructura en Trombón en el aeropuerto de El Prat.
Figura 7.8 Punto Merge con esperas.
Figura 7.9 Arquitectura actual y futura del espacio aéreo.
Figura 7.10 Rutas directas en el FRA de FRAMaK.
Figura 8.1 Zonas europeas con restricciones.
Tabla 9.1 Propuestas de restricciones escenario 2.
Tabla I.1 Emisiones por regiones.
Tabla I.2 Emisiones de CO ₂ por pasajero de los 10 países que más emisiones de CO ₂ de la aviación tienen.
Tabla I.3 Emisiones de CO ₂ por pasajero e intensidad de emisiones de carbono según el tipo de aeronave.
Tabla I.4 Cantidad e intensidad de emisiones de carbono según distancia recorrida.
Figura II.1 Cuota de las emisiones de gases de efecto invernadero por modo de transporte (2017).
Figura II.2 Contribución a la reducción de emisiones de diferentes medidas.
Tabla III.1 Proyectos de aviones híbridos y eléctricos, 2019.1
Tabla IV.1 Aeropuertos alternativos

¹ Fuente: ICAO <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/electric-aircraft.aspx>

1. Abreviaturas

Tabla 0.1 Abreviaturas

ACDM	Airport collaborative decision making
ACI	Airports Council Internacional
Aena	Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea
AIA	Aerospace Industries Association
AIP	Instrument Approach Procedure
AIRE	Atlantic Interoperability Initiative to Reduce Emissions
AMAN	Arrival Management extended to en route Airspace
ANSP	Air Navigation Service Providers
ASPIRE	Asia and Pacific Initiative to Reduce Emissions
ATC	Air Traffic controller
ATM	Air traffic management
Avgas	Aviation gasoline
BRAIN	Barcelona RNAV Approach Innovations
BWB	Blended wing body
CANSO	Civil Air Navigation Services Organisation
CCO/CDO	Continuous Climb Operations/Continuous Descent Operations
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CO2	Dióxido de carbono
CORSIA	Programa de compensación y de reducción de carbono de la aviación internacional
COVID-19	Coronavirus disease 2019
EEE	Espacio economico europeo
ESA	European Space Agency
EU ETS	Eu Emissions Trading System
EUIR	European Upper Information Region
EUROCONTROL	Organización Europea para la Seguridad de la Navegación Aérea
FAB	Functional Airspace Blocks
FABEC	Functional Airspace Block Europe Central
FIR	Flight Information Region
FL	Flight level
FMI	Fondo monetario internacional
FRA	Free Route Airspace
FRAMaK	Free Route Airspace Maastricht and Karlsruhe
FTK	Freight tonne kilometer
HFC	Hidrofluorocarburos
IAG	International Airlines Group
ICAO	International Civil Aviation Organization

ICCT	International Council of Clean Transport
KPI	Key performance indicator
MMT	Million metric tones
MUAC	Maastricht Upper Area Control Centre
NATS	National Air Traffic Services
OACI	Organización de aviación civil internacional
PBN	Performance Based Navigation
PFC	Perfluorocarburos
P-RNAV	Precision Area Navigation
RCDE UE	Régimen de comercio de derechos de emisión de la UE
REDAIR	Red de Vigilancia de Calidad del Aire
RPK	Revenue passenger per kilometer
SAF	Sustainable Aviation Fuels
SAFUG	Sustainable Aviation Fuel Users Group
SES	Single European Sky
SESAR	Single European Sky ATM Research
SMART	Específico, medible, alcanzable, realista y en tiempo
SPK	Synthetic paraffinic kerosene
STAR	Standard Terminal Arrival Route
TCAS	Traffic alert and Collision Avoidance System
TSA	Áreas temporalmente segregadas
UE	Unión europea
UIR	Upper Information Region
CV	Caballo de vapor
XMAN	Cross-Border Arrival Management

2. Introducción

Se podría decir que fueron los hermanos Wright en 1903 los que inventaron el primer avión propulsado con un motor contaminante. Debido a que hay combustión de combustible fósil, la emisión de gases considerados contaminantes se hace inevitable.

En aquel feliz e histórico momento la contaminación medioambiental no era una preocupación pero hoy en día es un tema muy preocupante. Se podría decir sin temor a equivocación que el futuro de la aviación está condicionado por la contaminación del medio ambiente.

Hoy en día la conservación del medio ambiente es muy importante y la opinión pública tiene un peso muy grande en todas las industrias, la aeronáutica no es una excepción. El término *Flygskam*, palabra sueca que se entiende por “vergüenza de volar” es un término actual utilizado para mostrar que volar contamina y hace un llamamiento intrínseco a no hacerlo. Para que la aviación no pierda clientes debe ser respetuosa con el medio ambiente, para ganarse a sus usuarios y así poder tener un prometedor futuro.

Con el paso de los años, la cantidad de aviones surcando el cielo ha crecido de forma significativa, lo que ha aumentado la contaminación al haber un mayor volumen de tráfico. Esta situación ha llevado a los organismos responsables a tomar medidas en todos los ámbitos, incluido el sector de la aviación.

Existen algunos proyectos e iniciativas internacionales como es por ejemplo el Pacto verde europeo o “European Commission Green Deal” es un plan europeo que pretende convertir al continente europeo en el primer continente medioambientalmente neutral o dicho de otro modo, sin emisiones para el año 2050. Para conseguir esto, se deberán hacer mejoras sustanciales en tecnología e innovación.

El Pacto Verde Europeo, el Protocolo de Kioto o el Acuerdo de París no ponen restricciones concretas para la aviación internacional. El primer acuerdo internacional para reducir las emisiones procedentes de la aviación es conseguido en 2016 en el seno de OACI. En este acuerdo se apunta a la falta de concreción de medidas sobre la aviación en el Acuerdo de París de 2016. OACI o ICAO (International Civil Aviation Organization) por sus siglas en inglés, crea el Programa de compensación y de reducción de carbono de la aviación internacional CORSIA (Carbon offsetting and reduction scheme for international aviation), por sus siglas en inglés. Otros organismos como la IATA tienen actualmente el objetivo de emisiones cero en la aviación en comparación con las emisiones de 2005.

Sin embargo y a pesar de estos programas, hay sin duda, una tendencia a clasificar la industria aeroespacial y la actividad aérea en general como una industria ligada a los combustibles fósiles y muy nociva para el medio ambiente. Esta es una postura totalmente equivocada. En este trabajo se expondrán datos contrastados que rebatan esta postura tergiversada y se proporcionará una visión de futuro realista, alejada de visiones apocalípticas imprecisas y con intereses económicos. La industria aeroespacial está y seguirá estando a la vanguardia de los avances en nuevas

tecnologías sobre la conservación del medio ambiente, algunas de ellas se verán en este trabajo. Desde hace 40 años, la industria de la aviación ha mejorado la eficiencia del gasto de combustible y ha reducido las emisiones totales en un 70%, comparado con el inicio de su actividad.

En el año 2018 se batió el record de 11 millones de vuelos en el espacio europeo, un aumento del 4% respecto al año 2017. Se estima que para el 2035 esos vuelos hayan ascendido a 15 millones². Para el año 2040 se espera que los aeropuertos no sean capaces de dar servicio a 1.5 millones de vuelos, lo que equivaldría a unos 160 millones de personas que no podrían volar.

Con estos datos vemos el claro aumento del tráfico aéreo pero hay que tener en cuenta que al hacerlo, también se aumenta la emisión de gases contaminantes. De hecho, según un estudio realizado por EUROCONTROL y publicado en enero de 2020. Se puede ver que, comparando los datos de los años 2017 y 2019, las emisiones de CO₂ a la atmosfera han sido mayores que el tráfico aéreo en esos años. El trafico aumento un 3,5% mientras que las emisiones un 7,5%.

Exceptuando la desafortunada situación anómala creada por la crisis sanitaria del virus COVID-19 en la que se ha reducido el tráfico aéreo, se espera que éste crezca en los años próximos y que sus emisiones también lo hagan.

Si no se consiguen avances tecnológicos para reducir las emisiones, la única manera de reducirlas será inevitablemente reduciendo el tráfico aéreo a la fuerza mediante la imposición de restricciones. Este es un extremo que a día de hoy parece impensable en la aviación, pero es muy probable que se dé. Esto ha ocurrido con el tráfico terrestre, especialmente de turismos en las grandes urbes.

Se esperan grandes cambios en los próximos años a los que es importante anticiparse. En este trabajo se podrán encontrar respuestas a la pregunta de cómo afectarán las emisiones al futuro de la gestión del tráfico aéreo.

² Datos obtenidos del "European ATM Master Plan" de la edición del 2020.

3. Objetivo

En las últimas décadas se ha visto un crecimiento muy significativo del transporte aéreo. Este hecho ha ido acompañado de una mejora sustancial en la eficiencia de los motores aeronáuticos. Esto se ha conseguido principalmente reduciendo el consumo de combustible. Es cierto que hay una meta económica detrás de estos avances pero de forma indirecta también se han logrado unos motores considerablemente menos contaminantes. Se estima que la contaminación generada por los aviones se ha reducido en un 70% en los últimos 40 años.

Aunque los datos son buenos, esto no debe ser motivo de conformismo sino del correcto camino a seguir. En los últimos años parece haber cierta tendencia por parte del ecologismo a poner el foco sobre el sector aéreo mostrando, con un análisis poco riguroso, el sector aéreo como muy contaminante a pesar de que supone en el peor de los casos sólo el 3% de las emisiones de CO₂.

El objetivo de este estudio es estimar tres posibles escenarios viables de cómo podrá ser el futuro a medio plazo, aproximadamente sobre el año 2035, de la gestión del tráfico aéreo atendiendo a las previsibles restricciones debidas a la contaminación de los motores por sus emisiones acústicas, gaseosas y de partícula sólida. Dentro del plazo 2035, se ordenarán los tres escenarios en corto, medio y largo plazo de implantación, en comparación entre ellos.

Los escenarios que se estudiarán serán; un escenario en el que se contempla la prohibición de sobrevolar ciertas zonas del espacio aéreo, el escenario de imponer restricciones de diferente naturaleza que pueden llevar a reducir la cantidad de vuelos en la Unión Europea y por último un escenario normativo mediante el comercio de emisiones.

Para conseguir este objetivo se estudiarán y evaluarán diferentes escenarios futuros que se podrían dar. Se ubicarán en el espacio marco europeo, se les asignarán fechas de implantación, según los datos actuales y la evolución real de los últimos años. No obstante, habrá que considerar el severo impacto sobre la aviación del COVID-19 y el receso que ha originado sobre los vuelos. Este objetivo es SMART porque supone dar esta información con datos concretos de tiempo y espacio en el que se espera que se pueda aplicar la reducción de emisiones, ya sea por nuevas tecnologías, nuevos procedimientos, etc. Sus resultados podrán ser medidos por comparación cuando la situación futura que se prevé en este escrito se haya materializado.

4. Justificación

El tema de la sostenibilidad medioambiental está a la orden del día desde hace algunos años, aunque esto no ha sido siempre así, de hecho, se podría decir que es un tema nuevo en el que la aviación a estado a la vanguardia desde el primer momento.

La toma de conciencia de la precaria situación medioambiental por parte los diferentes sectores industriales a todos los niveles, además de una creciente demanda por parte de la opinión pública de mejoras en la conservación de nuestro planeta, ha llevado a los gobiernos de gran parte del mundo desarrollado a tomar medidas.

Las medidas adoptadas por los gobiernos y por organismos internacionales se han ido aplicando de forma desigual en diferentes campos. En el sector de la automoción se han hecho reducciones significativas de emisiones de gases nocivos. Se han mejorado los motores reduciendo sus emisiones al mismo tiempo que ofrecen características técnicas muy competitivas. Se han realizado mejoras técnicas de todo tipo, reducciones de peso de los automóviles, se han desarrollado combustibles biodegradables, se ha mejorado la aerodinámica, se han buscado nuevos materiales y un largo etcétera. Se han creado impuestos por contaminación y se ha fomentado la retirada de la circulación de modelos antiguos. Pero esto no ha sido suficiente.

Para poder reducir aún más las emisiones de la automoción se han aplicado medidas restrictivas de tráfico terrestre. Esto ha sido algo novedoso en España pero ampliamente extendido en otros países.

Debido a que la reducción de emisiones con las mejoras anteriormente mencionadas no son lo suficientemente importantes, la alternativa que queda es reducir el número de desplazamientos, especialmente en urbes muy congestionadas y contaminadas. Esto ha sido una manera muy exitosa de reducir las emisiones porque hay alternativas de transporte público. Estas alternativas no existen en la aviación. A diferencia del tráfico terrestre en el que hay alternativas a los turismos en las grandes urbes con el transporte público, en el transporte aéreo no hay alternativa posible.

En el sector aeroespacial se han producido avances muy significativos en cuanto a la reducción de emisiones se refiere. Se ha reducido el consumo de combustible mejorado la aerodinámica, buscando nuevos materiales, etc. Pero la reducción más sustancial de emisiones ha sido gracias a los motores más eficientes y menos contaminantes.

Las exigencias por parte de organismos internacionales y algunos gobiernos con respecto a las emisiones de gases nocivos van siempre en aumento y no tienen intención de parar. Teniendo en cuenta esta situación, haciendo una analogía con el transporte terrestre anteriormente mencionado, parece claro intuir que estas reducciones de emisiones no serán suficientes en un futuro cercano y se exigirán reducciones del tráfico aéreo para conseguir reducir los gases contaminantes.

Esta situación que ahora parece impensable, podría ser una realidad en un corto periodo de tiempo. Hoy en día, tanto los aeropuertos más grandes como algunas zonas aéreas se encuentran o saturados o al borde de la saturación. La demanda es creciente y se hace todo lo posible por aumentar la capacidad para acoger el creciente tráfico aéreo. Una reducción obligada de este tráfico aéreo por razones de contaminación del aire parece imposible en algunos aeropuertos o zonas a día de hoy.

Vista esta situación más que probable, la justificación de la realización de este estudio parece clara. Supone una oportunidad para la investigación de esta situación que se dará de forma más que probable en el futuro más próximo. Permitirá además poder tomar medidas correctivas o preventivas con antelación gracias a las previsiones. La gestión del tráfico aéreo es muy delicada porque es susceptible a los cambios y la demanda es cada vez mayor. Es necesario poder predecir futuras situaciones del tráfico aéreo para poder anticiparse y actuar en consecuencia. Hay muchos aspectos a considerar para hacer una predicción del ATM. En este estudio se ha decidido enfocarlo hacia las emisiones contaminantes por el peso que tiene y se espera que tenga en el futuro la gestión medioambiental en la gestión de la aviación.

Otra motivación para la realización de este estudio ha sido la actual situación de grave crisis sanitaria a causa del virus COVID-19. Es de sobra conocido el impacto que ha tenido la crisis sanitaria en el sector aéreo, especialmente en las compañías aéreas. La gran mayoría están en una grave situación económica, muchas están al borde de la quiebra y necesitarán ayudas estatales para poder sobrevivir, otras, simplemente desaparecerán.

En este contexto de crisis sanitaria, el director de ACI Olivier Jancovec, en su carta del 15 de abril del 2020 al vicepresidente de IATA, Rafael Schvartzman, le pide apoyo a los aeropuertos y propone vincular bonificaciones de ayuda por el parón de la crisis del COVID-19 a las aerolíneas con flotas de aviones menos contaminantes. Remarca que la industria aeronáutica tendrá que hacer frente a la mitigación de los daños por la pandemia y deberá también hacer frente al desafío medioambiental.

Resulta fácil entender que si tecnológicamente no es posible reducir las emisiones, la única manera de hacerlo es reduciendo el tráfico. El objetivo de este trabajo es predecir cómo será esa nueva gestión del tráfico aéreo motivada por estas circunstancias.

Personalmente, encuentro el tema especialmente interesante por su actualidad y porque me interesa la gestión del tráfico aéreo. El aspecto medioambiental, un poco olvidado en la era industrial, ha llegado para quedarse.

Estoy a favor de los cambios que se están haciendo a favor del medio ambiente pero considero que la transición ecológica debe hacerse con lógica, no como se está planteando en algunos casos. Este trabajo presentará los hechos con datos contrastados y con previsiones lo más precisas y contrastadas posible, sin crear falsos alarmismos de carácter medioambiental ni previsiones políticamente correctas.

5. Metodología

El trabajo siguiente persigue hacer un estudio predictivo de la gestión del tráfico aéreo en la situación condicionada por las emisiones contaminantes. Para llegar al objetivo de describir esta nueva gestión del tráfico aéreo, se utilizará material documental actualizado, vigente y de rango oficial. La información se obtendrá de entidades mundialmente reconocidas como son Eurocontrol, ICAO, European Commission, ACI, IATA, EASA y la parte de referencias legales vigentes se tomarán tanto de la página web de la AESA, como sobre todo de la web del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (antes Fomento). En su recopilatorio de legislación y normativas vigentes para el sector de la aviación.

Para realizar las predicciones anteriormente mencionadas se contrastará su viabilidad con la legislación existente al respecto. En caso de no existir tal legislación, se hará una indicación de la situación y una predicción de hacia dónde podría ir la eventual futura legislación en base a la existente en otros ámbitos.

También se recopilará información de los fabricantes de motores de aviación, así como de la información que a este respecto pueden también tener los principales fabricantes de aeronaves.

La metodología seguida para conseguir alcanzar el objetivo principal consiste fundamentalmente en obtener una buena base de información sobre las tecnologías, métodos, operaciones, acciones futuras y presentes enfocadas a la reducción de emisiones.

Es necesario hacer este estudio de la situación actual de los motores de aviación aeronáutica y cómo, cuándo y de qué magnitud se espera conseguir avances en las reducciones de emisiones para poder hacer una predicción veraz de cómo afectaran las emisiones al tráfico aéreo.

La mencionada reducción de emisiones no solo se puede conseguir reduciendo las emisiones de los motores sino con muchos otros métodos. Los métodos se basan principalmente en la reducción del uso de combustible, cambiando el tipo de combustible y reducciones por mejoras operacionales. Entre estos métodos podemos encontrar; reducciones de peso, vuelos en formación, mejoras aerodinámicas, etc. Estos métodos son auxiliares y su aplicación se encuentra muy condicionada a diversos factores.

Se hará un acercamiento de los motores aeronáuticos, su funcionamiento, el estado actual, la tecnología, los principales fabricantes, las emisiones etc. Se verán las tendencias de producción de motores y las problemáticas que presentan para no poder reducir sus emisiones.

Serán expuestas las formas de reducir las emisiones anteriormente expuestas. Se verán cuatro formas o vías muy importantes. Las reducciones debidas a los combustibles. Donde se expondrán los combustibles usado actualmente, los que se están desarrollando y las nuevas formas de propulsión que se barajan. La siguiente forma de reducir emisiones que se verá será la normativa y económica. Aquí se

presentarán los principales acuerdos internacionales en materia medioambiental enfocados a la aviación. Se estudiarán los sistemas de derechos de emisiones para analizar más adelante si es un método con futuro y se verán los gravámenes medioambientales vigentes. La tercera forma de reducción de emisiones que se verá será la operativa o procedimental. Esta es quizás la más interesante desde el punto de vista de la gestión del tráfico aéreo. En ella se expondrá el estado del arte de la gestión del tráfico aéreo, las posibles reducciones de emisiones mediante cambios procedimentales así como los principales proyectos que trabajan en este sentido, sus objetivos y sus logros. Se expondrán también otras iniciativas innovadoras en vías de desarrollo o en pruebas.

Se continuará con la presentación de formas de reducir emisiones gracias a los avances tecnológicos como pueden ser nuevos materiales, mejoras en los motores, reducciones de peso, etc.

A continuación se desarrollará la parte con mayor contenido propio del autor de trabajo. En él se hará una breve introducción del estado actual del ATM. Después de presentar la legislación aplicable se pasará a exponer las zonas que se verán restringidas, se presentarán los motivos y los criterios según los cuales se han delimitado las zonas. A partir de la división de estas zonas, en los escenarios, se aplicarán diferentes casos que van desde restricciones menores hasta la prohibición de la circulación. Después se pasará a la exposición de los escenarios. Se planteará la idea, se expondrán las situaciones actuales parecidas al escenario en cuestión, se concretarán las zonas en las que afecta el escenario, se expondrán y justificarán las restricciones, se presentará la metodología, las condiciones y el calendario de implantación, se hará un estudio de viabilidad del escenario.

Tras lo previo se plantearán los resultados de forma concreta y resumida y finalmente será presentado de forma resumida el futuro del ATM a modo conclusión.

6. Motores aeronáuticos y sus emisiones.

En este capítulo se expondrá contenido relacionado con los motores de aviación y sus emisiones. Se expondrán las problemáticas para no poder conseguir motores más eficientes y se estudiará la relación entre las operaciones aéreas y su impacto en la contaminación.

6.1 Estado actual, tecnología y emisiones, principales fabricantes y sus motores.

En la aviación actual se puede decir que hay dos tipos de motores operando. Los más primitivos, con prestaciones limitadas, los denominados motores alternativos. Son motores a pistón con bajos empujes. Los motores a reacción, en especial los turbofans, son los utilizados hoy en día en la aviación comercial.

El mercado global de motores a reacción turbofan está valorado en 29930 millones de dólares en el año 2020 y se prevé que para el año 2026 llegue a los 39960 millones de dólares. La desaceleración en los pedidos de aviones Boeing 737 MAX y la aparición del coronavirus COVID-19 hace que previsiblemente se frene la tendencia al alza de la producción de motores aun así, en el periodo de 2020 al 2034 se prevé la fabricación de 238000 motores aeronáuticos³.

Previsiblemente en los próximos años los turbofans representarán el 46% del volumen de motores, un 25% turboejes y el resto otros tipos. Los ingresos debidos a turbofans podrían suponer el 92% debido a su mayor complejidad, tecnología, tamaño, etc. Todo esto viendo las tendencias.

Los principales fabricantes con algunos motores más representativos son: Rolls-Royce (Trent 1000), General Electric Aviation (GEnx), Pratt and Whitney (PW1000G) y Safran Aircraft Engines (Leap).

En general, no se esperan significativos avances tecnológicos que conlleven reducciones drásticas de emisiones. Sólo podrían darse si se cambia el sistema de producción de propulsión (eléctricos) o mediante combustibles sostenibles alternativos usados en los motores actuales.

Se hace especial hincapié en los motores por ser los elementos que mayores emisiones genera. En el proceso de fabricación de los aviones también se generan emisiones y residuos. Estos son tratados como en el resto de industrias. Especial atención merecen las emisiones de los motores en altura.

Las siguientes líneas se dedicarán a hacer una breve descripción de las emisiones y su impacto.

³ Fuente: GLOBAL AIRCRAFT TURBOFAN ENGINE MARKET RESEARCH REPORT 2020

6.2 Emisiones

Las aeronaves emiten gases y partículas en la troposfera superior y en la estratosfera inferior donde tienen un efecto sobre la composición de la atmósfera alterando la composición de los gases de efecto invernadero así como la condensación. Aunque históricamente se ha considerado que los gases emitidos a baja altura en áreas pobladas son los que más afectan a la calidad del aire y la salud humana, en los últimos se ha sugerido que los gases en altura tienen un impacto mayor del que se pensaba.

Los gases que expulsan los motores aeronáuticos son: dióxido de carbono (CO₂), ozono (O₃), metano (CH₄), vapor de agua (H₂O), óxido nitroso (NO), dióxido nitroso (NO₂), óxidos de sulfuro (SO_x) y hollín. Se estima que el impacto del CO₂ es del 50% y el otro 50% es del resto de componentes de las emisiones aunque sigue habiendo mucha incertidumbre sobre el impacto real.

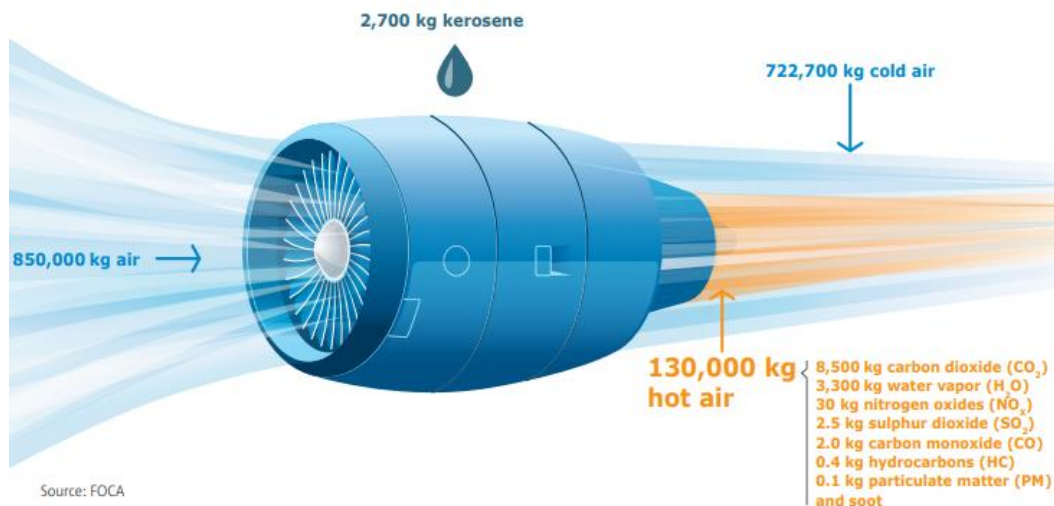


Figura 6.1 Emisiones de un avión a reacción típico de dos motores durante un vuelo de 1 hora con 150 pasajeros

Fuente: European Aviation Environmental Report 2019

Unidades: kilogramos

El vapor de agua emitido por los motores en las estelas contribuye a la formación de cirros, lo que crea una capa de nubes que aumenta el calentamiento global. Es difícil concretar a qué altura y en qué condiciones aparecen porque su desarrollo está condicionado a la temperatura, humedad, momento del día, etc. Su efecto en el cambio climático no está claro. Las emisiones procedentes de la aviación no se pueden distinguir de emisiones de otras fuentes.

Se prevé que para el 2050 se consigan unas aeronaves un 40% más eficientes en cuanto al consumo de combustible que las que había al entrar en el milenio. Eso supone alrededor de un 1% al año, en reducción de combustible. En 2009 IATA puso

como objetivo de mejora de la eficiencia de 1,5% en el periodo de 2009 al 2020. Según la ATAG la eficiencia del combustible ha aumentado cada año un 2,3% desde 2009. Tiene sentido que en los últimos años con la mejora de la tecnología, este porcentaje vaya en aumento. Pero mejorar en la eficiencia no significa por sí solo reducir emisiones. De hecho las emisiones están aumentando. También ha aumentado en un 4% el consumo de combustible a nivel mundial por el aumento de la tráfico aéreo desde 2009 al 2019.

En 2020, las emisiones globales anuales de la aviación internacional ya son alrededor de un 70% más altas que en 2005. La OACI pronostica que, en ausencia de medidas adicionales para 2050, podrían crecer en más de un 300%⁴.

OACI no es optimista sobre el futuro de las emisiones si se sigue en la línea actual y no se toman medidas ni se producen avances tecnológicos. Si este pesimista escenario tuviera lugar, las emisiones provenientes de la aviación para el año 2050 se triplicarían con respecto a los datos de 2019. No hay que olvidar que otros sectores industriales tienen un importante potencial de reducción de sus emisiones. Si los redujesen en línea con el acuerdo de París, y la aviación no tomase medidas para frenar sus emisiones, se colocaría como la tercera más contribuyese a las emisiones a nivel mundial⁵.

Hoy en día no está claro el efecto que tiene el NOx en la atmósfera. Sus efectos negativos parecen claros pero también tiene un buen efecto, el llamado detergente. El NOx lleva a la formación de hidroxilos OH. Estos radicales tienen un efecto de detergente que limpia algunos contaminantes y destruye el gas metano. Este ha sido un descubrimiento inesperado que se ha producido en los últimos años. Además de no estar muy claros los efectos del NOx tampoco se sabe con exactitud las cantidades de este gas que son emitidas a la atmósfera por los motores de aviación.

A la pregunta de qué gas es más peligroso o cual urge reducir en la atmósfera, la respuesta depende de si miramos a corto plazo, 2030-2040, el gas que habría que eliminar es el NOx. Si miramos a largo plazo, 2070-2120, el gas que habría que reducir es el CO2 por su capacidad acumulativa. La respuesta entonces es, hay que reducir ambos. Los escenarios del presente trabajo se centran en el año 2035 y ambos gases son tenidos en consideración.

Se deberían mejorar los sistemas de monitorización de los gases causantes del efecto invernadero para poder llevar un mejor seguimiento, control y poder dar una buena respuesta.

Es importante tomar medidas medioambientales porque el impacto del cambio climático en la aviación es significativo. El cambio de las temperaturas, las estaciones, las lluvias, etc. Puede afectar al rendimiento de las aeronaves, deteriorar las

⁴ Fuente: Comisión Europea 2020, https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/aviation_es

⁵ Fuente: Pidcock, R., & Yeo, S. Analysis: Aviation could consume a quarter of 1.5C carbon budget by 2050. Carbon Brief.

infraestructuras, aumentar el uso de combustible, etc. El aumento del nivel del mar podría dejar inoperativos algunos aeropuertos o impedir la ampliación de otros. El cambio en los patrones de viento afectará con el aumento de turbulencias y rachas de viendo cada vez más difíciles de predecir. Por tanto es necesario reducir la contaminación provocada por la aviación para ayudar al medio ambiente y las personas pero también a la propia aviación.

A continuación se tratará de buscar las zonas del mundo y Europa, más contaminadas y se buscarán relaciones entre éstas y la densidad de tráfico aéreo,

Contaminación regional o local

Se trata de la contaminación que se encuentra a niveles más bajos. Es más acusada en las grandes urbes. Los aeropuertos europeos de mayor tráfico suelen presentar mayores valores de contaminación que inevitablemente contribuye a aumentar la contaminación de sus ciudades.

El informe “Transport and Environment” de ICCT de 2019⁶ muestra las ciudades europeas que presentan más casos de muertes relacionadas con la contaminación producida por los gases emitidos por los aviones. Algunas ciudades son Milán, Turín, Stuttgart, Cologne, Rotterdam, London, etc. Según Sebastian Eastham del Laboratorio de Aviación y Medio Ambiente del Departamento de Aeronáutica y Astronáutica del MIT cada año se producen 16000 muertes a causa de las emisiones contaminantes de los aviones. Supone el 0.4% de las muertes atribuidas a la degradación de la calidad del aire.

Es en sus aeropuertos o espacios aéreos donde es aconsejable que se apliquen restricciones. Se puede ver que la mayoría de estas ciudades coinciden con zonas que presentan alta contaminación.

Estas ciudades tienen aeropuertos con mucho tráfico como el Charles de Gaulle, Heathrow, Schiphol, Frankfurt, Barajas, Gatwick, Munich, Fiumicino, Orly, etc. Y se encuentran en zonas de mucha contaminación atmosférica. Esta situación puede verse en las siguientes imágenes.

En la imagen de la siguiente página se muestran los niveles de NO₂ en la Unión Europea. Son los datos más actualizados que se pueden tomar como válidos porque han sido tomados justo antes de la pandemia del COVID-19, en enero de 2020.

⁶ Fuente: A Global Snapshot Of The Air Pollution-Related Health Impacts Of Transportation Sector Emissions, 2019, Susan Anenberg, Joshua Miller, Daven Henze and Ray Minjares.

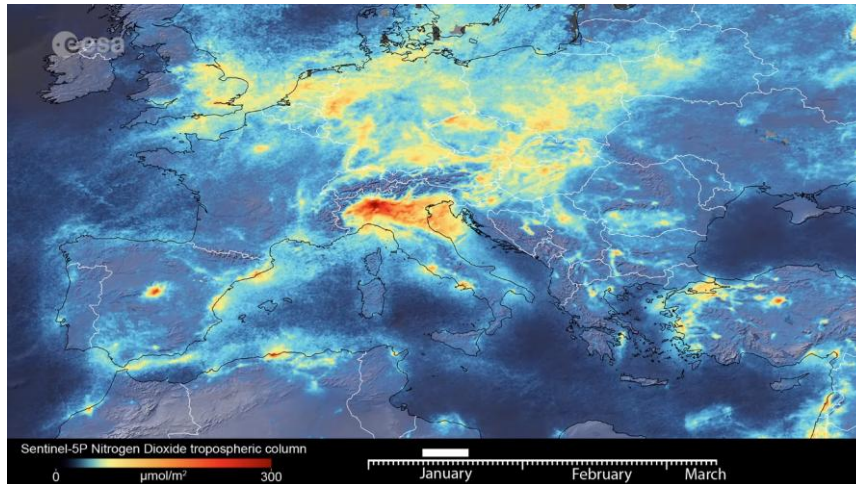


Figura 6.2 Emisiones de NO₂ en Europa, European Space Agency, 2020. Imágenes obtenidas del programa Copernicus de los satélites Sentinel-4 y 5. Unidades: $\mu\text{mol}/\text{m}^2$

Fuente: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2020/03/Coronavirus_nitrogen_dioxide_e_emissions_drop_over_Italy

En la imagen superior se muestra una instantánea de los niveles de NO_x. Para poder predecir zonas que se encuentran contaminadas de forma habitual utilizaremos la imagen siguiente que supone la media de emisiones de NO₂ durante los años 2018 y 2019.

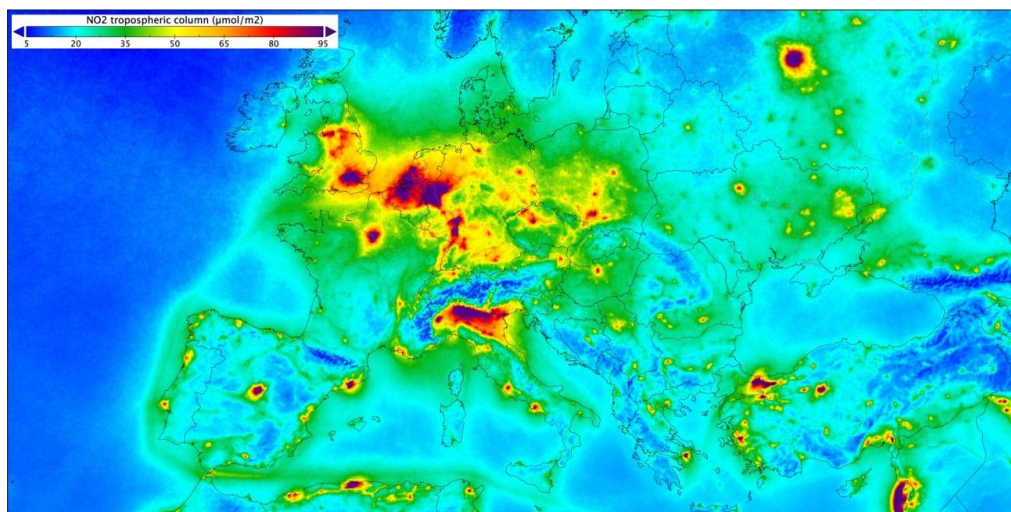


Figura 6.3 Media de emisiones de NO₂ en Europa, 2018-2019. Unidades: $\mu\text{mol}/\text{m}^2$

Fuente: Copernicus Sentinel data (2018-19), processed by KNMI/ESA

A continuación se muestran unas gráficas obtenidas de informes medioambientales realizados y publicados por Aena. En ellas se ve la comparación entre el número de operaciones del aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas y las cantidades de gases registradas por las estaciones instaladas en el aeropuerto y sus cercanías.

Se comparan las emisiones de NO₂ y CO₂ de dos meses. Resulta difícil ver una correlación directa entre operaciones y emisiones.

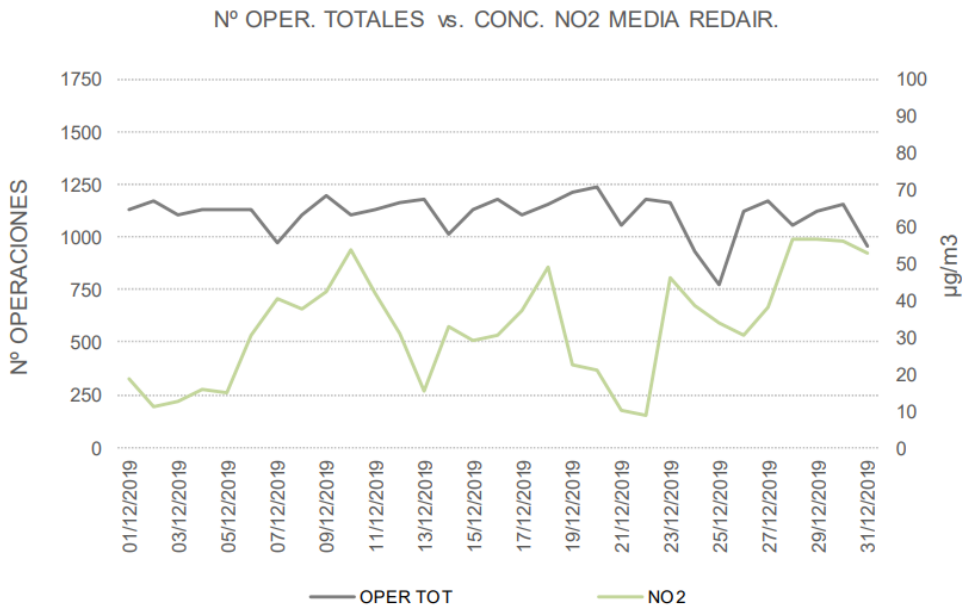


Figura 6.4 Operaciones vs NO2, Enero 2020

Fuente: informes Aena

Unidades: µg/m3

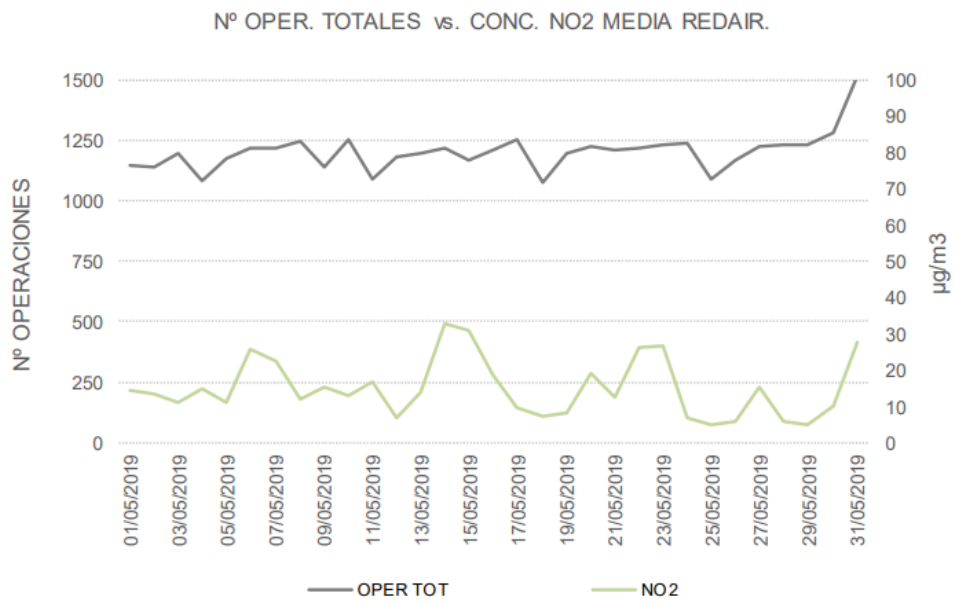


Figura 6.5 Operaciones vs NO2, Mayo 2020

Fuente: informes Aena

Unidades: µg/m3

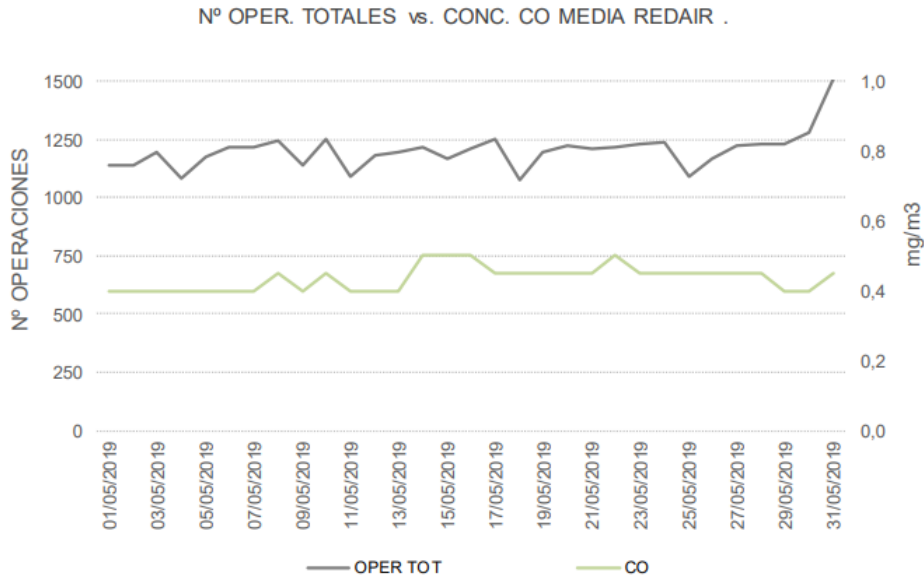


Figura 6.6 Operaciones vs CO2, Mayo 2020

Fuente: informes Aena

Unidades: µg/m3

La calidad del aire de las zonas aeroportuarias cumple los estándares mundiales, con pequeños márgenes en el caso de aeropuertos muy grandes. En el país con una normativa más exigente en este campo, Suiza, únicamente el contorno del aeropuerto de Zúrich sobrepasa a veces los límites de NOx, curiosamente en dos puntos próximos a la principal autopista de la zona.

La dispersión de los contaminantes en espacios abiertos hace difícil identificar la fuente de cada uno, por lo que las estadísticas son de reducido valor. La modelización está aún en una fase muy primitiva por la multiplicidad de fuentes fijas y móviles que participan en las emisiones globales. La calidad del aire es el factor limitador de algunos desarrollos aeroportuarios, como la tercera pista de Heathrow. El principal problema para aumentar la capacidad del aeropuerto podrían ser los óxidos de nitrógeno, producidos tanto por los vuelos adicionales, como por el aumento consecuente del tráfico de superficie.

Contaminación global

Solo como indicación, puesto que en este trabajo nos centraremos en Europa, se muestra como es muy notoria la mayor cantidad de NO_x en el hemisferio norte.

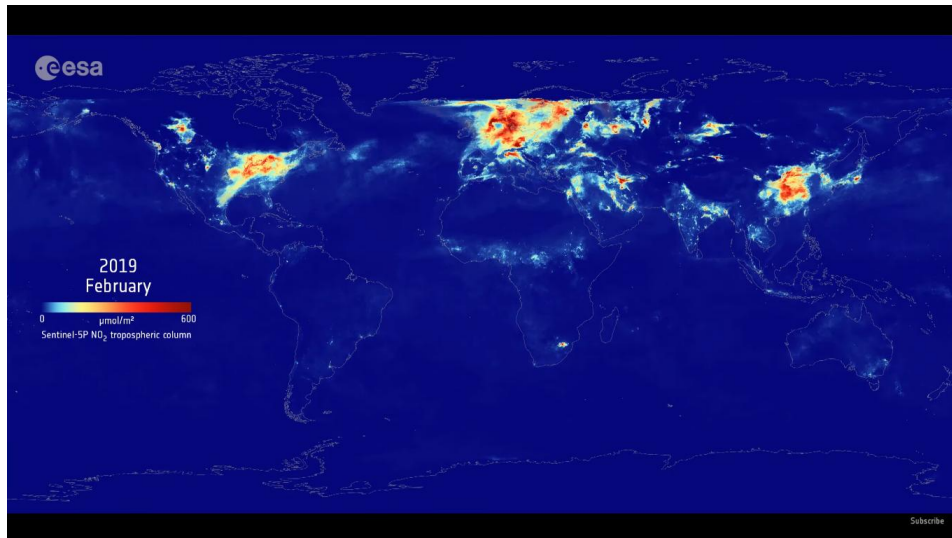


Figura 6.7 NO₂ mundial. Unidades: μmol/m²

Fuente:

[https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Keywords/Description/Air_pollution/\(result_type\)/videos](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Keywords/Description/Air_pollution/(result_type)/videos)

Las concentraciones de CO se encuentran en el ecuador.

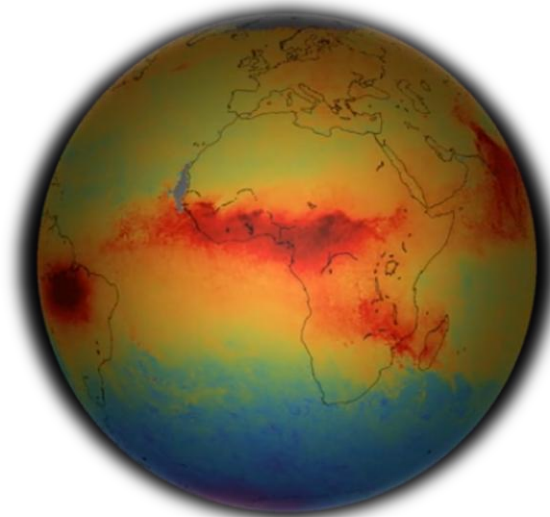


Figura 6.8 Concentraciones de CO globales concentradas en el Ecuador. Unidades: μg/m³

Fuente: Global Sentinel 5, ESA

En los mapas del Anexo I se pueden ver zonas contaminadas a nivel mundial y rutas aéreas con mayor detalle. Se ha visto dónde se encuentra la mayor concentración de gases contaminantes. Se han expuesto concretamente algunos de los emitidos por los motores de aviación.

Ahora surge la pregunta de si estas zonas contaminadas coinciden con los movimientos de tráfico aéreo. Si no fuera así, carecería de sentido restringir zonas para evitar la concentración de la contaminación.

En la siguiente imagen se muestran con líneas azules los desplazamientos de los aviones procedentes de los 10 aeropuertos que más tráfico generan. Se puede ver una concentración importante en la europea central o noroeste. Es también la zona donde se encuentran los mayores aeropuertos europeos.



Figura 6.9 Rutas de aeronaves de los principales aeropuertos europeos.

Fuente: Universidad de Santiago, Dominic Royé, Mapas de aeropuertos con más tráfico
<https://www.geografiainfinita.com/2018/02/los-mapas-de-los-aeropuertos-con-mas-trafico-aereo-de-europa/>

Aunque en la imagen anterior se ven las aerovías por las que transitan las aeronaves europeas no da una idea real de la densidad de tráfico. En la siguiente imagen se muestra la densidad de los vuelos de los 10 aeropuertos con más tráfico de Europa.

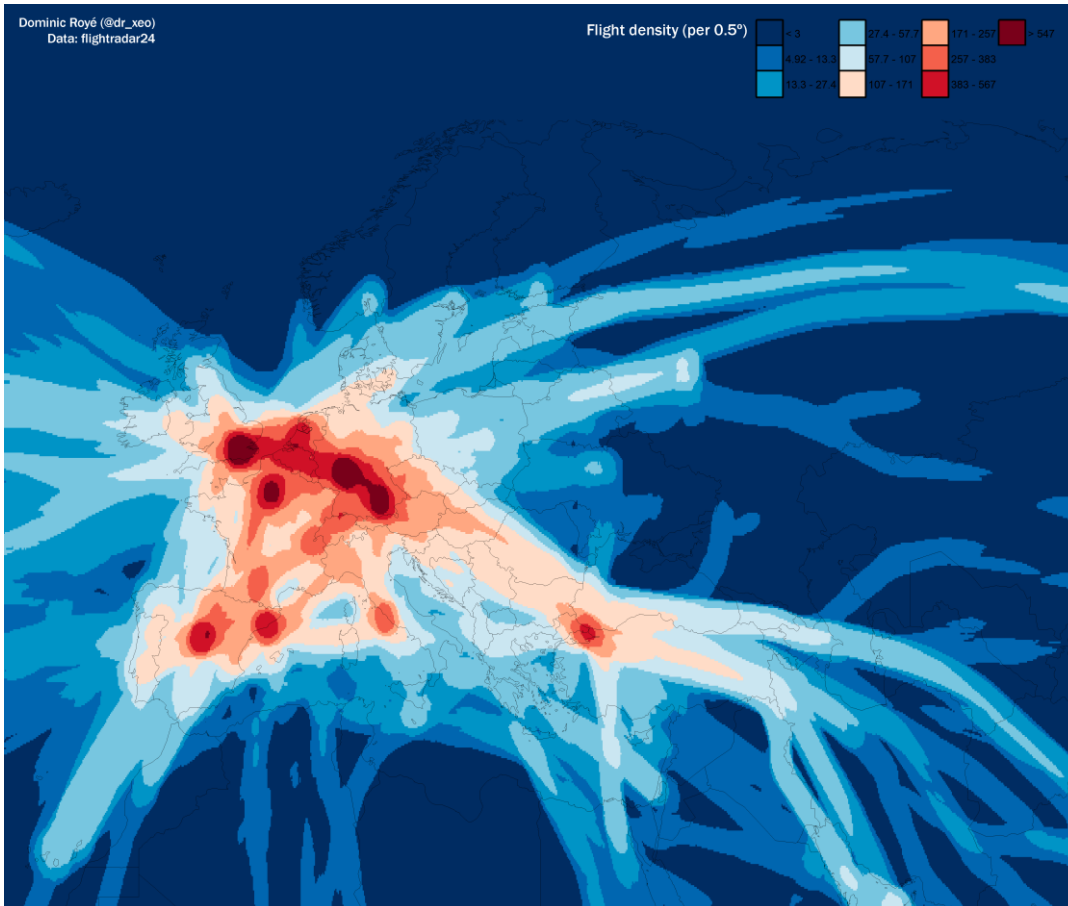


Figura 6.10 Densidad de tráfico aéreo europeo.

Fuente: Universidad de Santiago, Dominic Royé, Mapas de aeropuertos con más tráfico.

Si se hace una comparación entre las rutas aéreas, la densidad del tráfico y la contaminación en Europa, se ve cuales son las zonas afectadas.

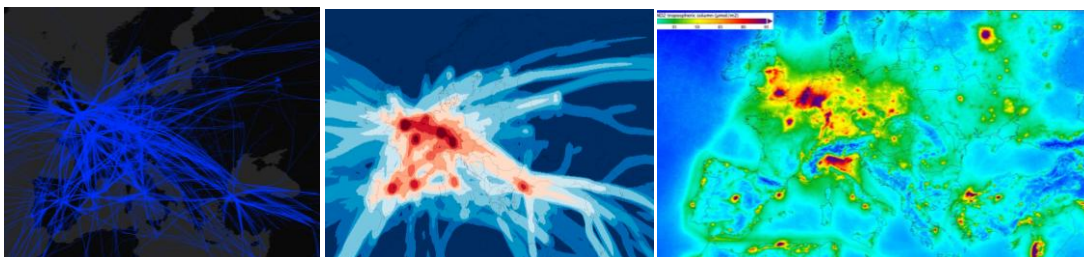


Figura 6.11 Emisiones vs densidad de tráfico europeo

Fuente: Universidad de Santiago, Dominic Royé, Mapas de aeropuertos con más tráfico.

La concentración de emisiones en áreas bajas y concentradas como por ejemplo en los aeropuertos tiene mayores efectos pero afecta a un número relativamente pequeño de personas. Sin embargo la contaminación en altura tiene menores efectos para la salud pero afecta a un mayor número de personas.

Aunque las circunstancias climatológicas y la evolución del clima, en general, no se han considerado, es un elemento que se debe tener en cuenta en futuros estudios ya que afecta a la dispersión y variación de los niveles de contaminación global.

Se puede ver por comparación directa de los mapas que hay una mayor concentración de contaminación en aquellas zonas donde hay mayor densidad de tráfico aéreo en la Unión Europea. Esto no significa que el causante sea la actividad aérea. La contaminación se concentra en grandes urbes con elevada actividad humana e industrial. Pero además la elevada actividad aérea en esas zonas contribuye a aumentar la contaminación de la atmósfera.

Con esta comparación se logra el objetivo de determinar las zonas más contaminadas y la actividad aérea en las mismas para poder proponer las restricciones en ciertas zonas.

Breve comentario final

Incluso si todas las medidas de mitigación actualmente en la mesa fueran implementadas con éxito, es dudoso que se pueda lograr una reducción en las emisiones absolutas de CO₂ de la aviación civil si se realiza el pronóstico de crecimiento del tráfico en el sector. La brecha entre las tasas de crecimiento del tráfico y las tasas de reducción de emisiones se mantendrá, a menos que se pueda cerrar mediante un cambio de comportamiento para reducir la demanda de viajes aéreos. Sin embargo, la reducción de la demanda será fuertemente resistida por todos los interesados en la industria de la aviación civil, incluidos los gobiernos nacionales y los consumidores.

6.3 Problemáticas para no poder conseguir motores más eficientes.

- Relación NO_x y CO₂. Emisiones de NO_x.

Aunque se ha intentado reducir las emisiones de NO_x se ha llegado un punto en el que no es posible hacerlo más. Altas temperaturas de combustión aumentan la eficiencia de los motores pero eso supone aumentar el nivel de emisiones de NO_x, inevitablemente. En el proceso de combustión hay una relación entre la emisión de NO_x y CO₂. Una reducción del 20% de NO_x lleva al aumento de un 2% de CO₂. En las aeronaves de nueva generación se ha llegado al límite de esta relación y no es posible reducir más las emisiones de NO_x sin que se pierda el equilibrio. Los motores actuales emiten un 45% menos de NO_x que sus predecesores pero no se espera seguir reduciendo estas emisiones si no aparece una tecnología revolucionaria.

- Reducción del azufre en los combustibles.

La concentración de azufre en los combustibles de aviación de origen fósil es más alta que en los combustibles utilizados para vehículos terrestres. Se puede conseguir reducir mediante un proceso por el que se elimina el azufre en los combustibles pero no está probado su beneficio medioambiental y reduce la lubricidad. Antes que eliminarlo de los combustibles fósiles parece más lógico a corto plazo utilizar biocombustibles que no proceden de combustibles fósiles y no tienen azufres. El uso de motores eléctricos también sería una opción a largo plazo.

- Reducir la presencia de inquemados. Mejorar el proceso de combustión para reducir la cantidad de hollín emitido.

Para lograr mejoras sostenibles, éstas deben ser en el diseño global del avión, no centradas sólo en un área. Por ejemplo, aumentar el diámetro de la entrada del motor reduce los niveles de ruido pero aumenta la resistencia y el peso lo que lleva a aumentos de consumo de combustible. Es necesario encontrar un difícil equilibrio entre muchos factores.

Por otro lado, aunque aparezca una tecnología prometedora, se tardará mucho tiempo en que llegue a instalarse en las aeronaves debido a los complicados procesos de pruebas y ensayos de seguridad que deben pasar los componentes aeronáuticos.

Otro factor que ralentiza la incorporación de mejoras es la larga vida de los componentes de aviación comparada por ejemplo con la industria automovilística. En la actualidad se están desarrollando prototipos de aviones con fuselaje integrado o Blended wing body (BWB) de los cuales no se espera reducciones importantes de las emisiones contaminantes en los próximos años según Bows, A., Anderson, K.

7. Formas de reducir emisiones

Habiendo visto el estudio de los motores de aviación en la actualidad y las mejoras tecnológicas y las líneas de investigación, se trata en esta parte de analizar las vías de reducir la contaminación. Se presentarán alternativas que tienen que ver directamente con los motores y otras que no. En este capítulo se tratará de introducir el estado actual de la tecnología y se presentará las mejoras futuras que se esperan.

Se estudiarán cuatro pilares básicos de reducción de emisiones. Primero se analizarán los combustibles sostenibles y las alternativas a éstos. Seguidamente se estudiarán las medidas normativas y económicas que pueden o están siendo adoptadas para reducir los efectos de las emisiones provenientes de la aviación. Estos dos temas se pueden consultar en el Anexo II.

A continuación se muestran los otros dos pilares, las medidas operativas o procedimentales y las nuevas tecnologías.

7.1 Operativas o procedimentales.

Se estima que las medidas operacionales y procedimentales podrían reducir las emisiones entre un 8% y un 18%⁷.

EUROCONTROL y EASA estiman que la ineficiencia de la ruta gate-to-gate en Europa es del orden de casi el 6%. El plan maestro de ATM europeo tiene como objetivo reducir la ineficiencia en más de la mitad para 2035. En los Estados Unidos, el programa NextGen también busca mejorar la eficiencia del espacio aéreo, y hay oportunidades para optimizar el espacio aéreo transatlántico y transpacífico.

Los procedimientos operativos eficientes son aquellos que permiten operar una aeronave de manera que el uso real de combustible y las emisiones de CO₂ asociadas se acerquen lo más posible al mínimo teórico.

Permitir que una aeronave vuele en su trayectoria óptima (vertical, horizontal y a la velocidad más económica de combustible) se traduce en eficiencia de combustible. En consecuencia, un método para reducir las emisiones de CO₂ de las aeronaves es a través de una gestión eficiente de los vuelos, comúnmente conocida como Control de tránsito aéreo (ATC) o Gestión del tránsito aéreo (ATM). El sistema ATM actual se basa en gran medida en el espacio aéreo organizado alrededor de las fronteras nacionales, lo que conduce a rutas ineficientes. Los estudios de la red de rutas europeas sugieren que los impedimentos relacionados con ATM aumentan las distancias de vuelo en un promedio del 9 al 10%. Además, en ciertos momentos del día, la falta de capacidad del aeropuerto puede ser un problema que causa congestión y demoras. Según Oliver Inderwildi de la Universidad de Oxford, cada minuto de

⁷ Fuente: Informe Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).

espera volando en esa configuración de vuelo se emiten 160 kg⁸ de CO₂ a la atmósfera.

La sostenibilidad ambiental es un factor clave, y se reconoce que el sistema ATM debe contribuir a reducir las emisiones de CO₂. Sin embargo, lograr un rendimiento óptimo del sistema requiere equilibrar la sostenibilidad ambiental con otras expectativas, a menudo competidoras.

Programas a nivel mundial que trabajan en este sentido son: SESAR (Single European Sky ATM Research Programme), NextGen (Next Generation Air Transportation System), AIRE (Atlantic Interoperability Initiative to Reduce Emissions), and ASPIRE (Asia and Pacific Initiative to Reduce Emissions).

La Separación vertical reducida mínima RVSM (Reduced Vertical Separation Minimum) es un término usado en aviación para denominar la separación vertical requerida entre dos aeronaves que pasó de 2000 pies (600 metros) a 1000 pies (300 metros) entre niveles de vuelo FL290 y FL410 permitiendo así que los aviones operen más cerca de su nivel de crucero óptimo de economía de combustible. Por lo tanto, se reduce el consumo de combustible y, en consecuencia, también las emisiones. La cobertura global se completó cuando la región de Eurasia se convirtió en la última región en completar la implementación RVSM en 2011 (OACI, 2012b). Los estudios ambientales han concluido que RVSM ha reducido las misiones de CO₂ y costes de combustible de los operadores de aeronaves.

En cuanto a las mejoras en el plano horizontal, el Performance Based Navigation o PBN se está utilizando para mejorar la eficiencia mediante el uso más flexible del espacio aéreo.

Las medidas operativas son particularmente interesantes, ya que hay menos probabilidades de encontrar resistencia a la implementación y ésta suele ser más rápida. Las medidas operativas que reducen las emisiones a través de la reducción del uso de combustible probablemente sean defendidas por operadores aéreos. Esto se debe al impacto a la baja en sus costes de combustible y al hecho de que las medidas operativas a menudo se pueden implementar sin la necesidad de grandes inversiones en nuevas tecnologías.

7.1.1 Velocidad

Reducción de la velocidad

Algunos estudios apuntan hacia a una reducción de la velocidad de algunas aeronaves. Defienden su postura porque al reducir la velocidad se requiere menor energía para mover la aeronave y avanzar por el aire. Al quemar menos combustible se reducen las emisiones.

⁸ Fuente: Future of Mobility Roadmap e Ways to Reduce Emissions while Keeping Mobile, 2010.

Esta postura es discutida porque las aeronaves tienen velocidades de vuelo óptimas. Además reducir la velocidad supone volar más y tener los motores funcionando más tiempo.

En Estados Unidos, compañías como Southwest Airlines han aplicado reducciones de velocidades a algunos de sus vuelos con este mismo fin. En vuelos nacionales los aumentos de tiempos de vuelo variaron entre uno y tres minutos. En vuelos internacionales los tiempos de vuelo aumentaron en ocho minutos. Esto representa un pequeño aumento en tiempo pero una reducción de costes importante. En un vuelo internacional de largo recorrido, es posible ahorrar 600 litros de combustible al reducir la velocidad con la intención de consumir menos.

Aumento de la velocidad

Aunque la reducción de la velocidad es una opción, la velocidad supersónica con nuevos aviones ultra eficientes es otra vía. Se trata de una solución a largo plazo, cuando la tecnología lo permita. Antiguos aviones como el Concorde o el TU-144 eran muy contaminantes. En la actualidad hay proyectos activos en el desarrollo de un avión comercial supersónico respetuoso con el medio ambiente, rentable y sostenible.

El Aerion AS2, es un avión supersónico que se espera que pueda realizar pruebas en 2023. Navegará a una velocidad máxima de Mach 1.4 y operará a velocidades permitidas sobre áreas pobladas, aprovechando las condiciones atmosféricas para navegar hasta Mach 1.2 sin generar un boom sónico que llegue al suelo y utilizará 100% biocombustibles. Otros proyectos como el Boom Overture o el X-59 de la NASA se están desarrollando.

En la siguiente grafica se pueden apreciar las emisiones de CO2 por fase de vuelo. Se muestra una media de todos los vuelos europeos durante un año.

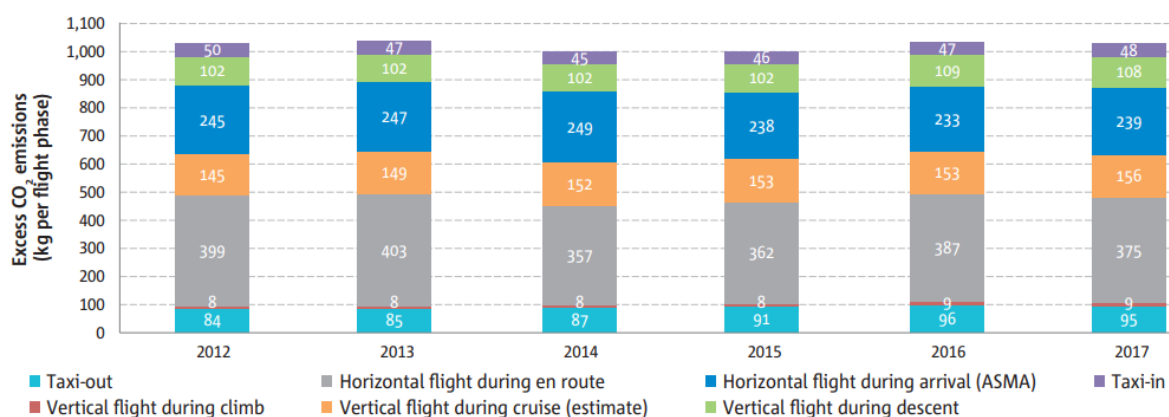


Figura 7.1 Emisiones de CO2 según fases del vuelo.

Fuente: Aviation Environmental Report 2019, EASA, EUROCONTROL y EEA.

7.1.2 Vuelos en formación

Otra forma de ahorro que se encuentra en fase de investigación inicial son los vuelos en formación civiles. Se estima, que en vuelos en formación podrían obtenerse unos ahorros de combustible de hasta un 12-15%, números muy significativos para los márgenes de ahorro que habitualmente se investigan.

La idea general de estos vuelos procede de los vuelos en formación en V militares. El motivo de que no se usen actualmente es la complejidad logística que conlleva, ya que requiere comunicación y coordinación entre aeronaves, además de dar una sensación de poca seguridad a los pasajeros.

Actualmente, se estudian las formaciones en V de tres aviones, con separaciones de entre 2 y 5 millas (3-8 kilómetros) entre ellos, como un método de obtener ahorros significativos sin tener graves problemas de seguridad. Además, no requieren que el vuelo sea completo en formación para aprovechar los beneficios. Puede usarse vuelos intercontinentales coordinados, y que vayan uniéndose a la formación según van avanzando.

Este tipo de vuelos en formación, además se benefician en gran medida del vuelo libre FRA, sin usar aerovías, por lo que los problemas de seguridad que conllevan deberán ser estudiados antes de poderlos poner en práctica.

7.1.3 Ascenso y descenso continuos

En los CCO/CDO se trata de que la aeronave ascienda o descienda de forma ininterrumpida para reducir consumos, emisiones de gases y ruidos innecesarios. Se reducen los tiempos porque estas maniobras se hacen a mayor velocidad. También se dejan de utilizar las alturas horizontales tradicionales en estas maniobras lo que significa elevar la complejidad de las mismas, además podría llevar a una reducción de la capacidad de los aeropuertos. Aena estima que el CDO ha producido una reducción de entre 4 y 6 dB el ruido en poblaciones situadas a menos de 18km del aeropuerto. Se le asocian reducciones de hasta 3 minutos de tiempo de descenso.

Un ejemplo de los buenos resultados de esta técnica son los 57 aterrizajes con descenso continuo que realizaron United Airlines, Air New Zealand y Japan Airlines, con las que consiguieron reducir en un 39% el consumo de combustible.

El CDO tiene hasta diez veces mayor potencial de reducción de emisiones y ruido que el CCO, siendo las emisiones de gases las que mayor potencial de reducción tienen frente al ruido. La aplicabilidad de estos métodos está más condicionada más por la complejidad del espacio aéreo que la del aeropuerto, además de poder comprometer la seguridad si no se lleva a cabo de forma adecuada.

En la siguiente imagen se puede comparar la media de tiempos volados en ascenso y descenso. La media de tiempo de ascenso de los vuelos europeos es de 44 segundos y 165 para descensos. Se puede ver una relación entre estos tiempos y la complejidad del espacio aéreo, sobre todo en la Europa norte-oeste.

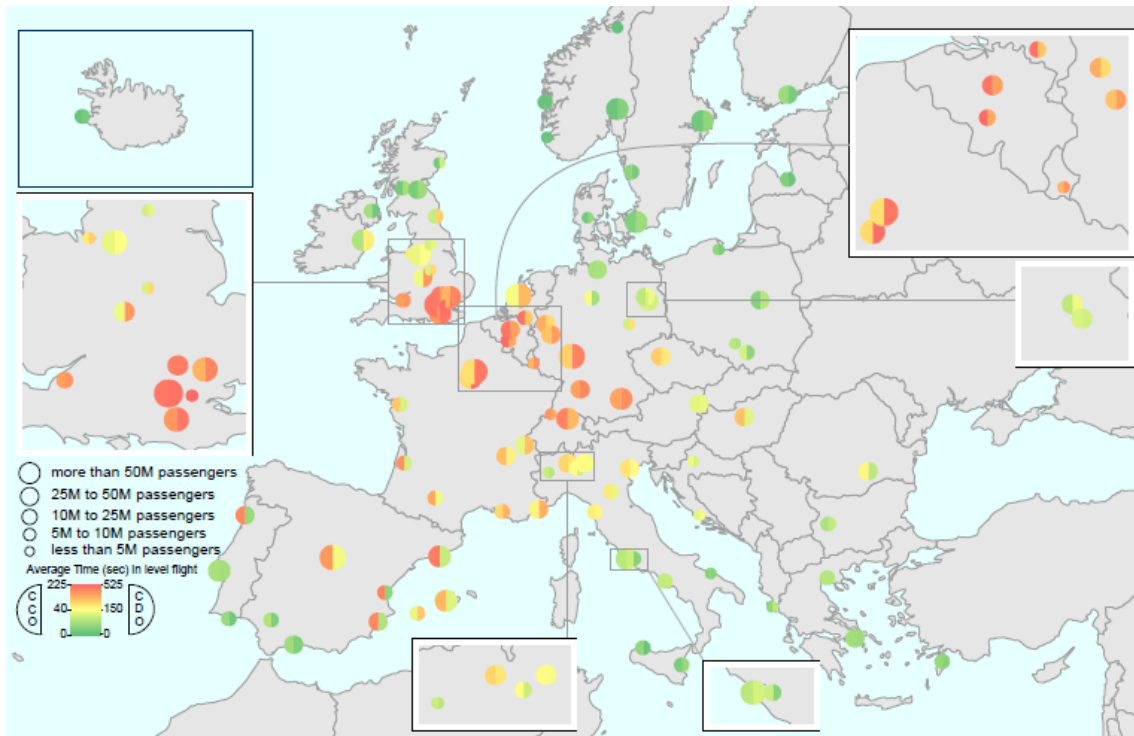


Figura 7.2 Tiempo de consumo de combustible CCO/CDO en Europa. Unidad: segundos

Fuente: European Aviation Environmental Report 2019

En el imposible escenario de conseguir que todos los vuelos europeos sean 100% CCO/CDO se ahorrarían 1,1 millones de toneladas de CO₂ en un año. Un ejemplo de esto son los “aterrizajes verdes”.

Aterrizajes verdes

Son maniobras de aproximación impulsadas en los aeropuertos de Aena que consisten en realizar un descenso continuo sin tramos horizontales y con un funcionamiento de motor que permite una disminución del 25% en las emisiones de CO₂ de media en cada operación (entre 300 y 480 kilogramos por vuelo), lo que implica un ahorro en el consumo de combustible de entre 100 y 150 kilogramos por operación. Además, con esta actuación se pretende lograr una reducción de entre 4 y 6 decibelios en las poblaciones situadas bajo la trayectoria de aproximación de las aeronaves.

Este concepto se ha trasladado también a los aeropuertos. Un “aeropuerto verde” es aquel que hace un uso responsable de los recursos naturales que necesita para su funcionamiento, reduciendo el consumo de energía y promoviendo la utilización de energías renovables para reducir la emisión de gases de efecto invernadero y que gestiona adecuadamente sus residuos. En suma, es un aeropuerto cuyo impacto en el entorno en el que se asienta es mínimo y cuyo objetivo es llegar a ser una instalación neutra en emisiones de carbono.

7.1.4 Reducción de rodaje en pistas.

Se trata de medidas encaminadas a reducir al máximo el uso de los motores de los aviones en tierra. Las soluciones son muy diversas pero todas van encaminadas a mejorar la calidad del aire local. Utilizar un APU con una fuente eléctrica, utilizar camiones tractores que desplacen a las aeronaves desde la pista hasta la terminal y viceversa, optimizar las rodaduras con la ayuda del A-CDM, son algunas de las acciones que permitirán una reducción de emisiones.

7.1.5 A-CDM

El A-CDM (airport collaborative decision making) se trata de un proyecto conjunto ACI, Eurocontrol, IATA y CANSO. Permite a los aeropuertos, a los proveedores de servicios de navegación aérea, operadores, aerolíneas, etc. Trabajar de forma conjunta para optimizar los vuelos al compartir información en tiempo real de potenciales ineficiencias y retrasos tanto en tierra como en el aire. Se persigue mejorar la eficiencia operacional, reducir retrasos, optimizar el uso de recursos y aumentar la predictibilidad de los eventos de un vuelo.

El 40,9%⁹ de las salidas en Europa son desde aeropuertos con A-CDM. Se han conseguido reducciones de tiempo de entre 1 a 3 minutos por cada salida de aeronave y se han producido importantes reducciones de emisiones de CO2.

Para conseguir la eficiencia operacional es necesario llevar a cabo muchas acciones en todos los ámbitos. Es por eso que se han ido creando en los últimos años muchos programas encaminados hacia este objetivo.

7.1.6 Procedimiento Punto Merge y Trombón

Punto Merge

Es un método sistematizado para secuenciar los flujos de llegada desarrollado por Eurocontrol en 2006. Actualmente está implantado en 25 zonas cercanas a aeropuertos con resultados muy positivos.

Se trata de una técnica que permite realizar operaciones de descenso continuo sin la vectorización por radar utilizando una estructura específica P-RNAV. También facilita el ascenso continuo porque sus rutas no interfieren en las salidas.

En la siguiente ilustración se puede ver de forma esquemática en qué consiste el procedimiento.

⁹ Fuente: European Aviation Environmental Report 2019, EASA, Eurocontrol and EEA.

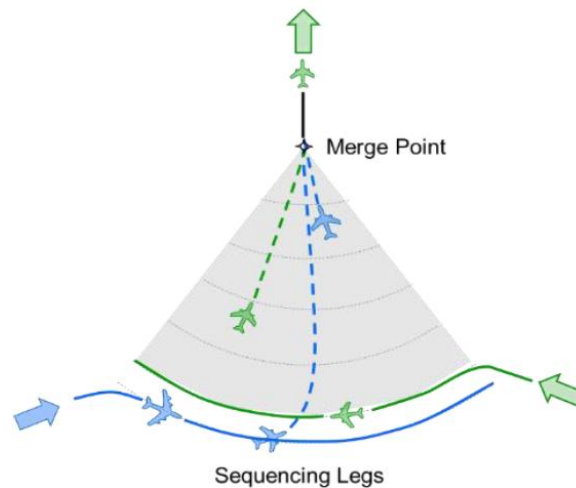


Figura 7.3 Punto Merge.

Fuente: Policy For Point Merge and Trombone Transition Procedures Civil Aviation Authority

Fuente: <https://www.eurocontrol.int/concept/point-merge>

Las aeronaves van entrando por rutas equidistantes (sequenced legs) que apuntan hacia el punto Merge el cual suele situarse a 2100 metros de altura. Hay varias rutas para poder retrasar la llegada al punto merge de las aeronaves que se desee, esto es la conocida como espera lineal, permitiendo opciones de ruta corta o larga en función del punto por el que se entre hacia el merge. También sirve para dar un orden de aterrizaje según la llegada de las aeronaves.

No son necesarios cambios de pistas ni alteraciones significativas en las planificaciones de combustible. Además el procedimiento no tiene componente vertical permitiendo un guiado de dos dimensiones. Para la utilización de este procedimiento no son necesarios nuevos sistemas a bordo ni nuevas ayudas a la navegación en tierra. Se trata de un procedimiento de aproximación inicial o intermedios, después de él se puede hacer un procedimiento de aproximación de precisión.

Con este método se consigue aumentar la capacidad para absorber una importante cantidad de tráfico de forma segura y eficiente. Además se consigue simplificar el trabajo de los controladores y pilotos, estandarización de operaciones y una mejor gestión del tráfico entrante. En función de la configuración del cono, se consigue una menor dispersión del tráfico. Al hacer que las aeronaves pasen por un punto y dirigir las hacia la pista desde allí permite concentrar la huella sonora y hacerla más controlable. Además las aeronaves son desviadas hacia los conos lo que las aleja de posibles ciudades cercanas y las lleva hacia el aeropuerto de forma directa. Es posible adaptar esta configuración a la casuística de cada aeropuerto.

En la actualidad hay muchas rutas de aproximación al aeropuerto que se cruzan con algunas de tránsito. Las aeronaves se ven obligadas a hacer cambios de altura para poder mantener la distancia de seguridad. Con el punto Merge estas situaciones se

pueden evitar, lo que permite reducir consumos y emisiones tanto de ruido como de gases al reducir los cambios de altura.

Esto es de nuestro interés ya que en uno de los escenarios planteados se buscan precisamente soluciones que este método puede dar, como son: reducir la dispersión de las aeronaves a bajos niveles de vuelo, evitar cambios de altura que provoquen aumento de emisiones y permitir el descenso continuo.

Método operativo

Un método operativo típico de fusión de puntos consta de los siguientes pasos:

- Verificar las condiciones de entrada: antes de la entrada en el “leg”, el ATC verifica la velocidad, nivel, distancia de seguridad y emite instrucciones si es necesario.
- Crear espacio: a lo largo de las etapas de secuencia, el ATC mantiene el espacio en el camino, y determina el orden de secuencia.
- Descenso despejado: cuando está libre de tráfico y cuando sea apropiado de acuerdo con las condiciones de altitud, velocidad y posición, el ATC emite la autorización de descenso, en forma de un descenso continuo. Una vez se está en curso hacia el punto Merge, se conoce la distancia y es posible realizar el descenso continuo.
- Mantener y refinar el espacio: el ATC controla la velocidad para asegurar el distanciamiento al salir del punto Merge. Es necesario cumplir con la normativa de limitaciones de velocidad del Anexo 11, del apéndice 4 de ICAO.

Se pueden hacer diferentes configuraciones. Disposición de los “legs”.

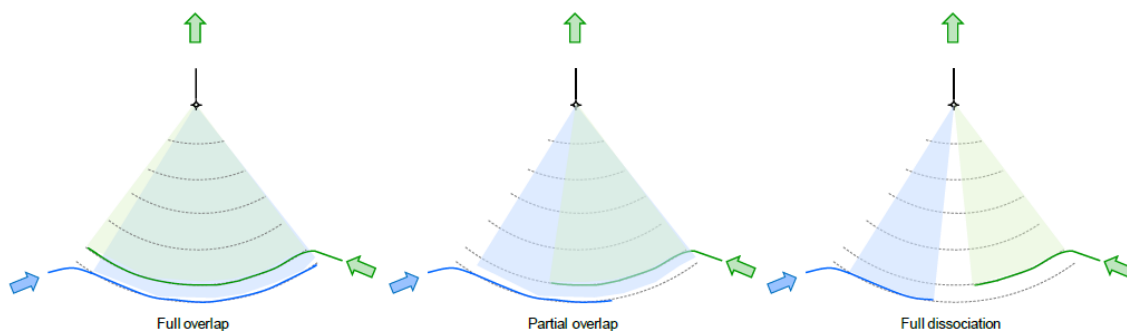


Figura 7.4 Opciones de configuración del Punto Merge.

Fuente: Policy For Point Merge and Trombone Transition Procedures Civil Aviation Authority

Si las rutas son superpuestas o semi superpuestas, debe haber varias alturas de vuelo. Las separadas, en cambio, requieren más espacio horizontal. Esto es de utilidad porque se elegirá una u otra disposición en función de la casuística del aeropuerto. Este procedimiento suele estar controlado por un ATC si el tráfico es grande.

Una clara ventaja de este procedimiento es su versatilidad y adaptabilidad al espacio aéreo del aeropuerto. Como puede verse en la siguiente ilustración, la entrada al cono puede hacerse por el mismo lado.

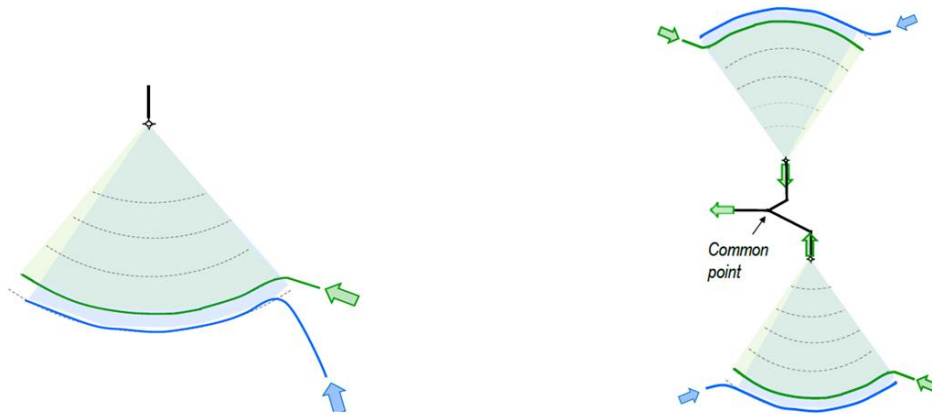


Figura 7.5 Dirección de los “legs” del Punto Merge y configuración en dos conos con punto en común.

Fuente: Policy For Point Merge and Trombone Transition Procedures Civil Aviation Authority

Es posible incorporar varios puntos Merge en un mismo aeropuerto pero no es recomendable hacer más de tres. Esto se debe a que se crearía una gran diferencia de alturas y complicaría los flujos. Es posible también hacer un punto en común denominado “Common point” en la ilustración anterior, en el que confluyen los vuelos que acaban de pasar por su respectivo unto Merge.

Este procedimiento no debe suponer recorrer más distancia que con los métodos de vectorización tradicional. Los “legs” no deben ser demasiado largos. Tampoco se debe ocupar más espacio aéreo y se debe prestar atención al TCAS porque en algunas configuraciones se puede reducir la separación a menos de 300 metros.

Procedimiento Trombón

El procedimiento trombón es una estructura de puntos que permite optimizar la trayectoria de las aeronaves. Comparte características con el Punto Merge aunque se diferencia en el diseño de la distribución de las llegadas y no hay un punto Merge como tal sino un eje de confluencia alineada con la pista. En este sentido el procedimiento de Trombón se asemeja más al uso tradicional de los vectores.

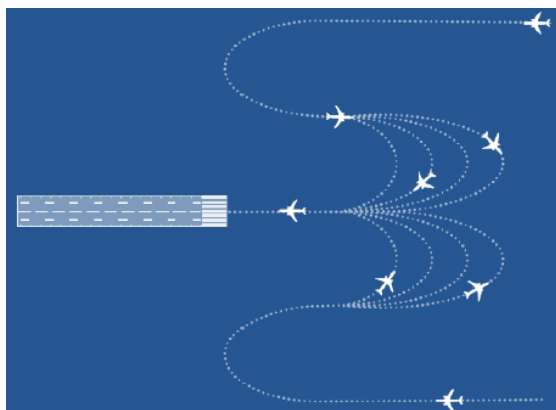


Figura 7.6 Procedimiento Trombón

Fuente: Presentación Air Operations Mangement, Pablo Torrejón Plaza, 2020.

Proyecto Brain

BRAIN o Barcelona RNAV Approach Innovations es el claro ejemplo de aplicación del procedimiento Trombón. Diseñado por ENAIRE, es un proyecto implantado con éxito que agiliza y optimiza el tráfico aéreo. Reduce esperas y la complejidad de los procedimientos. Además de mejorar la seguridad, permite mejorar la predictibilidad de las operaciones y así permite reducir emisiones. Las maniobras propuestas se definen en el tramo de aproximación al aeropuerto, ajustándose a la configuración actual del mismo sin necesidad de hacer grandes cambios en el TMA. La estructura en trombón se utilizará con densidades medias-altas de tráfico.

Se ha concluido que la nueva actuación es más favorable desde el punto de vista operativo y ambiental, al generar menores afecciones sobre la atmósfera y sobre los espacios protegidos.

En la siguiente imagen se puede ver la estructura.

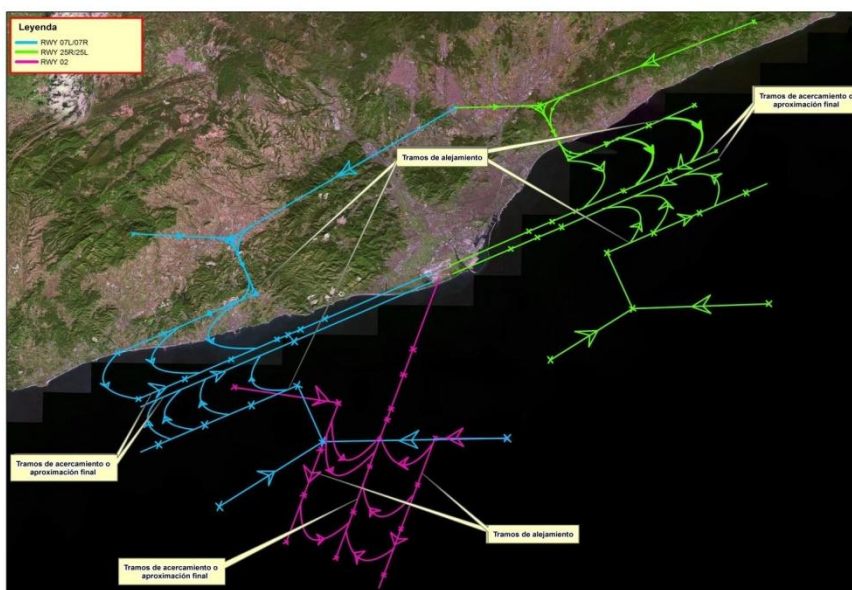


Figura 7.7 Estructura en Trombón en el aeropuerto de El Prat

Fuente: Nota de Prensa del Ministerio de Fomento, ENAIRE, 2018.

Esperas

El procedimiento del Punto Merge permite esperas optimizadas que se realizan antes de entrar en el cono. El número de esperas depende del diseño de la estructura. Se trata de las denominadas esperas lineales porque dependiendo de por qué "leg" entre la aeronave, tardará más o menos tiempo en llegar al Punto Merge y en consecuencia a aterrizar en la pista. Las esperas lineales tienen el inconveniente de que no es posible saber cuánto tiempo habrá que esperar. Es por eso que los circuitos de espera deben seguir teniendo la forma de hipódromo. Estos siguen estando en el STAR (Standard Terminal Arrival Route). El procedimiento del punto Merge debe estar publicado de forma separada en el AIP describiendo la transición.

En la siguiente ilustración se puede ver cómo se produce esta unión o transición entre el STAR y el Punto Merge.

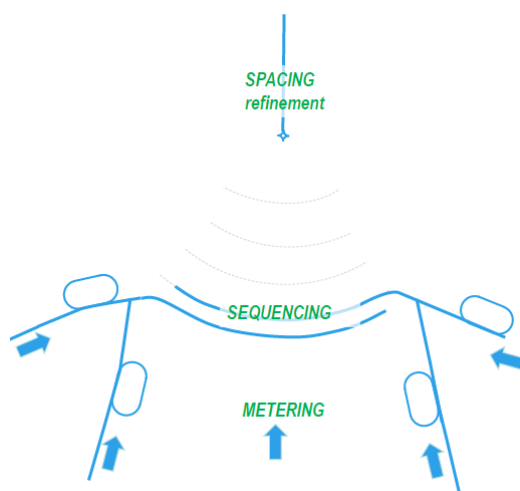


Figura 7.8 Punto Merge con esperas

Fuente: Policy For Point Merge and Trombone Transition Procedures Civil Aviation Authority

Maniobras de precisión P-RNAV

El equipo P-RNAV de la aeronave determina automáticamente la ruta de vuelo deseada de la aeronave mediante una serie de puntos de referencia contenidos en una base de datos. Permite definir mejor las rutas en el espacio aéreo. Esto a menudo significa rutas más cortas y más directas con conexiones simples a la estructura en ruta. Sin embargo, cuando los problemas ambientales juegan un papel importante, la ruta puede diseñarse para aprovechar al máximo el espacio aéreo disponible y, cuando sea posible, evitar las zonas densamente pobladas. Un diseño cuidadoso también puede resultar en flujos de llegada y salida apropiadamente segregados, reduciendo así la necesidad de vectores de radar y, por lo tanto, la carga de trabajo tanto para el piloto como para el controlador.

Se pretende alcanzar una exactitud en el seguimiento en los despegues para que las trayectorias de salida estén dentro de "un tubo de tolerancia" en el 99% de las ocasiones. Cuando se logre que las aeronaves entren el espacio cilíndrico adoptado para el despegue, se producirá automáticamente una disminución de la afección acústica y por tanto el número de afectados por los sobrevuelos de las aeronaves.

7.1.7 SIRMA, Webtrack y REDAIR

SIRMA

Es un sistema de medidas acústicas que permite detectar, medir y asociar el ruido producido por las aeronaves al sobrevolar zonas estratégicas del entorno con micrófonos instalados. Aena lo utiliza en el aeropuerto de Adolfo Suárez Madrid-Barajas.

SCVA el sistema que controla visualmente y acústicamente los movimientos de las aeronaves en las zonas de plataforma de estacionamiento de aviones próximas a las poblaciones que limitan con el aeropuerto.

La información que proporcionan el SIRMA y SCVA sirve para controlar que las aeronaves cumplen con las trayectorias y procedimientos establecidos. En caso de que se produzca algún incumplimiento se investigan las causas que lo produjeron y se formula denuncia ante la Agencia Estatal de Seguridad Aérea por si ese hecho fuese la causa de inicio de expediente sancionador.

Aena prevé la introducción progresiva de restricciones operativas para que no puedan volar las aeronaves más ruidosas.

WebTrack

El sistema WebTrak permite observar la trayectoria de los aviones que despegan o aterrizan en un aeropuerto y los niveles de ruido asociados a los mismos. La información proporcionada por WebTrak incluye el número de vuelo, el tipo de avión, la altitud y la trayectoria utilizada. Es una herramienta que es de utilidad para AENA y proporciona al usuario interesado información.

Aquí se pueden consultar solo niveles sonoros. Para no superar los niveles de gases contaminantes se ha creado REDAIR.

REDAIR

La red de vigilancia de calidad del aire (REDAIR) examina de forma continua y automática los niveles contaminantes procedentes de las emisiones atmosféricas. Este seguimiento diario permite el control de los umbrales de contaminación permitidos.

Se emiten informes mensuales que presentan gráficos que evalúan diferentes parámetros de calidad del aire. Se pueden observar, entre otros, la evolución de las concentraciones de NO₂, gráficos comparativos de los valores medios diarios de NO₂ y la evolución mensual de NO₂, PM₁₀, PM₂₅, SO₂, HCT y CO.

La media anual de las estaciones de NO₂ en el año 2019 ha sido de 27 µg/m³ siendo el valor medio límite anual de 40 µg/m³. No se supera el límite del valor medio anual de ninguno de los valores medidos.

Como medidas correctoras, se encuentra la instalación de equipos de suministro eléctrico para los aviones que permiten mantener operativos los sistemas de a bordo sin recurrir a las unidades de potencia auxiliar. Además de otras medidas de menor calado como inspecciones de calderas, coches menos contaminantes, etc.

7.1.8 Cielo Único Europeo I & II+

El cielo único europeo persigue mejorar la gestión del tráfico aéreo a nivel institucional, operativo, tecnológico y de control. Pretende satisfacer las necesidades futuras del espacio aéreo europeo en materia de capacidad, seguridad, eficiencia e impacto medioambiental. El SES I ha introducido instrumentos regulatorios para reducir las emisiones asociadas al aumento del 42% del tráfico aéreo esperado entre el 2017 y el 2040.

Mediante KPIs como son: la comparación de la distancia más corta entre dos puntos, la trayectoria del plan de vuelo y la realmente seguida. Busca relacionar el impacto ambiental y las rutas seguidas. Se dan datos de eficiencia de ruta de vuelo horizontal pero no vertical. El tiempo de rodaje es comparado con el tiempo empleado en esa operación con tráfico bajo.

Por el momento no se recoge información de emisiones diferentes al CO₂ como pueden ser los NO_x, tampoco niveles de ruido o calidad del aire. Cubrir estos temas ha sido puesto como objetivo a partir del año 2020 por parte de la Comisión Europea. La reforma del Cielo Único Europeo contribuirá a reducir hasta el 10 % de las emisiones del transporte aéreo.

El Single European Sky (SES II) se aprobó en 2009 y se introdujeron cambios enfocados a la mejora económica y medioambiental, ver apartado de legislación del Anexo V. Se introdujo un esquema de rendimiento a nivel europeo que se centra no solo en el espacio aéreo sino también en la prestación de servicios, es un reenfoque de los actuales Bloques funcionales aéreos o FAB (Functional Airspace Blocks) y también un Network Manager para gestionar la compleja red. Con los FABs se persigue aunar el fragmentado espacio aéreo superior europeo, instaurar una cooperación entre proveedores de servicios de navegación aérea, optimizar la organización y la utilización del espacio aéreo mediante el establecimiento de rutas y sectores de control más eficientes y crear sinergias globales.

Debido a algunos vacíos en el programa SES II, sobre todo de carácter legislativo, se propusieron algunos cambios con el SES II+.

En las imágenes siguientes se puede ver la evolución del espacio aéreo.

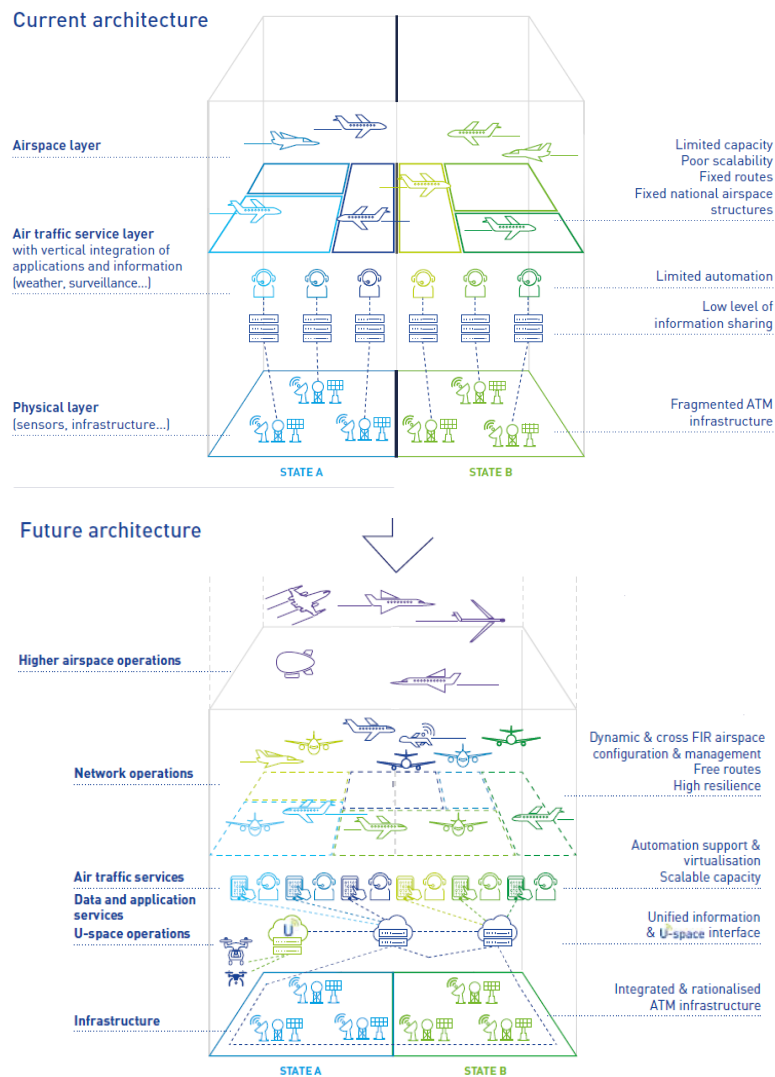


Figura 7.9 Arquitectura actual y futura del espacio aéreo

Fuente: European Atm Master Plan, 2020

Network Manager

El Network Manager creado por el SES II, tiene como funciones, desarrollar la red de rutas europeas, organizar la gestión del flujo de tráfico aéreo, coordinar frecuencias de radio dentro de las bandas de frecuencia de aviación utilizadas por el tráfico aéreo general, coordinar códigos de transpondedor de radar. El Network Manager pasó de ser un concepto en papel a una realidad exitosa reconocida por todas las partes interesadas, aportando beneficios tangibles de rendimiento diario a la red de la UE y los estados adyacentes. Su presupuesto asciende al 2.8% de los costes totales en ruta en Europa. Ha demostrado ser capaz de dar rutas alternativas para evitar la congestión del tráfico aéreo. Así se demostró en eventos como la crisis ucraniana.

EI EUIR

Para conseguir el SES es necesario reconvertir de forma progresiva los espacios aéreos separados. Los FIRs se deberán convertir en EUIR.

La creación de un único FIR en el espacio aéreo superior permitirá que este espacio aéreo se reconfigure en áreas de control delimitadas sin tener en cuenta las fronteras nacionales, asegurando así el uso más eficiente del espacio aéreo, los sistemas y el personal.

7.1.9 SESAR

Se puede decir que SESAR es el pilar tecnológico del programa SES. Su objetivo es mejorar el rendimiento de la gestión del tránsito aéreo modernizando y armonizando los sistemas ATM a través de la definición, desarrollo, validación y despliegue de soluciones innovadoras tecnológicas y operativas de ATM.

La visión de SESAR para ir hacia un cielo único europeo digital conlleva una modernización significativa de la tecnología para poder crear rutas individuales para cada aeronave. De esta forma cada avión puede seguir la trayectoria más eficiente según sus características de vuelo. Para conseguir esto, la compartición de información entre aeronaves y los propios aeropuertos, es crucial. Esto se pretende implantar en toda la Unión Europea y no por sectores como ocurre ahora. Desde 2009 se está en la fase de desarrollo y validación, que continuará hasta 2024.

Con implantación del programa SESAR se espera aumentar la capacidad. La red podrá acomodar 15,7 millones de vuelos, lo que supone un aumento del 50% en el rendimiento de la red en comparación con 2017. Con retrasos por debajo o al nivel del objetivo acordado en el SES, máximo 0,5 min por vuelo distribuido en todos los vuelos. Se espera ahorrar 476 millones de minutos en retrasos evitados entre el 2019 y el 2035.

Las inversiones necesarias para llevar a cabo el programa SESAR entre los años 2019 y el 2035 están entre 7 y 11 mil millones de euros. La aportación de SESAR a la reducción de emisiones podría estar entre 240 y 450 kg de CO2 ahorrados en promedio por vuelo debido a la optimización de trayectorias.

En cuanto al ahorro, SESAR prevé un ahorro de entre 57 y 73 euros por vuelo. En el periodo de tiempo mencionado se espera un ahorro de 34 miles de millones de euros gracias a la mejora de la capacidad.

Según los resultados de las simulaciones realizadas por el Network Manager, se ha estimado una reducción de los kilómetros volados entre 7,5 y 18,5 en 2030 y entre 13 y 24 km en 2035. Considerando el pronóstico del tráfico proyectado hasta 2035, y aumento lineal en la reducción de kilómetros, los beneficios totales se estiman entre

30 y 60 millones de toneladas de CO2 correspondientes a entre 3 y 6 mil millones de euros durante el período 2019-2035¹⁰.

Todas las simulaciones indican que se pueden mantener los mismos niveles de seguridad.

SESAR Joint Undertaking

SESAR Joint Undertaking es una iniciativa de la Comisión Europea junto con Eurocontrol, forma parte del programa SESAR, es responsable de la coordinación de todas las actividades de investigación de la gestión del tráfico aéreo en la UE.

7.1.10 Free Route Airspace

El espacio aéreo de ruta libre o Free Route Airspace (FRA) es un espacio aéreo en el que los usuarios pueden planificar libremente una ruta entre los puntos de entrada y salida definidos. Sujeto a la disponibilidad del espacio aéreo, la ruta es posible a través de puntos intermedios, sin referencia a la red de rutas del servicio de tránsito aéreo ATS. Dentro de este espacio aéreo, los vuelos siguen sujetos al control del tráfico aéreo.

Pasar de una ruta fija a una red de rutas libres ofrece a las aeronaves usuarias del espacio aéreo la oportunidad de volar rutas más directas y conduce a un flujo de tráfico más predecible. Un estudio de EUROCONTROL estima que las aerolíneas podrían ahorrar 3.000 toneladas de combustible al día una vez que el espacio aéreo de ruta libre se adopte universalmente en virtud del Reglamento (UE) No 716/2014 de La Comisión 716/2014, la regulación europea que entra en vigor en enero de 2022. Además de proporcionar ahorros sustanciales en tiempo de vuelo y emisiones, el espacio aéreo de ruta libre acerca la gestión del espacio aéreo al objetivo a largo plazo de apoyar las operaciones y el desarrollo futuro de la gestión del tráfico aéreo.

MUAC, Maastricht Upper Area Control Centre es un proveedor internacional sin fines de lucro de servicios de navegación aérea operado por EUROCONTROL en cuatro estados europeos: Bélgica, Alemania, Luxemburgo y los Países Bajos. Es pionero en la aplicación del libre espacio aéreo superior, por encima del FL245.

Existe un espacio aéreo de libre tránsito similar al Maastricht Upper Area Control Centre, el llamado Karlsruhe (KUAC). Estos proyectos se han desarrollado con el apoyo de SESAR y FABEC FRA. Tanto MUAC como KUAC se encuentran en una misma iniciativa llamada Free Route Airspace Maastricht and Karlsruhe (FRAMaK).

Los espacios aéreos se encuentran en el noroeste europeo. En las áreas delimitadas como free route, se crean unos puntos de entrada y salida a los mismos. Una vez dentro del área es posible navegar de forma "libre". En la imagen siguiente se pueden ver algunas de estas rutas libres dentro de los espacios Maastricht y Karlsruhe.

¹⁰ Fuente: A proposal for the future architecture of the European airspace, SESAR SJU, 2019

Son el resultado de unas pruebas que se hicieron con el objetivo de mejorar la eficiencia y reducir las emisiones. Estos espacios aéreos se probaron y son funcionales principalmente durante la noche y los fines de semana, concretamente el 59%. El 41% son utilizados las 24h.

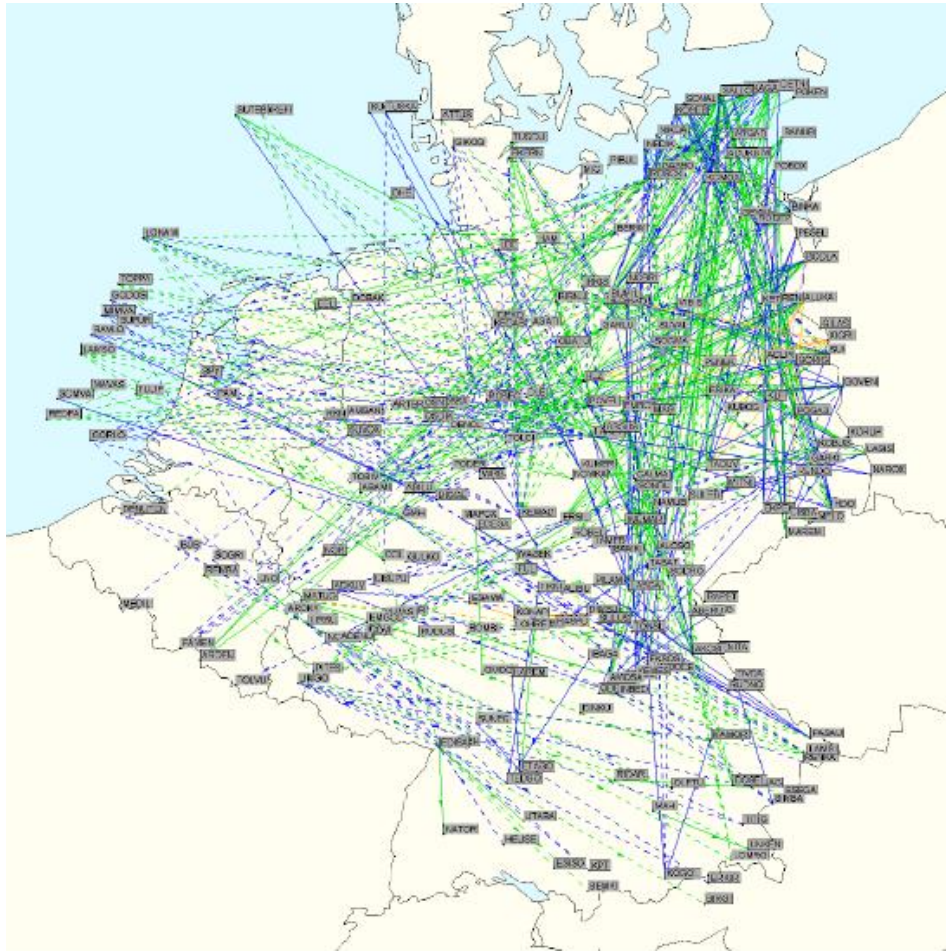


Figura 7.10 Rutas directas en el FRA de FRAMaK

Fuente: SESAR, Free Route Airspace Maastricht and Karlsruhe (FRAMaK), Dr. Morten Grandt, DFS

Un proyecto de simulación de SESAR llevado a cabo en 2018 demostró la viabilidad de FRA en entornos de alta y muy alta complejidad y fortaleció el apoyo para la implementación de FRA por parte de los ANSP de FABEC. La investigación mostró ahorros de 1-2% en la distancia recorrida, reduciendo el consumo de combustible y las emisiones según el Skyway Magazine de EUROCONTROL. También demostró una mayor flexibilidad para los usuarios del espacio aéreo, por ejemplo seleccionando rutas que eviten el espacio aéreo abarrotado y reduzcan la congestión. Los resultados también proporcionaron información sobre la futura reorganización del espacio aéreo en ausencia de una red de ruta fija.

7.1.11 Cross-Border Arrival Management (XMAN).

Cross-Border Arrival Management está reduciendo las emisiones en los principales aeropuertos de Europa variando la velocidad de las aeronaves para permitir un flujo constante.

El combustible representa un alto porcentaje de los costes de una aerolínea y XMAN puede reducir el tiempo que pasan los aviones en la fase de vuelo de alto consumo de combustible al reducir la velocidad en la fase de vuelo de crucero haciéndola más eficiente en combustible. El procedimiento XMAN toma la secuencia de llegada al aeropuerto y comparte esta información con los centros de control de área superior cercanos. Esto permite a los controladores en ruta en los centros vecinos controlar la velocidad de los aviones para adecuar el tráfico.

Anteriormente, esta acción solo era posible en el espacio aéreo terminal, dentro de 185 km o menos. Dependiendo de la carga de trabajo, los controladores en ruta son libres de decidir si recurrir a XMAN antes de emitir instrucciones a los pilotos.

Varios aeropuertos han introducido operaciones XMAN más avanzadas que requieren la colaboración entre múltiples centros de control de aproximación y dependen del intercambio abierto de información aeronáutica.

El despliegue se aceleró desde que la Comisión Europea adoptó la Regulación 716/2014 ya mencionada, que ordena que 24 aeropuertos implementen procedimientos XMAN para enero de 2024.

El procedimiento ha estado operando en Zúrich desde 2017, donde más del 75% del tráfico entrante puede beneficiarse de las acciones de XMAN que en rutas hacia Múnich, Londres y Gatwick (desde diciembre de 2019), donde los ahorros potenciales se estiman en 26,000 minutos por año en el transporte aéreo de bajo nivel de vuelo, ahorrando a las aerolíneas alrededor de 1,200 toneladas de combustible y reduciendo las emisiones de CO₂ en 3,800 toneladas de acuerdo con NATS.

7.1.12 Otras iniciativas

A continuación se van a presentar iniciativas del programa SESAR que se van a desarrollar o se están aplicando ya. Son iniciativas de organismos.

- Arrival Management extended to en route Airspace (AMAN).

Consiste en alejar del aeropuerto el punto de control para los vuelos entrantes para poder así mejorar su gestión. Permite ahorrar combustible a niveles más bajos en esperas mediante el ajuste de los vectores.

- Enhanced Terminal Airspace using RNP-Based Operations.

Permite afinar las rutas para reducir el consumo de combustible y el ruido.

- Departure Management Synchronised with Pre-departure Sequencing.

Consiste en mejorar la gestión antes del despegue para permitir un mejor flujo hacia la pista en base a la información de los tiempos de las rodaduras. Permite reducir

combustible al evitar esperas prolongadas para la pista y reducir las paradas en las calles de rodaje.

- **Departure Management integrating Surface Management Constraints.**

Consiste en introducir cambios tácticos para crear una secuencia de salidas con el fin de reducir el consumo de combustible y las emisiones que ello conlleva.

- **Time-Based Separation for Final Approach.**

Consiste en reemplazar la actual distancia de seguridad por intervalos de tiempos en función del tiempo y manteniendo la capacidad de aproximación hacia la pista. El objetivo es ahorrar combustible y reducir los tiempos de espera.

- **Automated Assistance to Controller for Surface Movement Planning and Routing.**

Consiste en que los controladores podrían controlar y modificar gráficamente las rutas y los movimientos en tierra lo que ayudaría a crear operaciones más predecibles. Esto permitiría ahorrar combustible y reducir los tiempos de rodadura.

Iniciativas de proveedores de servicios de navegación aérea. Es el caso de Austro Control que cambió la entrada al aeropuerto de Salzburgo de la entrada norte a la sur ahorrando emisiones y ruido.

Utilizar aeropuertos alternativos es una opción propuesta en el “Challenges of Growth 2040”. En el Anexo IV se pueden ver los aeropuertos originales y sus posibles alternativos con la cantidad de vuelos que sería posible desviar.

Iniciativas de aerolíneas. Desde el caso de Lufthansa de reducción de emisiones sonoras al crear un vortex en el ala de los A320 a los transportes en tren de los pasajeros de la compañía Australian Airlines. IAG ha conseguido reducir 80000 toneladas de CO2 en un año gracias a 25 iniciativas diferentes como utilizar camiones de push back eléctricos, reducir el uso de motores en la rodadura y reducir la resistencia al retraer las luces de algunos modelos.

7.2 Nuevas tecnologías.

En las nuevas tecnologías podrían verse tres tendencias de acción bien diferenciadas. Una sería la tendencia clásica que consiste en buscar mejoras de diseño estructural de los aviones y los sistemas propulsivos. Reducciones de peso, mejoras aerodinámicas, etc. La segunda tendencia serían los nuevos avances tecnológicos encaminados a conseguir alas curvas y aeronaves de fuselaje integrado con sistemas propulsivos híbridos o totalmente eléctricos. La tercera tendencia son los combustibles sostenibles o SAF.

Los nuevos modelos de aviones como los A350 o el B787 son un 20% más eficientes que sus predecesores. A corto plazo, los combustibles parecen los más prometedores. Mediante el uso de los mismos se podría reducir en un 80% las emisiones, según Skyway de EUROCONTROL.

7.2.1 Materiales.

El uso de nuevos materiales resistentes y ultraligeros como los materiales compuestos en el fuselaje, están suponiendo reducciones de peso muy significativas. También se está trabajando en la mejora de materiales metálicos, aleaciones de altas prestaciones para partes de los motores y los trenes de aterrizaje. Es un campo muy dinámico que ofrece diversas vías de acción.

7.2.2 Reducción de peso.

Uno de los puntos en los que se fundamenta actualmente el diseño de aeronaves es en la reducción de peso. El futuro de los materiales para la reducción de peso de los aviones pasa por el uso de composites de nueva generación como fibras de carbono de más alto módulo de elasticidad y resistencia, fibras orgánicas y cerámicas, materiales multifuncionales, nanotecnología y matrices orgánicas, el desarrollo de los nanotubos de carbono y el uso de materiales más ligeros en zonas en las que aún se usan materiales tradicionales, como los motores.

7.2.3 Factor de ocupación.

Aumentar el factor de ocupación es una manera sencilla de reducir las emisiones por pasajero. No solo se trata de llenar ocupar el número máximo de asientos posibles sino diseñar el interior de las cabinas para poder albergar al máximo número de pasajeros. Al aumentar la ocupación, se aumenta el peso, el consumo y las emisiones pero resulta más respetuoso con el medio ambiente un avión lleno a su óptima capacidad. En 2018 el factor de ocupación en vuelos internacionales fue del 81,2% 0,4 puntos porcentuales más y el mismo factor en vuelos regionales fue del 83%, 0,2 puntos porcentuales más.

Se pueden consultar factores de ocupación por región definida por ICAO en el documento "CO2 emissions from commercial aviation, 2018" de ICCT que figura en la bibliografía.

7.2.4 Aviones más grandes y nuevos diseños.

En el informe "European aviation in 2040, Challenges of Growth" se hizo una simulación en la que las aeronaves que operan en la UE fueran de mayor tamaño y esto condujo a una reducción del 8% la demanda de pasajeros que no encontraban asiento libre. Esto es, más pasajeros pueden volar, en menos vuelos.

Avances de diseño como las grandes alas de los nuevos modelos como el B787 o el A350 han mostrado un mejora del 20% en el consumo de combustible.

Los aviones grandes generalmente son más eficientes en largas distancias.

Son conocidos los problemas que ha tenido el A380, por eso, no se prevén aviones de tales dimensiones a corto plazo.

Aeronaves de fuselaje integrado.

En estas aeronaves no se ve una separación clara entre el cuerpo y las alas, sino que es un uno. Esto permite una mayor superficie interna para aprovechar, así como mayor eficiencia en sustentación y reducción de rozamientos y turbulencias, pudiendo lograr así una mayor eficiencia en el consumo de combustible. Se reducen las emisiones tanto sonoras como de gases.

Uno de los problemas que presenta este diseño de aeronaves es que para que resulten rentables y estructuralmente fiables, su tamaño debe ser muy grande, deberá servir para albergar a más de 800 pasajeros. Esto choca con las necesidades del mercado, tal como se ha visto con el cese de la producción del Airbus 380. Otro problema es la falta de ventanas, un elemento considerado como necesario para el confort de los pasajeros.

Uno de sus mayores problemas para el desarrollo de la tecnología es, de la misma forma, una posible ventaja de este tipo de aeronaves: la alta capacidad. Se necesita de un tamaño considerable para que este diseño resista en la zona de las alas si queremos que sea una zona de carga de pago. Para ello, necesitamos modelos que serían capaces de albergar como mínimo a 800 pasajeros. Sin embargo, esto es un problema, ya que el mercado ahora mismo no necesita de aeronaves de estas características.

8. Futuro del ATM

En este punto se presentará de forma breve el estado actual y la gestión del tráfico aéreo para pasar al estudio del futuro del mismo. Se expondrán los tres escenarios con sus zonas de aplicación y criterios.

La legislación aplicable se puede consultar en el Anexo V de este trabajo.

8.1 Estado actual y gestión ATM.

En el año 2017 se batieron records de aumento del tráfico aéreo, un 8%. En 2018 fue del 6,5% y en 2019 alrededor del 4,2%. Para el año 2040 se espera que el tráfico aéreo crezca un 53% lo que supone llegar a los 16,2 millones de vuelos, un crecimiento anual del 1,9%. Esta desaceleración se espera debido al descenso del crecimiento económico mundial, incremento de los precios de los combustibles y aeropuertos cada vez más congestionados. Eurocontrol en su informe European Aviation Challenges for 2040 establece varios escenarios. El escenario que muestra un 1,9% de crecimiento contempla la aplicación de medidas reguladoras medioambientales, la estabilización de la economía y la llegada al natural aumento del tráfico, no tan acusado como el de los últimos años. Este escenario se considera relativamente optimista. El pesimista presenta una fragmentación total entre países y falta de acuerdos, éste prevé un aumento de vuelos de sólo el 12%, lo que significa 11,9 millones de vuelos.

La crisis del COVID-19 ha afectado de forma significativa y no ha sido prevista como tal en ningún estudio de este tipo. Para poder hacer una aproximación razonable al futuro se asumirán unas cifras de crecimiento del tráfico aéreo del 32%, un crecimiento anual medio del 0,9% o aproximadamente 14 millones de pasajeros para el año 2040. Se considera que esta cifra es suficientemente baja teniendo en cuenta los impactos mencionados. Además parecen cifras razonables porque el mejor escenario que presenta Eurocontrol en su informe supone un 84% más de vuelos, con un crecimiento anual del 2,7% o 19,4 millones de vuelos para el 2040.

El crecimiento del 0,9% anual hasta 2040 es una media. Debido al COVID-19 es previsible que no haya crecimiento en los años 2020, 2021 y posiblemente 2023. Durante la crisis económica de 2008 el crecimiento en ese año fue del 2,4% y fue negativo en 2009, cayó un -1,2%. Teniendo en cuenta la gravedad de la crisis actual es muy probable que el crecimiento sea negativo por lo menos en 2020 y 2021. A partir del 2023 se podría esperar volver a la senda del crecimiento del tráfico aéreo hasta llegar al pronosticado 40% o 14 millones de pasajeros. Así parece razonable reducir un 21% la previsión más factible de Eurocontrol. Supone casi dos millones y medio de pasajeros menos.

Teniendo en cuenta que el tráfico aéreo en abril de 2020 cayó en un 89% y que Eurocontrol prevé que a principios del 2021 esté en el 15% negativo, el escenario post COVID-19 planteado parece demasiado optimista pero lo es porque se supone una

rápida recuperación económica global que afectaría de forma positiva al tráfico aéreo. Si la crisis económica global se extendiera, la recuperación del tráfico aéreo también se retrasaría, más allá del año 2023.

8.2 Zonas que se van a restringir.

¿Qué zonas serán las restringidas?

Zonas por región del planeta.

Se pueden consultar en el Anexo I las regiones definidas por ICAO y sus emisiones de CO₂ asociadas a los vuelos de pasajeros. Se puede decir que los trayectos de corto recorrido emiten más cantidad de CO₂ en comparación con los de largo recorrido.

El 25% (186 MMT) de las emisiones se relacionan con la región de Asia/Pacífico. Se trata de vuelos internos en esa región. Le sigue la región de Norte América con el 18% que supone 136 MMT de CO₂. La región europea que es la que nos ocupa, contribuye con el 14% del total de emisiones de CO₂, 103 MMT. Por debajo se sitúan los vuelos de largo recorrido entre Europa, Norte América y Asia Pacífico.

Viendo estos datos, la región Europea es de las tres zonas que más cantidad de CO₂ emiten a la atmósfera. Aplicar las restricciones que se van a proponer va a tener un efecto significativo a nivel europeo pero también a nivel mundial porque se aplican a la tercera región que más contamina. Si lo miramos a nivel mundial, la cantidad de emisiones de CO₂ por región podría ser una buena manera de diferenciar en qué zonas es interesante aplicar restricciones. Por ejemplo los vuelos internos en la región africana sólo suponen el 1,2% de las emisiones globales de CO₂ provenientes de la actividad aérea.

Se hace necesario analizar estos datos más en profundidad. No solo hay que tener en cuenta la cantidad de CO₂ emitida sino también los pasajeros transportados y la distancia. Se ve una relación directa entre cantidad de emisiones, pasajeros y distancia recorrida. Las regiones en las que los pasajeros hacen más kilómetros, lógicamente presentan mayores emisiones. Pero no siempre es así. Si definimos un factor que llamaremos intensidad de carbono, que resulta de la división de los gramos de CO₂ emitidos entre la distancia recorrida por los pasajeros tenemos que las tres regiones que más cantidad de CO₂ emiten presentan emisiones de 89,3 g de CO₂ por RPK. Esta cantidad no es la más elevada de las regiones. La cantidad más elevada la presenta la región africana que tiene 119 g de CO₂ por RPK. Esto tiene una explicación clara, si la flota que se utiliza es anticuada, se emite más cantidad de CO₂ por kilómetro recorrido por pasajero. Por este motivo se deberá actualizar la flota y hacer mejoras tecnológicas.

Para la restricción del tráfico en ciertas zonas, se presenta el dato de cantidad de CO₂ emitida porque se prevé que sea el elemento de medida según el cual se impongan las restricciones en las regiones o espacios aéreos. Si una región es más avanzada tecnológica y económicamente y tiene una flota moderna y poco contaminante, puede

transportar a más pasajeros emitiendo menos. En la Unión Europea, España, Alemania y Francia son los países que más emisiones tienen. Además los tres están entre los diez más contaminantes relacionados con la aviación emiten del mundo. Estos diez países emiten el 60% de todas las emisiones de CO₂ relacionadas con la aviación, consultar Anexo I. Por ello, una política de restricciones a nivel europeo tendría un significativo efecto mundial.

Se prevé que estas regiones delimitadas por ICAO sean las utilizadas para definir en ellas las zonas restringidas. Como cada país tiene soberanía sobre su espacio aéreo, será éste el que imponga las restricciones que le sean impuestas o recomendadas por estar en su región.

Zonas restringidas por estar muy contaminadas.

La asignación de niveles de contaminación a cierta región o país es una tarea compleja. Una manera de hacer una estimación de las emisiones es contabilizar las emisiones en las salidas de las aeronaves, así los gases contaminantes no se contabilizan en el país de llegada sino en el de origen, creando un balance a nivel global. Otras formas como estimar el combustible consumido han llevado a inexactitudes. La observación espacial aporta datos cada vez más exactos, como por ejemplo, con los satélites europeos Sentinel en el programa Copérnicus de la ESA.

A nivel europeo, anteriormente se ha visto que la mayor densidad de la actividad aérea se encuentra en zonas de gran contaminación atmosférica. Estas zonas son el centro-noroeste de Europa, zonas de los Países Bajos, Bélgica, norte de Francia, oeste y centro de Alemania y parte del norte de Italia. Además de algunas zonas de Suiza, la República Checa y Polonia. Aparecen también zonas dispersas como las ciudades de Estambul, Madrid, Londres o Moscú.

Dado que la información obtenida no diferencia entre contaminación proveniente de la aviación o de cualquier otra actividad, de todas estas zonas, se ha buscado dónde se produce el mayor tráfico aéreo con la ayuda de los datos de densidad de vuelos. También se han tenido en consideración ciudades que tienen altos niveles de mortalidad por contaminación relacionada con la actividad aérea según estudios anteriormente vistos.

Teniendo todo esto en cuenta, se propone aplicar restricciones a las zonas del centro-oeste europeo. Concretamente a espacios aéreos cercanos a las ciudades de Turín, Múnich, Stuttgart, Luxemburgo, Bruselas, Rotterdam, París y Londres. Además algunas de las mencionadas ciudades presentan índices de mortandad relacionada con emisiones del transporte muy altas, como Stuttgart, Londres o Turín.

Nótese que aunque algunas zonas que presentan significativa cantidad de contaminantes como las cercanías de Moscú, Estambul o el oeste de Polonia, no se han recomendado como zonas de aplicación de restricciones a la navegación aérea. Esto tiene varios motivos, el principal es que su densidad de operaciones aéreas es

puntual y centrada en la capital. El segundo es que sirven de vías de entrada a Europa y supondría un hándicap aplicar restricciones en esas zonas. Hay otros motivos como la dudosa relación entre la actividad aérea y los niveles de polución. Un ejemplo es Polonia con su importante industria del carbón y relativo poco tráfico aéreo.

A nivel global, no contribuir al deterioro del ozono es una prioridad. El hemisferio norte es el que más efectos derivados del deterioro del ozono tiene. Es también en él donde se produce la mayor cantidad de emisiones y donde mayor cantidad de tráfico aéreo hay. Sin embargo es el hemisferio sur el que tiene el mayor agujero en la capa de ozono el cual es alimentado por corrientes frías inexistentes en el Polo Norte.

Los patrones de circulación atmosférica son muy difíciles de predecir y se trata de un ambiente cambiante. Aún así es necesario estudiarlo para poder adaptar el tráfico aéreo a estos ambientes cambiantes y minimizar su influencia en ellos.

Las zonas del planeta que mayor concentración de NOx tienen son, según las regiones de ICAO, la región Europea, la región del Asia/Pacífico, la región de Norte América y la africana.

Zonas restringidas por el tipo de vuelos.

Nacional e internacional.

En 2019, a nivel mundial, dos tercios de los vuelos fueron vuelos nacionales. Eso supuso un 40% de las emisiones de CO2 asociadas a los pasajeros en vuelos.

Para poder simplificar el escenario, la propuesta es a nivel europeo pero es necesaria su aplicación a nivel mundial porque los países cuya actividad aérea genera más emisiones son: Estados Unidos, Japón, Alemania y Reino Unido. Desgraciadamente sólo uno pertenece a la UE.

Las restricciones aplicadas a nivel nacional deben atender a la casuística concreta del territorio pero deben delimitarse espacios aéreos a nivel mundial centrándose en los países más desarrollados porque emiten el 90% de las emisiones provenientes de la actividad aérea. Esto requiere acuerdos políticos entre naciones difíciles de lograr. Muestra de ello son los intentos fallidos de lograr que los países más contaminantes firmen los acuerdos de reducción de emisiones.

Corto, medio y largo recorrido.

Los vuelos regionales son los que mayor cantidad de CO2 emiten, es por eso que las restricciones a nivel europeo se apliquen a vuelos regionales.

Las emisiones se reparten de forma uniforme entre los recorridos de medio y largo recorrido pero los vuelos regionales de menos de 500 km de distancia se perfilan como los que más emiten, 160 g de CO2 por RPK frente a la media de 85 g de CO2 por RPK del resto de vuelos. Los RPKs (revenue passenger kilometers) representan los kilómetros viajados por pasajero.

Las restricciones deben ser aplicadas, en primer lugar, en vuelos de corto radio porque la intensidad de emisión de carbono es muy superior, casi el doble, en vuelos de

menos de 500 km que en vuelos de mayor distancia. Esto es debido sobre todo a que las operaciones de despegue y aterrizaje son las que más emiten y al tener un tiempo de vuelo en crucero reducido, no se compensa esta emisión con la distancia recorrida. Además los aviones regionales suelen ser aviones con sistemas propulsivos más contaminantes como los turbohélices y la flota no es tan renovada.

En distancias de entre 500 y 2500 km, la cantidad de emisiones de CO₂ es la más grande de todas las distancias estudiadas. Esto es debido al mayor volumen de tráfico y distancias totales recorridas además de la influencia de los despegues y aterrizajes. Esto se puede consultar en la tabla del Anexo I.

Se recomienda aplicar las restricciones en vuelos de hasta 2500 km de distancia. Esta distancia es óptima para su aplicación en vuelos de la Unión Europea. Esta distancia podría verse reducida a los 1000 km para ajustar más el radio y poder dar opciones de transporte alternativo.

Zonas restringidas a tipos de aeronaves y tipo de operación.

También es posible restringir zonas por tipo de aeronave y sus emisiones. No sólo atendiendo a la antigüedad sino al tipo de aeronave y el tipo de operación aérea.

El 84% de los movimientos aéreos son de operaciones de transporte de pasajeros mientras que el 16% son de mercancía u otro tipo de operaciones.

Atendiendo a las emisiones por tipos de aeronaves de pasajeros, tenemos que las aeronaves de fuselaje estrecho durante 2018 se estima que supusieron el 53% de las emisiones de CO₂ provenientes de la aviación. En segundo lugar con un 41% aproximadamente, están las aeronaves de pasajeros de fuselaje ancho. Los aviones de pasajeros regionales, de pequeño tamaño, solo supusieron el 6%. Sin embargo la intensidad del carbono de las emisiones en los vuelos regionales fue de 156 gramos de CO₂ por pasajero y kilómetro. De media se emitieron 88 gramos de CO₂ por pasajero y kilómetro. Por tanto se puede ver el importante impacto de los vuelos regionales y de corto recorrido.

8.3 Escenarios.

A continuación se van a presentar dos escenarios y un tercero planteado como contingente o complementario. Se expondrán los cambios que se esperan y en qué fecha y forma.

En el primero se plantea la prohibición al tráfico aéreo de zonas muy contaminadas, el segundo propone restricciones a aplicar al espacio aéreo europeo en función de los niveles de contaminación y el último presenta un escenario en el que prima el mercado de emisiones como medida estrella y condicionante del futuro de la gestión aeronáutica.

8.3.1 Reducción o prohibición de sobrevuelos sobre ciertos espacios aéreos con el fin de no contaminarlos.

Presentación del escenario y de la idea.

Tal como se ha visto anteriormente, las emisiones de CO2 han aumentado más que el tráfico aéreo. Hasta 2035 los avances tecnológicos que se esperan no podrán reducir de forma notable las emisiones pero las exigencias de reducción de emisiones seguirán aumentando. Especialmente por parte de la Unión Europea como ha quedado reflejado en el Pacto Verde Europeo.

Se plantea el escenario de que, ante la imposibilidad de cumplir con los objetivos de reducción de emisiones, se prohíban algunos espacios aéreos en la Unión Europea. Esto se hará con el fin de reducir las emisiones en aquellas zonas cuya contaminación es importante debido al tráfico aéreo.

Hoy en día existen restricciones de este tipo a causa de la contaminación acústica, sobre todo en aéreas pobladas y por motivos medioambientales en reservas naturales. Pero en este escenario se trata de exponer unas restricciones de carácter prohibitivo de grandes zonas de espacio aéreo europeo con la única intención de reducir emisiones de gases y partículas en las mismas.

La aplicación será para la UE aunque sería deseable su aplicación a nivel global. Las decisiones deberán estar consensuadas por los estados miembros aunque viendo la dirección que están tomando las medidas medioambientales europeas el escenario presentado parece muy probable y además de posible carácter obligatorio a largo plazo, más allá del 2035. Se trata de crear una nueva configuración de la red de aerovías actual.

Estas restricciones serán de carácter variado y los estados miembros serán los que delimiten estas zonas de su territorio soberano además el espacio aéreo controlado por ellos.

Cuando se habla de la variedad de las restricciones, se hace referencia a que algunos espacios aéreos podrían verse prohibidos al tráfico como pueden ser zonas donde hay agujeros en la capa de ozono. Pueden darse desvíos de tráfico de ciertas zonas muy concurridas y contaminadas.

El espacio aéreo español se divide en inferior (hasta FL245) y superior (a partir de FL245). El espacio aéreo controlado es aquel que tiene zonas definidas y clasificadas y en él se da servicio de control de tráfico aéreo. El espacio aéreo según OACI está clasificado en siete partes. En este escenario nos centraremos en los espacios aéreos que serán limitados para el tráfico por contaminación medioambiental, que se delimitarán más adelante.

En España se reconocen cuatro tipos de espacios aéreos limitados. Los denominados como prohibidos, son aquellos que sólo se pueden sobrevolar con autorización expresa del Ministerio de Defensa. Espacios peligrosos como pueden ser zonas de prácticas militares. El espacio restringido por causas como ecosistemas y zonas con fauna sensible. En el artículo 19 del capítulo IV del BOE-A-2018-15406 punto dos, apartado A, se prohíbe el sobrevuelo de ciertas zonas con la intención conservar el espacio natural y su fauna teniendo en cuenta la inmersión sonora y la contaminación de las aeronaves. También existen los espacios TSA, que podrían utilizarse si se quisiera permitir o prohibir zonas en función del estado puntual de los niveles de contaminación pero esta idea se descarta, a corto plazo, por la complejidad de llevarla

a cabo de forma segura. Podrían darse potenciales confusiones que podría suponer riesgo para el tráfico aéreo. A largo plazo, con el avance de la tecnología, si podría crearse estas áreas temporalmente prohibidas al tráfico.

Esta es la legislación que más se acerca al escenario que se plantea en este apartado. Si bien en el anteriormente mencionado artículo 19 se contempla la restricción del espacio aéreo por la contaminación de las aeronaves, el enfoque es hacia la protección de la flora y fauna de espacios de interés natural. No se orienta claramente hacia la protección del ser humano ni especifica que tengan que ser espacios sobre zonas naturalmente protegidas. Por ello se entiende que esta legislación es aplicable a nuestro caso.

No es necesaria una nueva legislación al respecto, sería suficiente con concretar en este artículo que la restricción puede hacerse con carácter general de protección del medioambiente y la salud pública en el espacio aéreo sobre zonas especiales.

Tal como establece el artículo 22 del BOE del 10 de noviembre de 2018, la competencia para delimitar estos espacios aéreos restringidos se establecerán por Acuerdo de Consejo de Ministros previo informe de CIDEFO y bajo propuesta del Ministerio de Defensa y Fomento (actual Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana).

Estos espacios aéreos se publicarían en la Documentación Integrada de Información Aeronáutica (IAIP). Se puede consultar más legislación en el Anexo V.

Los futuros espacios aéreos delimitados podrían identificarse en los mapas aeronáuticos como espacios LER, lo que corresponde a los actuales espacios restringidos. Solo podrían sobrevolarlo aeronaves de estado y civiles en caso de emergencia.

Antes de proponer la delimitación de ciertos espacios aéreos y prohibir el tráfico en ellos, surge la pregunta, ¿los gases que emiten los aviones se quedan en el mismo lugar donde ha pasado el avión o se dispersan en toda la atmósfera? Si los gases se quedan en la trayectoria del avión tendrían sentido las prohibiciones, si se dispersan, crear zonas delimitadas no tendría sentido.

La respuesta es sí, las emisiones se quedan en la huella del avión, pero solo parte de ellas.

Si el elemento emitido se degrada lentamente tiene más tiempo para dispersarse por la atmósfera. Dependiendo de la naturaleza de la emisión puede tardar en desaparecer cientos de años en el caso del CO₂, décadas en el caso de CH₄, meses en el caso del O₃ y el H₂O, horas en el caso del vapor de agua y minutos en el caso del hollín.

El CO₂ o el CH₄ emitido en la estela del avión se acaban dispersando por toda la atmósfera. El CH₄ tiene una vida de unos diez años más prolongada que el ozono. El CO₂ tiene una larga duración en la atmósfera, unos 100 años aproximadamente, y en ese tiempo se dispersa por toda ella, en todas las alturas sobretodo en latitudes septentrionales medias. Pero es evidente que antes de esa dispersión la concentración de CO₂ en la estela del avión es considerable.

Otras emisiones sin embargo permanecen en la estela del avión y se van acumulando en esos lugares. Estas emisiones son NO_x, SO_x, el ozono, el vapor de agua (estelas

de condensación), partículas y la contaminación acústica aumentando así la conocida fuerza radiante o forzamiento radiativo. Los efectos del ozono se notan más en el hemisferio norte pero los efectos del metano son apreciables en ambos hemisferios debido a su propagación.

Aunque las partículas más pesadas son las que menos permanecen en la atmósfera, en los motores se busca reducir la producción de inquemados que crean hollín porque este absorbe radiación ultravioleta y favorece la creación de acumulaciones nubosas con cristales de hielo.

Siguiendo con este análisis, la respuesta a la pregunta ¿Afectan igual los gases dependiendo de la altura de emisión? Nos ayudará a concretar medidas de prohibición de volar a ciertas alturas y poder crear nuevas rutas actualizadas que sean más respetuosas con el medio ambiente.

Los efectos del CO₂ no se ven potenciados o mitigados en función de área geográfica en la que son emitidos o la altura. Pero hay otros gases emitidos por las aeronaves cuyo lugar de emisión hace que sean más nocivos.

El ozono es un gas de efecto invernadero. Las aeronaves subsónicas, que son las civiles que nos ocupan, vuelan en la troposfera superior y en la estratósfera inferior, a altitudes que varían entre 9 y 13 km. El NO_x expulsado en estas alturas, incluso hasta los 20 km, aumenta la cantidad de ozono.

A altitudes más elevadas, el aumento de NO_x da lugar a la disminución del ozono en la capa estratosférica. La permanencia de los precursores del ozono en estas regiones aumenta con la altitud y de ahí que las perturbaciones del ozono provocadas por las aeronaves dependan de la altitud de la inyección de NO_x y varíen de regionales en la troposfera a globales en la estratósfera.

El vapor de agua y el SO_x también afectan a la química del ozono.

En cuanto a la emisión geográfica, el NO_x tiene más impacto en el ecuador que en los polos según el profesor Shine de la Reading University de Reino Unido.

En conclusión, si hay algunos efectos medioambientales significativos en función de la altura de emisión de los gases.

Ahora surge la inevitable pregunta de ¿cuáles son las zonas donde más contaminación hay? Aunque se presenten algunos datos a nivel mundial hay que tener en cuenta que los escenarios de este trabajo son a nivel europeo y es lo que se analizará. Aunque la contaminación se concentra en ciertas regiones hay que señalar que ésta es muy dinámica. Este dinamismo se debe a diversos factores como corrientes de aire globales, cambios en temperaturas, cambios de presiones, etc.

Se ha estudiado anteriormente la concentración de emisiones. Se ha visto que la mayor cantidad de tráfico aéreo se encuentra en el hemisferio norte y el polo, es ahí donde más efectos derivados de las altas concentraciones de contaminación hay.

En cuanto a la contaminación regional se ha visto que la zona noroeste de Europa es la más contaminada. Además coincide con la zona que mayor densidad de tráfico

presenta. Pero a nivel local, no se ha podido establecer una relación entre los datos de gases obtenidos y el número de operaciones aéreas. Estos datos serán utilizados para concretar zonas en las que se deberá aplicar restricciones o tomar medidas.

Situaciones actuales parecidas al escenario.

En la actualidad no hay prohibiciones de tránsito en zonas debido exclusivamente a las emisiones contaminantes. Si hay zonas prohibidas al tráfico por otros motivos como pueden ser motivos militares. También hay zonas restringidas por las emisiones sonoras. Estas zonas suelen estar en zonas urbanas.

No se ha encontrado un estudio enfocado a los escenarios mostrados en este texto. "The world-wide scientific network for aviation research and policy in the Netherlands" (Airmeth) de Rogier Lieshout es una publicación procedente de un seminario de enero de 2020 en el que se apunta en la misma dirección que el presente texto sin entrar en detalles. En el seminario, Prof. Dr. Volker Grewe de la Universidad TU Delft, muestra como medida de mitigación del impacto de las emisiones, que es posible evitar algunas regiones especialmente sensibles a la contaminación utilizando el argumento de que el impacto de la contaminación depende, entre otros motivos, del lugar en el que se emita. En el seminario se defiende evitar contaminar las zonas especialmente sensibles. Evitar estas regiones supondría mayores beneficios medioambientales frente al pequeño coste económico en el que se incurriría.

En resumen, no se han encontrado acciones concretas encaminadas a la prohibición de circulación en ciertos espacios con la intención de reducir el impacto ambiental. Precisamente esto es lo que se propone en este escenario.

¿Qué zonas serán las prohibidas?

Según se ha visto anteriormente en el apartado de zonas a restringir, las tres regiones definidas por ICAO más contaminadas son: Asia/Pacífico, Norte América y Europa. Las prohibiciones de espacios aéreos se esperan precisamente en estas tres zonas. Especialmente en zonas de Asia/Pacífico cuya cantidad de tráfico aéreo de corto recorrido sea muy elevada.

Centrándonos a nivel europeo, en la región europea es deseable que estas prohibiciones se produzcan en zonas del noroeste europeo. En los espacio aéreos de Bélgica. Más adelante se estudiará la viabilidad de esta propuesta.

Las zonas muy contaminadas de Europa coinciden con la mayor densidad de tráfico aéreo, como se ha visto antes. Para que haya un efecto de reducción de la intensidad de emisiones en esas zonas, éstas deberán ser de un tamaño considerable pero por la casuística de la disposición geográfica de la UE no es posible prohibir grandes espacios aéreos. Además hacer esto, complicaría en gran medida el ya congestionado tráfico aéreo.

Por tanto, no se recomienda ni se prevé que se vayan a prohibir zonas europeas al tráfico aéreo con la intención de reducir emisiones en ellas. Sin embargo a nivel

mundial este tipo de prohibiciones en zonas muy contaminadas o especialmente sensibles, si se prevé.

Se recomienda prohibir las actividades aéreas en el Polo norte por los efectos especialmente nocivos que los gases procedentes de la aviación tienen en él como el vapor de agua o el efecto sobre el ozono. El efecto de la presencia del vapor de agua en el polo norte es mayor que en el ecuador debido a que la estratosfera en el polo norte se encuentra a tan solo 8000 metros. Por tanto es aconsejable prohibir las actividades aéreas en el polo norte o no permitir vuelos a más de 8000 metros.

Hoy en día son muchas las aerolíneas que operan rutas que pasan por el Polo norte. Las conexiones entre Asia y América del Norte son las que más rutas tienen en el Polo norte. Son menos las aerolíneas que tienen rutas que pasan por el Polo sur en rutas como entre América del sur y Asia.

Metodología, condiciones y calendario de implantación.

La prohibición de volar en una zona concreta por motivos medioambientales parece un escenario que podría darse a largo plazo. Este es un escenario extremo y por eso, se daría en situaciones de contaminación extremas.

No se prevé que antes del año 2035 se produzcan situaciones de contaminación tan extremas que obliguen a prohibir el tráfico aéreo. A excepción del Polo norte.

La prohibición de transitar en una zona concreta la impondría cada país puesto que es soberano sobre su espacio aéreo. Aunque en ciertas zonas como el Polo norte, que pertenece a varios países, se deberá llegar a un consenso entre ellos con la ayuda de un mediador como podría ser OACI.

Si se trata de prohibiciones de zonas en espacios aéreos regionales, como por ejemplo en España, las competencias para delimitar los espacios aéreos restringidos se establecerán por Acuerdo de Consejo de Ministros previo informe de CIDEFO y bajo propuesta del Ministerio de Defensa y Fomento (actual Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana). Tal como figura en el BOE visto con anterioridad. Estos espacios aéreos se publicarían en la Documentación Integrada de Información Aeronáutica (IAIP).

En España no se pueden diferenciar zonas especialmente contaminadas a excepción de las grandes urbes. No es posible prohibir el tráfico aéreo en esas zonas por motivos obvios.

A nivel europeo sí se han visto zonas con grandes concentraciones de contaminación y densidad de tráfico aéreo. Estas zonas se han expuesto con anterioridad. Tampoco se plantean prohibiciones a nivel europeo debido a que el espacio aéreo europeo está ya congestionado en la zona noroeste de Europa y crear zonas que habría que bordear sólo desviaría el tráfico a zonas permitidas aumentando la concentración de la contaminación en ellas. Esto es precisamente lo que se busca evitar.

Por tanto a nivel regional o europeo es difícil que existan estas zonas. Si se pueden prohibir vuelos de corto recorrido que emitan mucho en la zona noroeste europea pero

se trata de una zona muy pequeña y concurrida. Sin embargo en regiones de América y Asia esto sí sería más viable por la extensión de sus espacios aéreos.

Aunque los vuelos de corto recorrido son los que mayor incidencia en la emisión de gases tienen, no tiene sentido desviarlos y aumentar el consumo y las emisiones.

No ocurre lo mismo con los vuelos de largo recorrido.

En cuanto a prohibiciones permanentes de zonas a nivel global, aunque sean más difíciles de consensuar, parecen éstas las que más futuro tienen. Estas zonas afectarían a vuelos de medio y largo recorrido en niveles de vuelo superiores.

En un primer momento se pueden prohibir zonas con carácter permanente, como el Polo norte o el Polo sur. Estas prohibiciones se aplicarán a todas las aeronaves de todas las nacionalidades. Habría excepciones para casos de emergencia o transporte de personas o mercancías a esas zonas, pero no se permitirán vuelos de tránsito. Además los vuelos regionales de esa zona no pueden quedar suspendidos.

La única zona que parece probable que se prohíba a corto plazo es el Polo norte por estar en una situación de contaminación vulnerable, como se ha visto antes.

Afectaría sólo a vuelos de largo recorrido. Las rutas de estos vuelos se pueden desviar lo que supondría un aumento del uso de combustible y un aumento de costes pero supondría una reducción en el impacto medioambiental. La prohibición de volar en el Polo norte podría darse antes del 2035.

A largo plazo, en zonas cuya contaminación aumenta de forma repentina y descontrolada y que ese aumento suponga un riesgo para la salud de las personas, es posible prohibir la zona afectada de forma temporal hasta que se normalicen los niveles de contaminación. Para ello, las zonas contaminadas, se pueden considerar zonas TSA.

Es cierto que estas prohibiciones temporales podrían complicar la gestión del tráfico aéreo. Este tipo de prohibiciones son impensables hoy en día pero a largo plazo, cuando la tecnología lo permita, sí pueden ser una realidad.

Es más probable que este escenario de prohibición temporal de zonas se dé antes a nivel regional que nivel global porque se necesita de un sistema de gestión, compartición y utilización de la información aeronáutica a tiempo real que será posible con los avances tecnológicos en ciertos países, a nivel europeo con el Cielo Único Europeo. Sin embargo conseguir esto a nivel global parece bastante más lejano en el tiempo que el horizonte 2035 propuesto en este trabajo.

No se prevé que se prohíban grandes zonas regionales o globales debido a las emisiones sonoras. Los motores son cada vez más silenciosos y tienen potencial para serlo aun más en los próximos 15 años. Debido que en la actualidad ya existen normativas y zonas en las que se prohíben los sobrevuelos por contaminación sonora, no se prevén más prohibiciones de este tipo puesto que carecen de sentido especialmente en fases del vuelo en las que se vuela a una altura considerable.

Estudio de viabilidad y sostenibilidad (pros y contras).

Tal como establece la normativa del Convenio de Aviación Civil, las zonas del espacio aéreo con especial delimitación deberán ser debidamente notificadas y adecuadamente dispuestas. No se debe entorpecer el tráfico aéreo. Precisamente éste es uno de los mayores problemas.

Hay propuestas que están ya en activo en el tráfico de automóviles en algunas grandes ciudades. Existen zonas prohibidas al tráfico y han demostrado ser una forma viable y sostenible de reducir la emisión concentrada de gases. Por tanto que se dé una situación similar en el tráfico aéreo es bastante probable.

A continuación se van a presentar algunas de las ventajas más significativas de este escenario.

En primer lugar se reduce la contaminación en las zonas prohibidas. Permitiendo que se controlen los niveles de gases nocivos para evitar que su alta concentración afecte a la calidad del aire y en consecuencia a las personas de esa zona. Se mitigarán los efectos que se puedan crear en la atmosfera por la mezcla de gases. No solo se reducirán las emisiones de gases en esas zonas sino también emisiones sonoras. Además esta medida tan drástica puede servir como incentivo para promover la reducción de las emisiones de los aviones.

Entre las desventajas se puede ver que al no reducir el tráfico sino desviarlo haciéndolo pasar por otras zonas, éstas últimas se verán más contaminadas de lo normal y se podría trasladar el problema de una zona a otra.

Otro problema muy serio podría ser que se podría complicar la gestión del tráfico aéreo al crear estas zonas. Su aplicabilidad en ciertas zonas es limitada, por ejemplo, no se puede prohibir el tráfico aéreo donde sea necesario para la actividad de un aeropuerto. Además estas prohibiciones podrían producir retrasos en los vuelos y crear descontento entre los pasajeros, lo que podría reducir la demanda. Además aplicar prohibiciones de carácter temporal en ciertas zonas en función de los niveles de contaminación o las condiciones atmosféricas (para no crear estelas) requiere de un sistema de gestión del tráfico muy avanzada que actualmente se encuentra lejos. Hay avances en ese sentido como se ha visto con el A-CDM y otras iniciativas pero no se espera que sea posible su plena implementación para antes del año 2035.

En este escenario no se prevé la reducción de la cantidad de vuelos y lograr los objetivos de reducción de emisiones sólo con los avances tecnológicos, si el tráfico sigue en aumento, se prevé poco alcanzable. Otra desventaja que se puede ver en este escenario radica en que si bien es cierto que se ha estudiado en este trabajo que la dispersión de algunos gases no se produce y se concentra en las estelas y por tanto en zonas de mucha densidad de tráfico, estos gases tienen corta vida. La dispersión de los gases que tienen una vida larga no sigue siempre el mismo patrón por lo que las zonas pueden variar.

El impacto económico de este escenario se prevé importante. Supondría alargar algunas rutas, al tener que bordear algunos espacios prohibidos, y eso implicaría mayores consumos a las aerolíneas. Podría implicar retrasos y aumento de la duración de los vuelos. Eso podría provocar descontento entre los viajeros y las pérdidas que resultan difíciles de cuantificar, aunque serán importantes. Es cierto que no se requiere de inversiones en tecnología porque el fundamento es simple, sencillamente no permitir pasar por ciertas zonas.

Con todo, prohibir al tráfico aéreo en zonas de forma permanente es viable porque se haría de forma similar a zonas que están restringidas hoy en día pero por otros motivos, como pueden ser militares. No es sostenible porque no reduce las emisiones y creará dificultades a la gestión del tráfico aéreo que podría traducirse en aumentos de coste.

Prohibir al tráfico aéreo en zonas de forma temporal no es viable porque se necesita de significativos avances tecnológicos en la navegación aérea. Se trataría de una medida sostenible siempre y cuando se garantice que los desvíos no son tan grandes como para producir mayor cantidad de emisiones y cumpla el objetivo de reducir la concentración de emisiones en la zona delimitada sin perjuicio de la adyacente.

Las prohibiciones de sobrevolar zonas para reducir los niveles de ruido han demostrado su viabilidad y sostenibilidad. Pero extenderlas a zonas globales con vuelos de largo recorrido y en fases de vuelo en las que la altura es considerable, parece carecer de sentido.

Breve comentario final.

Si las condiciones ambientales no mejoran y se producen crisis de contaminación en algunas áreas lo deseable sería prohibir ciertas zonas al tráfico aéreo de forma temporal en función de los niveles de contaminación y las condiciones atmosféricas pero ante la complejidad que conlleva, queda propuesto a largo plazo. Se expone y propone a corto plazo la prohibición de zonas de forma permanente, concretamente en el Polo norte. Serían zonas parecidas a las LER en España. Se propone prohibir la circulación a más de FL8000 m en los espacios aéreos del Polo norte.

8.3.2 Condicionamiento del tráfico aéreo mediante la imposición de restricciones.

Hay que diferenciar de forma clara el escenario anterior de este. El anterior consiste en desviar los vuelos, evitando ciertas zonas muy contaminadas con la intención de reducir la contaminación en las mismas, sin reducir el tráfico. Sin embargo en este punto se plantea el escenario de imponer restricciones en algunas zonas ambientalmente vulnerables lo que podría significar una reducción de tráfico aéreo. Reducir el tráfico no tiene por qué significar transportar a menos pasajeros. Reducir el tipo tráfico puede reducir las emisiones pero no los pasajeros transportados.

Presentación del escenario y de la idea.

Se ha expuesto a lo largo del presente trabajo el crecimiento del tráfico aéreo y por volumen, el crecimiento de sus emisiones. Se ha considerado la actual crisis sanitaria como algo excepcional y aunque innegablemente dejará secuelas, se prevé que a partir del año 2023 vuelva a haber crecimiento del tráfico.

El crecimiento del tráfico aéreo es un indicador del crecimiento económico de una región. Reducir el tráfico aéreo supondría poner una traba importante al desarrollo económico. La industria de la aviación deberá encontrar la manera de reducir las emisiones sin reducir el volumen de tráfico aéreo. La solución podría pasar por crear zonas de en las que el tráfico aéreo esté condicionado de forma que se prime la conservación de la atmósfera frente a la rentabilidad de las operaciones. Sin olvidar que para que exista el tráfico aéreo, éste deberá ser rentable y sostenible.

Se ha evidenciado que los avances tecnológicos en todas las áreas, motores, biocombustibles, materiales, etc. Tardarán un tiempo en dar resultados aplicables a nivel global y que se traduzcan en reducciones muy significativas de emisiones.

Los avances operacionales podrían ser los que den resultados a corto plazo y cuya implantación no solo mejorará la eficiencia sino toda la gestión del tráfico mejorando desde la seguridad a la puntualidad permitiendo incluso aumentar el tráfico aéreo condicionado.

En el escenario anterior se ha planteado prohibir la circulación de tráfico en algunas zonas, lo que podría ser una medida demasiado restrictiva y aunque presenta varias ventajas, sus desventajas son importantes. Por eso se plantea no prohibir esos espacios aéreos sino permitir transitarlos pero con ciertas restricciones. Estas restricciones pueden ser tanto cambios en la configuración del vuelo como cambios de altura, velocidad, etc.

La propuesta quizás más llamativa, por su originalidad, es la de dispersar el tráfico aéreo para evitar la concentración de contaminantes en áreas muy transitadas. También se plantea la imposición de restricciones para conseguir rutas más respetuosas con el medio ambiente. Se trata de buscar las rutas más eficientes ecológicamente hablando optimizando la red de vuelos para conseguir mejorar la eficiencia y reducir las emisiones de CO₂ de puerta a puerta. Según el European Aviation Environmental Report 2019 de la European Environment Agency junto con EASA y Eurocontrol, es posible reducir la emisiones de CO₂ un 5,8% si se operara en rutas ideales. Es imposible conseguir un vuelo 100% eficiente al seguir una ruta ideal debido diversos factores como la meteorología, obligación de mantener distancias de seguridad, evitar áreas peligrosas, congestión, etc. Teniendo en cuenta estas limitaciones el porcentaje previsto alcanzable se rebaja al 2,3% para el 2035. Esto alienta la viabilidad de algunas propuestas mostradas a continuación en este escenario.

Situaciones actuales parecidas al escenario.

En la actualidad no hay restricciones de tránsito en zonas debido exclusivamente a las emisiones contaminantes. Tampoco se han producido variaciones de las rutas en altura o velocidad para reducir la contaminación.

El caso ya comentado del Prof. Dr. Volker Grewe de la Universidad TU Delft “The world-wide scientific network for aviation research and policy in the Netherlands” (Airneth) muestra como medida de mitigación del impacto de las emisiones, que es posible evitar algunas regiones especialmente sensibles a la contaminación utilizando el argumento de que el impacto de la contaminación depende, entre otros motivos, del lugar en el que se emita.

Hay iniciativas que, aunque su objetivo principal no sea la reducción de las emisiones de gases que afectan al cambio climático, sí tienen tal efecto de forma colateral.

Por ejemplo, la iniciativa de crear un FRA (Free Route Airspace) mediante el cual se agiliza el tráfico aéreo en ciertas zonas permitiendo a las aeronaves volar libremente sin tener que seguir las aerovías, podría ser útil para lograr el objetivo de este trabajo. El objetivo principal del FRA es descongestionar el tráfico aéreo y permitir mayor flexibilidad del mismo pero además se consigue reducir emisiones porque permite recortar distancias y consumir menos combustible, tal como ya se ha visto.

Esta búsqueda de un espacio aéreo europeo más eficiente hace ver que son posibles significantes mejoras. El uso de este FRA ha pasado del 8,5% en 2014 al 20% en 2017. En el European Aviation Environmental Report 2019 se dice que desde 2014 se han ahorrado 2,6 millones de toneladas de CO₂ gracias al FRA, esto supone el 0,5% del total de las emisiones de CO₂ procedentes de la aviación según Aviation Environmental Report 2019.

Se han creado FRA que funcionan de noche en conexiones de vuelos entre París, Londres, Ámsterdam y Turquía. Esto ha sido gracias a la célula creada por Alemania, denominada Karlsruhe.

En España, con el afán de encontrar rutas más eficientes, se estudió la posibilidad de hacer posible el tránsito de aeronaves civiles por rutas aéreas militares, con el beneplácito del Ministerio de Defensa, esta medida podría reducir las rutas comerciales en un 10%.

En resumen, no se han encontrado acciones concretas encaminadas a la restricción de circulación en ciertos espacios aéreos o la variación de rutas de forma global con la intención de reducir el impacto ambiental y esto es lo que se propone en este trabajo.

Si se han encontrado proyectos encaminados a mejorar la eficiencia del tráfico y como consecuencia se ha producido una reducción de emisiones pero no se han aplicado restricciones específicamente encaminadas a la reducción de la emisión de gases.

¿Qué zonas serán las restringidas?

Al igual que sucede con las regiones en las que se propone prohibir el tráfico aéreo.

Las regiones que se proponen para aplicar en ellas restricciones son las que mayores cantidades de emisiones relacionadas con la aviación presentan. Las tres más importantes son la de Asia/Pacífico, Norte América y Europa.

Es deseable que se empiecen a aplicar las restricciones en estas regiones porque los beneficios serán mayores y porque estas regiones, especialmente Europa y América del Norte, tienen la tecnología, la legislación y la disposición necesarias para poder aplicarlas en un plazo razonable de tiempo.

Centrándonos a nivel europeo, las restricciones se aplicarán en zonas que tengan una elevada contaminación y densidad de tráfico. Se propone poner atención en los vuelos intraeuropeos puesto que son los responsables de las emisiones de más CO₂ que los vuelos entre Europa y otras regiones del mundo. Se intentará restringir sobre todo aquellos vuelos que sean en el noroeste o que transiten los corredores aéreos hacia Moscú, Estambul y el sur de Europa con ciudades como Madrid.

En el apartado de zonas a restringir se defienden los motivos y las zonas europeas en las que es deseable que se apliquen restricciones. Algunas de estas zonas son Bruselas, Múnich, París, etc. Como también se ha visto, la mortalidad en algunas de ellas es alta.

Con el criterio de la contaminación como elemento importante, se propone diferenciar dos zonas del espacio aéreo europeo.

La zona 1, que es la más contaminada y que presenta una mayor densidad de tráfico aéreo. Se trata de la zona noroeste europea. Marcada en rojo en el mapa.

La zona 2, que presenta niveles más bajos de contaminación y menor densidad de tráfico aéreo. Las zonas 2 serán aquellas zonas que presenten contaminación alta y que tengan un significativo tráfico aéreo. En su mayoría se corresponden con las vías de entrada a la UE.

En la siguiente ilustración se pueden ver de forma esquemática estas zonas.

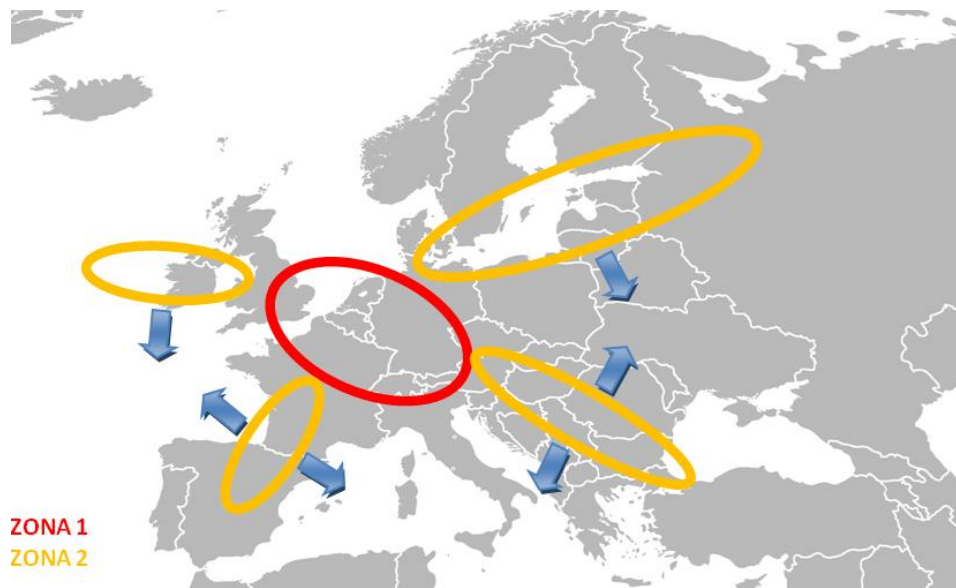


Figura 8.1 Zonas europeas con restricciones.

Fuente: elaboración propia.

Las zonas 2, son zonas que tenderán a expandirse hasta llegar a ocupar todo el espacio europeo. En la imagen se muestran las zonas más críticas, donde primero será necesario tomar medidas.

En la zona 1 es donde más urgencia de aplicación de restricciones hay. En algunas de ellas como el MUIC ya se dan acciones con resultados positivos.

Se pretende que, mediante el SES, se puedan aplicar restricciones a todo el espacio aéreo europeo y que mediante la monitorización de la contaminación se puedan aplicar medidas restrictivas de manera puntual en algunas zonas concretas. Las restricciones de la zona 1 y la zona 2 se adecuarán a la casuística de cada una de ellas. Para conseguir esto serán necesarios avances en muchos ámbitos como la cooperación internacional, los avances tecnológicos, legislativos, etc.

A nivel global podrían crearse zonas restringidas en aquellos lugares como Norte América donde cuentan con programas (NextGen) parecidos a los europeos en materia de mejora de la gestión del tráfico aéreo.

Atendiendo al tipo de vuelo, ante todo, se plantean restricciones a vuelos de corto radio porque la intensidad de emisión de carbono es muy superior, casi el doble, en vuelos de menos de 500 km que en vuelos de mayor distancia.

En algunas zonas, como por ejemplo, las vías de entrada a la UE (zona 2), se plantean restricciones a aeronaves de medio y largo recorrido al permitirles que se dispersen por el espacio y no seguir las tradicionales aerovías.

Habrán zonas restringidas a tipos de aeronaves y tipo de operación. Por ejemplo, en la zona 1, se plantea restringir la operación a aeronaves de fuselaje estrecho puesto que son los que más contribuyen a las emisiones de gases en la UE.

Las restricciones se aplicarían a operaciones de transporte de pasajeros antes que de carga por ser los primeros más numerosos. Más adelante, en el apartado de metodología se concretarán las restricciones que se aplicarán a cada zona.

Metodología, condiciones y calendario de implantación.

Además de las zonas anteriormente mencionadas, se propone dividir el propio vuelo en dos fases bien diferenciadas en función de las fases del vuelo. Se ha tomado esta decisión porque el avión consume y emite diferentes cantidades de combustible y gases dependiendo de la fase de vuelo en la que se encuentra.

La primera fase será aquella en la que se produzca el despegue, aterrizaje, rodaje, aproximación y en general, actividades cercanas al aeropuerto de menos de 1000 metros de altitud.

La segunda fase será aquella que incluye el ascenso, crucero y descenso en definitiva, todas las actividades por encima de los 1000m.

Esta división del espacio en dos zonas dependiendo de la fase se ha elegido para facilitar los cálculos de las emisiones ya que en algunos estudios de monitorización de las emisiones se hace una división similar y facilitaría la realización de los cálculos.

La cantidad de gases emitidos durante un vuelo depende de muchos factores; el tipo de aeronave, los motores que lleva, el tipo combustible que utiliza, la configuración de vuelo, la fase del vuelo, etc. Por lo general, la mayor cantidad de gases por kilómetro y pasajero se emiten en las operaciones de desplazamientos en tierra, despegues, aterrizajes y operaciones en las que se hagan aumentos bruscos de potencia de los motores, como puede ser un viraje rápido inesperado.

Si bien es cierto que las fases mencionadas emiten mayor cantidad de contaminantes por pasajero y kilómetro, la cantidad total de emisiones en esas fases es menor por tratarse de fases cortas. La fase en la que mayor cantidad de CO₂ se emite es la de crucero.

Tal como se ha expuesto anteriormente, se distinguirán en Europa dos tipos de zonas. A continuación se expondrá la metodología y las restricciones propuestas en cada zona de la Unión Europea.

Zona 1.

Esta zona es la que mayor complejidad presenta debido a su densa red de tráfico aéreo. Es en esta zona donde se aplicarán las medidas más restrictivas por ser la que mayores valores de contaminación presenta.

Según el ya mencionado informe sobre emisiones de CO₂ del International Council of Clean Transport de 2019, se emitieron 918 MMT (millón metric tones) a la atmósfera en 2018 como resultado de toda la actividad aérea. Eso supone un 2,4% del CO₂ emitido. Un aumento de entre el 19% (European Commission, RCDE UE) y el 32% (ICCT) respecto a los últimos cinco años, según las fuentes. Estos datos son malos, suponen estar un 70% por encima de lo deseado en propuestas de proyectos liderados por ICAO. Por ello, la única manera de reducir la contaminación para lograr los objetivos es reducir el volumen de tráfico. Se ha visto que los avances tecnológicos serán la solución pero a largo plazo. Si se quiere cumplir objetivos, la reducción de tráfico será necesaria.

La primera restricción propuesta y la más radical es la prohibición del tráfico aéreo de corto recorrido.

Tal como se ha planteado al inicio de este trabajo, si no es posible reducir las emisiones de forma significativa con los avances de la tecnología, los biocombustibles, etc. Será necesario reducir la cantidad de tráfico aéreo.

Tras un largo estudio de la situación actual y futura en muchos ámbitos de la aviación se ha llegado a la conclusión de que el único tráfico aéreo que es susceptible de ser reducido es el tráfico de corto recorrido. Especialmente en la zona noroeste de Europa.

Se ha visto que los vuelos de corto recorrido son los que mayor impacto de emisiones tienen. También se plantea su prohibición porque los vuelos de corto recorrido tienen medios de transporte alternativos que son una competencia importante a todos los niveles, incluido el ambiental.

Esta medida se aplicará en la fase de vuelo 1 y 2, anteriormente expuestas. Se trata de una medida operacional que por su naturaleza restrictiva se podría aplicar a corto plazo y supondría un coste de implantación bajo. Por su carácter prohibitivo no requiere ni de nueva tecnología ni infraestructuras.

En los vuelos de corto recorrido se podrá diferenciar dos grupo, regionales y de corto recorrido propiamente dichos. Los vuelos regionales de hasta 500 km, por su elevada intensidad del índice de carbono. Otro grupo de vuelos de corto recorrido serían aquellos de hasta 1000 km de distancia porque en estas distancias es donde mayor cantidad de emisiones de carbono se emiten, sobre todo por el elevado número de operaciones. Este radio de 1000 km se ajusta muy bien a la zona delimitada como zona 1.

Afectaría preferiblemente a aviones regionales y aviones de fuselaje estrecho por lo expuesto anteriormente y por ser los más numerosos aunque podría extenderse a los de fuselaje ancho.

Para diferenciar entre estos vuelos se priorizará la reducción de vuelos que cubran el mismo trayecto en intervalos de tiempo muy pequeños, vuelos redundantes.

Hablamos de vuelos cuya trayectoria sea la misma y contaminen en la misma zona. Por ejemplo, si salen dos vuelos de tres compañías distintas con el mismo origen y destino sobre la misma hora. Lógicamente debe haber suficiente demanda para llenar los aviones pero es sorprendente ver aviones cuya ocupación no es la óptima que operan rutas por diversos motivos estratégicos.

Se trata de que los vuelos se hagan de forma justificada. Se priorizará la reducción de todo tráfico no justificado. Un claro ejemplo de esta situación planteada es la que se dio con las compañías aéreas que cubrían rutas durante la pandemia del COVID-19 para no perder los privilegios sobre ellas.

Esta situación podría resolverse en parte con el aumento del factor de ocupación. Se ha visto como el factor de ocupación ha ido en aumento los últimos años, especialmente en compañías de bajo coste. Éstas representan un número importante del tráfico de corto y medio recorrido en la UE.

Se propone poner un mínimo de ocupación en vuelos de medio y largo recorrido que transiten en altura la zona 1 o que sean internacionales y entren a la misma. Este mínimo estaría en el 90% de ocupación para vuelos con aviones de fuselaje estrecho y ancho. Se ha visto que la media de ocupación actual está en torno al 82%, por lo que el porcentaje propuesto parece razonable.

Al ser posible no llegar a esos valores de ocupación se propone un sistema de tasas a pagar por la aerolínea si no consigue esa ocupación. Con todo, se fomentaría la reducción de vuelos climáticamente ineficientes.

Esta restricción se aplicaría en las dos fases de vuelo, como es lógico y puede implantarse en un corto plazo con un coste bajo.

La siguiente restricción consiste en imponer los aterrizajes verdes a las aeronaves de la zona 1 que están en fase 1, la que engloba toda operación por debajo de los 1000 metros y el aeropuerto.

Las aeronaves deberán estar equipadas con los sistemas a bordo necesarios para poder realizar las operaciones que permitan este tipo de aterrizajes como por ejemplo el anteriormente mencionado P-RNAV.

Gracias al avance cada vez mayor del A-CDM y a que es un sistema en funcionamiento en la mayoría de aeropuertos de la zona 1, se podrá utilizar para enfocar las medidas propuestas que podrían aplicarse de forma satisfactoria antes del 2035.

Se trata de imponer operaciones de ascenso (CCO) y descenso continuo (CDO) con apoyo de sistemas como el Punto Merge, el Trombón, mejora de las esperas y en general, una mejor predicción de los movimientos de las aeronaves lo que se traduce en reducción de ineficiencias. La imposición del Arrival Management extended to en route Airspace (AMAN) para reducir el consumo en las esperas.

Se deberá invertir en sistemas de medición de los niveles de contaminación como son REDAIR o SIRMA, para poder tener datos fiables de zonas cercanas a los aeropuertos. Estas medidas ya se aplican en algunos aeropuertos de la zona 1 pero deberán aplicarse de forma satisfactoria en todos ellos.

Es cierto que a parte del equipamiento de la aeronave y la posible formación de los pilotos, son los aeropuertos los que deben implantar estos sistemas y operaciones.

El control de la velocidad de las aeronaves permitirá variar la velocidad para adecuar los flujos y mejorar la gestión del espacio aéreo. Mediante programas como XMAN será posible reducir el consumo, las emisiones, reducir retrasos y permitirá tener el tráfico controlado para poder predecir sus movimientos. Tal como se ha visto, este sistema ha sido aplicado con éxito en aeropuertos con gran cantidad de tráfico aéreo, justo en las zonas en las que nos interesa reducir emisiones.

Esta medida es relativamente fácil de aplicar, cuenta con la normativa europea ya emitida y se espera que esté plenamente operativa antes del 2035.

Además de adecuar la velocidad a las circunstancias de vuelo para aumentar la eficiencia hay otras iniciativas que han dado buenos resultados, como se ha visto. Reducir la velocidad de vuelo en trayectos tanto de corto como largo recorrido es una buena opción a nivel europeo pero esta opción no se plantea para la zona 1 porque ante ella es preferible jugar con las velocidades variables para poder dar una mejor respuesta al congestionado tráfico de la zona.

El coste de implantar esta restricción se considera medio porque requiere de cierto equipamiento y avances tecnológicos para permitir la gestión del tráfico por variación de velocidades. El coste no se considera demasiado elevado porque en la actualidad se utiliza la variación de velocidades para la gestión puntual del tráfico, simplemente serían necesarias mejoras de compartición de información a tiempo real y algunos relacionados con los ATC.

Se trata de una medida operacional que se aplicaría sobre todo en la fase 1 aunque por su carácter anticipatorio, también es previsible su aplicación en la fase 2.

Zona 2.

La zona 2 presenta mejores concentraciones de gases contaminantes y menor densidad de tráfico aéreo. En esta zona se aplicarán medidas restrictivas de menor intensidad que en la zona 1. En ambas zonas se trata de seleccionar las medidas restrictivas que mejor se ajustan a la situación de cada zona.

Se han delimitado sólo dos zonas en Europa por la tendencia de unificación del espacio aéreo que existe.

La primera restricción propuesta surge como alternativa a la prohibición de transitar ciertas zonas con la intención de reducir la concentración de emisiones. Permitir a las aeronaves volar por diferentes trayectorias permite la dispersión de los gases contaminantes.

Con esta idea se trata de dispersar el tráfico aéreo y por consiguiente las emisiones, para conseguir que no se produzcan altos niveles de concentración. Estas dispersiones pueden darse en altos niveles de vuelo ofreciendo rutas alternativas o en bajos niveles de vuelo ofreciendo aeropuertos alternativos. EL espacio aéreo dispersado queda descartado en espacios aéreos cercanos a aeropuertos o en algunos espacios terminales, de ahí la necesidad de aeropuertos alternativos.

Con acciones que ya se están llevando a cabo como el FRA se hace posible la dispersión de vuelos. Se plantea hacerlo de forma obligatoria en zonas contaminadas.

Se prevén dos formas de dispersar el tráfico, una obligada y otra voluntaria. La voluntaria surge de la necesidad misma de cada aeronave de adecuar su trayectoria a las condiciones que más le interesen para llevar a cabo su vuelo. De esta manera, al haber diferentes tipos de vuelos, habrá diferentes rutas acordes a cada uno de ellos, permitiendo así la dispersión de las aeronaves en el espacio aéreo según sus necesidades.

Esto no se trata de asignarle a la aeronave la ruta más eficiente, como se planteará más adelante, sino que consiste en dejarles libertad para que se dispersen en el espacio para satisfacer sus necesidades operativas. Se trata de una dispersión natural.

La obligada es aquella en la que las aeronaves se verán forzadas a dispersarse en ciertas zonas debido a la alta concentración de contaminación. De esta manera se evita prohibir un espacio aéreo permitiendo el flujo y no se complica la gestión del espacio. Se consigue el objetivo deseado, el de evitar una gran concentración de emisiones en un mismo lugar.

Una parte de las aeronaves seguirán utilizando las rutas existentes pero otras encontrarán rutas alternativas. Si en algún espacio aéreo por sus características particulares todas las aeronaves tienden a ir por la misma ruta, si no se superan los niveles de emisión de contaminantes, no habría necesidad de obligarlas a dispersarse.

Lo deseable es que se aplique en todo el mundo por los beneficios que conlleva, no solo medioambientales. Pero parece muy improbable su aplicación global, al menos a

medio plazo. Se requiere de avances tecnológicos importantes, avances legislativos, de cooperación en la compartición de información aeronáutica entre países y un largo etc.

Sin embargo a nivel europeo, con los avances de programas como el Cielo Único Europeo esta dispersión del tráfico no sólo es probable que sea una realidad para el año 2035 sino, que ya hay avances como el anteriormente mencionado proyecto de MUAC.

En algunos espacios aéreos es especialmente difícil aplicar esto, como ocurre en el congestionado espacio aéreo de Bélgica. Aquí, hay menos opciones de planes de vuelo disponibles para las aerolíneas y se utilizan rutas fijas de conexión o transición. Las rutas de transición también alimentan las corrientes de llegada y salida del aeropuerto hacia y desde el espacio aéreo inferior, que a veces se extienden más de 100 km. Esta distancia es necesaria debido a las complejas estructuras del espacio aéreo y a los requisitos del sistema o del procedimiento del espacio aéreo inferior.

Otro problema que limita el despliegue más rápido del espacio aéreo de ruta libre es la infraestructura terrestre heredada que se actualizará con la capacidad de procesamiento de datos de vuelo de nueva generación. Los centros en Suiza y Alemania se beneficiarán de las actualizaciones tecnológicas en los próximos dos o tres años y Francia en los próximos cinco.

Viendo la casuística europea, la dispersión de los vuelos es probable que primero se aplique a altos niveles de vuelo, como sucede en MUAC. Aplicar este tipo de espacio a niveles más bajos será una tarea más complicada y tardará más y sería difícilmente alcanzable para el año 2035. En general es una restricción que se aplicará en el mejor de los casos a medio plazo pero debido a sus necesidades tecnológica y de altos costes, es posible que sea una restricción cuya implantación se haga a largo plazo.

La dispersión del tráfico voluntaria se prevé que se aplique en todo el espacio aéreo europeo. Sobre todo para dispersar la contaminación de rutas con mucha densidad de tráfico aéreo. Tal como se ha visto anteriormente, estas rutas con alta densidad de tráfico aéreo son las que unen la congestionada zona noroeste europea con rutas provenientes del este, como Moscú, del sureste, como Estambul y del suroeste como Madrid.

La dispersión del tráfico obligatoria se prevé que se aplique a niveles de vuelo superiores en la zona noroeste, la zona europea más congestionada y contaminada. Aunque en esta zona no será esta, la manera más contundente de reducir emisiones sino la reducción de vuelos y escalas.

La manera de ponerlo en funcionamiento no será de forma inmediata a nivel europeo sino que se prevé que se haga por pequeñas zonas que cada país elegirá y que se irán aumentando de forma progresiva. El objetivo final será tener un espacio de circulación libre y dispersada, en línea con el SES.

La dispersión del tráfico aéreo gracias al FRA es posible, así se ha visto en Maastricht y Karlsruhe.

Otra forma de dispersar el tráfico aéreo y en consecuencia sus emisiones es la utilización de aeropuertos alternativos.

Existe una creciente escasez de capacidad en los principales aeropuertos europeos, especialmente en la zona noroeste europea. Se plantea utilizar aeropuertos alternativos para poder desviar el tráfico y reducir las emisiones en el aeropuerto que tenía como destino inicialmente. Además esta idea puede ayudar a reducir retrasos y podría mejorar la gestión y el flujo de aeronaves cuando los grandes aeropuertos se empiecen a ver desbordados. Esta medida restrictiva de carácter operacional se puede aplicar a corto plazo en aeropuertos de Londres, Frankfurt, Ámsterdam, etc. Con un coste de implantación bajo aunque el impacto económico podría ser notable.

Es interesante señalar que en el SES o en la iniciativa "Free Route Airspace" el objetivo principal de estos programas es mejorar la eficiencia de la gestión y la mejora medioambiental es algo colateral que viene como objetivo secundario o como resultado. Aquí se plantea de forma concreta dispersar el tráfico con la intención de reducir los niveles de contaminación siendo esta dispersión obligatoria en algunas zonas cuya concentración de contaminación pueda suponer un riesgo para la salud humana o los ecosistemas.

Para conseguir todos los beneficios de ahorro ambiental, las aeronaves necesitan acceder a rutas libres a lo largo de toda su trayectoria de vuelo. Al introducir una implementación global y gradual, los ANSP aseguran que el espacio aéreo de ruta libre se implemente sobre la base de un concepto común de operaciones. Los próximos desarrollos demostrarán hasta qué punto esto puede optimizar las operaciones y reducir el impacto ambiental en el espacio aéreo más congestionado de Europa.

Otra medida de restricción que se propone en esta zona 2 es la reducción de la velocidad de las aeronaves. Tal como se ha visto, esta medida se ha aplicado con éxito por parte de algunas compañías aérea estadounidenses. Se plantea hacer obligatoria esta reducción de velocidades en la zona 2 europea.

Es necesario diferenciar entre la propuesta de permitir velocidades variables en la zona 1 y la reducción de velocidades de la zona 2. En el primer caso se pretende agilizar el tráfico y conseguir que sea más eficiente al evitar esperas, atascos, acelerones, etc. Con el ajuste de la velocidad. En la zona 2 no se proponen las velocidades variables porque son más complejas y requieren de sistemas avanzados. En la zona dos se proponen la reducción de la velocidad para reducir las emisiones. Se trata de una medida aplicable a corto plazo y que no conlleva altos costes de implantación. A nivel internacional, además de la reducción de la velocidad en aeronaves subsónicas, se puede plantear a largo o muy largo plazo el aumento de la velocidad con las aeronaves supersónicas y así conseguir aun mejores eficiencias.

Una medida expuesta anteriormente ha sido la dispersión de las aeronaves utilizando el FRA permitiéndoles seguir rutas libremente en ese espacio. Ahora se plantea la idea de aconsejar rutas que sean más eficientes y respetuosas con el medio ambiente. Por ejemplo, permitir utilizar espacios aéreos pero sólo a ciertos niveles de vuelo.

Tras estudiar los efectos de los gases a diferentes alturas de cielo, se propone tener una altura de ruta alternativa, muy próxima a la original, ligeramente desviada por encima o por debajo con la intención de que no se produzcan condensaciones de vapor demasiado grandes que pueden afectar al rendimiento de los aviones por la formación de cristales de hielo y a la atmósfera por crear cirros muy densos. Hoy en día es posible predecir regiones donde se puede dar la saturación de cristales de hielo. La variación de altura sería unos 700 metros más alta o baja que la actual. Los cambios de altura para reducir las estelas, son sostenibles. Suponen una pequeña variación en la configuración del vuelo.

Según lo que se ha visto en el presente documento, se plantea la posibilidad de, alterando la altitud de vuelo y la velocidad permitir reducir las emisiones o controlar el lugar de su dispersión. Esto supondría no utilizar las condiciones óptimas de la ruta de ni de la propia aeronave sino las que son más beneficiosas para el clima. Esto podría reducir un 30% las emisiones y tendría un impacto económico en la compañía de un 5% más. Para no incurrir en costes mayores es recomendable hacer pequeñas variaciones sobre la ruta.

Para conseguir un equilibrio entre reducción de emisiones por cambios en la configuración del vuelo y los costes que eso acarrea será necesario rediseñar algunos modelos de avión adaptándolos a las nuevas configuraciones de vuelo, para que esta alternativa resulte rentable para las compañías aéreas y se pueda llevar a cabo. Es cierto que puede provocar aumentos de emisiones de CO₂ pero la reducción de las estelas y sus efectos sería de hasta el 90%. El aumento de emisiones se debería al aumento del consumo de combustible. Se estima que podría darse un aumento del 5% aunque según el Dr. Stettler del Imperial College de Londres¹¹ sostiene que podría ser del 10%.

La reducción de la altura de vuelo no aumentaría significativamente los niveles de ruido por ser pequeña.

Otra ventaja sería que estos cambios de altura se aplicarían sólo a aeronaves que vuelen en condiciones de humedad y temperatura en las que se pueden producir estelas por condensación.

Primar los vuelos climáticamente óptimos frente a los óptimos en consumo de combustible conduce a una significativa reducción de emisiones y pequeño aumento de costes. Sobre todo en vuelos de largo recorrido.

Los efectos del CO₂ no se ven potenciados o mitigados en función de área geográfica en la que son emitidos o la altura. Pero hay otros gases emitidos por las aeronaves cuyo lugar de emisión hace que sean más nocivos.

Se ha visto que la emisión de NO_x a alturas a las que vuelan los aviones comerciales tiene impacto sobre el ozono.

Se propone evitar volar en la medida de lo posible a bajas alturas (troposfera) en zonas en las que la contaminación regional es importante ya que el NO_x emitido a estas alturas afecta al ozono de forma regional. Es preferible volar a más altura para

¹¹ Fuente: Mitigating the Climate Forcing of Aircraft Contrails by Small-Scale Diversions and Technology Adoption, 2020.

que los efectos en el ozono sean globales, se dispersen más y no afecten tanto a la zona regional contaminada.

En conclusión, si hay efectos medioambientales significativos en función de la altura de emisión de los gases. Pero a parte de variaciones puntuales por la creación de estelas, no se prevén cambios significativos. Se trata de una medida operacional de altos costes de implantación a medio plazo.

Se plantea restringir la zona 2 a los aviones de fuselaje estrecho obligándoles a volar en formación, siempre que esta situación sea posible. Los vuelos en formación han demostrado permitir reducciones de consumo de combustible del 12%-15%.

Al crear el FRA se hace posible permitir que ciertas aeronaves vuelen en formación a altos niveles de vuelo (fase 2). Serán vuelos en formación a los cuales las aeronaves podrán unirse o separarse de acuerdo a sus necesidades.

Esta restricción operacional tendría una complejidad y un elevado coste de implantación no sólo por la tecnología y entrenamiento de los pilotos sino por la necesidad de avances en los sistemas de gestión y alerta en vuelo. Además la aceptación por parte de los pasajeros puede estar en duda.

Ante el escenario de medio o largo plazo de implantación de los vuelos en formación, se presenta la limitación de escalas, medida de implantación posible a muy corto plazo. Para unir ciertos puntos las escalas son necesarias porque no hay vuelos directos pero en algunas ocasiones se realizan escalas por otros motivos. Estos motivos pueden ser porque el pasajero lo ha combinado así por ser más económico, porque ha sido la compañía la que obliga al pasajero a hacer una escala que es evitable, etc. Se plantea legislar para hacer que sólo se realicen escalas que sean estrictamente necesarias. Esto requiere concretar en qué circunstancias una escala sería apropiada y en cuáles no. También se plantea prohibir ciertas escalas porque, como se ha visto anteriormente, el despegue y el las maniobras de aterrizaje son las que mayor incidencia de emisiones tienen.

Elevar el avión a su ruta de crucero es lo más exigente desde el punto de vista energético. Con esta propuesta se busca reducir el despilfarro de combustible al evitar elevar un peso en el aire varias veces antes de llegar a su destino.

También podría fomentarse el uso de otro tipo de transporte para llegar al destino, como puede ser el tren.

Ahora se van a exponer medidas restrictivas que aplican tanto a la zona 1 como a la zona 2. Se trata de los combustibles sostenibles y reducciones de emisiones en tierra.

Se espera que se siga avanzando en la línea que se está haciendo actualmente en cuanto a combustibles sostenibles. Se trataría de utilizar combustibles procedentes de diferentes fuentes, todas ellas respetuosas con el medio ambiente, e ir aumentando los porcentajes de este tipo de combustibles en uso. Estos combustibles no son de origen fósil y no emiten ciertos elementos contaminantes además, durante su producción las emisiones son reducidas. En muchos estudios esta medida se plantea

como la más prometedora a corto plazo aunque presenta algunos problemas, como se ha expuesto.

Los objetivos del uso de los SAF son modestos a corto plazo porque hay muchos obstáculos que superar como el alto precio y los problemas de uso de suelo cultivable que se presentan. No obstante las fuentes son muy diversas.

Se prevé que en un medio plazo se obligue a los vuelos a utilizar ciertos porcentajes de combustible sostenible.

Con los datos obtenidos de IATA se han establecido unos porcentajes predictivos.

Para la zona 1 y vuelos intraeuropeos un 25% de combustibles sostenibles y para vuelos internacionales un 10%.

Para la zona 2 y vuelos intraeuropeos un 10% de combustibles sostenibles y para vuelos internacionales un 8%.

Estos porcentajes son muy altos, para conseguirlos será necesario apoyo estatal a las aerolíneas y a los centros de investigación y producción de este tipo de combustibles.

Al aumentar el precio del combustible y al tener estos porcentajes, se incentivará a hacer los vuelos más eficientes.

Otra solución operacional y tecnológica es la reducción de emisiones en tierra. Esto se puede conseguir a corto plazo con el desarrollo de iniciativas ya existentes como no usar los motores en tierra sino vehículos eléctricos. La inversión para la implantación es baja en comparación con la inversión requerida para conseguir el FRA y el distanciamiento entre aeronaves. Además con el avance y cada vez mayor implantación del A-CDM, se conseguirá una importante reducción de ineficiencias.

Por último las mejoras tecnológicas, no se van a presentar como una restricción sino que serán una herramienta necesaria para conseguir otras restricciones impuestas.

Este es el caso de los avances tecnológicos en materia de navegación aérea necesarios para implantar el SES o los proyectos de SESAR. Otros avances en materia de materiales y reducciones de peso, también son deseables.

Los aviones eléctricos podrían ser una realidad a largo plazo y a medio podrían serlo los aviones híbridos. Así podría proponerse alguna restricción de uso de aviones híbridos en la zona 1.

Los resultados de reducciones de emisiones por tecnología se espera que se den a largo plazo porque la tecnología requerirá de más tiempo.

Estudio de viabilidad y sostenibilidad (pros y contras).

Las restricciones propuestas en este escenario deberán estar consensuadas y se deberán incluir en la legislación.

Se trata de propuestas de restricciones viables. En el apartado anterior se hace especial mención a los medios, el plazo (corto, medio o largo) y los costes de implantación de la medida restrictiva (bajo, medio y alto). Se presentan acciones o proyectos que se han desarrollado en la dirección propuesta y que han tenido resultados satisfactorios, demostrando así su viabilidad.

A continuación se van a exponer algunas ventajas y desventajas de este escenario. La ventaja más importante es que mediante estas restricciones se espera poder dar respuesta a las cada vez mayores exigencias medioambientales. Se logra una alternativa al indeseable escenario de prohibir espacios enteros al tráfico aéreo. La dispersión de los vuelos mediante el FRA consigue dispersar las emisiones evitando su concentración sin reducir el tráfico.

En cuanto al ahorro, comparando con lo visto en SESAR, se estima que con la optimización de rutas y el espacio FRA, se pueden ahorrar hasta 500 kg de CO₂ de media por vuelo. Además se aumentará la capacidad de vuelos y un ahorro económico modesto gracias a la optimización de las rutas de 60 € por vuelo.

En cuanto a las inversiones, por analogía con el programa SESAR, se estima la inversión tecnológica necesaria para llevar a cabo las restricciones propuestas de 11 mil millones de euros en el periodo 2019-2035. La mayor inversión se espera en Entorno de comunicaciones aire-tierra y sistemas de ayuda a la navegación, podrían suponer más de 4 mil millones de euros de inversión. Medio 500 millones de euros a rediseñar el espacio aéreo para poder crear el FRA, unos 300 millones la armonización de programas, 100 millones de costes en entrenamiento y familiarización de los controladores con los nuevos sistemas, etc.

Con la implantación de mejoras tecnológicas del programa SESAR, la mejora de las rutas y la dispersión del tráfico aquí mencionada, se espera una reducción de 24km de media por vuelo. La reducción puede parecer modesta pero conlleva reducciones de emisiones y agilización del espacio.

Se hace complicado dar unas cifras de costes y beneficios porque las restricciones propuestas junto con los programas ya en curso, conllevan costes y beneficios no solo medioambientales sino de capacidad, de reducción de tiempos de vuelo, de aumento de puntualidad, reducción de cancelación de vuelos, etc. Y esto es difícil de cuantificar.

Se conseguirá una buena aceptación pública por la reducción de vuelos injustificados, sus escalas y la prohibición de vuelos de corto recorrido de aviones de fuselaje estrecho. Esta restricción es viable porque existen múltiples alternativas de transporte en distancias inferiores a los 1000 km.

Otra importante ventaja es que la mayoría de estas medidas conllevan van asociadas a mejoras de la gestión del tráfico aéreo, lo que ayudará a dar respuesta a la creciente demanda.

Una cantidad importante de tecnologías y procedimientos ya existen, esto reducirá costes. Un ejemplo son los aterrizajes verdes y el "Free route" sólo se trata de reorientar los esfuerzos hacia la reducción drástica de emisiones dándoles a algunas medidas el carácter de restricciones. Al combinarlas entre ellas, consiguen beneficios importantes. Todas ellas enmarcadas en el horizonte 2035.

Por otro lado, se incluyen en el escenario tendencias actuales prometedoras como es el uso de combustibles sostenibles y se propone una restricción al respecto.

Con todas estas medidas se hace un llamamiento a seguir mejorando en materia de reducción de emisiones.

Contra poniendo ahora las desventajas, se ve que la principal es la necesidad de implantar sistemas de alta tecnología para poder llevar a cabo algunas propuestas como son la dispersión, los vuelos en formación o las rutas eficientes. Las rutas más eficientes suponen una red muy compleja y requieren inversiones importantes.

Algunas restricciones pueden suponer reticencia por parte de los pasajeros, como son, la reducción de escalas, la reducción de la velocidad y el uso de aeropuertos alternativos. El factor de ocupación es otro problema porque es difícil de alcanzar en algunas rutas y sería un handicap en situaciones de pandemias globales. Podría ser necesario hacer modificaciones de diseño de algunas aeronaves para cambiar su configuración de vuelo para adecuarlos a otras velocidades de operación.

Dispersar los vuelos podría ser complicado no sólo a nivel tecnológico sino también legal, político y práctico. Existen muchas zonas militarizadas que entrarían en conflicto con este concepto de espacio aéreo.

Aunque los combustibles sostenibles parecen prometedores, presentan problemas de precios y de rendimiento en su obtención. Conllevan otras formas de contaminación en su origen.

Por si esto no fuera poco, la imposibilidad de diferenciar emisiones procedentes de la actividad aérea de otras industrias, hace difícil reconocer la eficacia de algunas iniciativas.

El conjunto de medidas es sostenible económicamente porque los beneficios de los resultados no serán solo medioambientales sino también ayudarán a la gestión del tráfico aéreo, ayudarán a reducir retrasos, aumentar la seguridad, aumentar la capacidad, etc.

En definitiva, son medidas que hacen al transporte aéreo sostenible en todos los aspectos.

Breve comentario final.

En este escenario se han propuesto algunas restricciones que podrían imponerse en el espacio aéreo europeo. Las restricciones propuestas son muy variadas. Algunas son de carácter operativo otras de carácter tecnológico, algunas son a corto plazo, otras a medio y también varían sus costes de implantación. Aunque en la mayoría hay una tendencia hacia restricciones de bajo coste y aplicación a corto/medio plazo.

Todas ellas van en beneficio del medioambiente frente al beneficio directo de las compañías aunque buscando perjudicarlas lo menos posible e involucrar a los gobiernos. Es cierto que algunas restricciones impuestas podrían implicar una reducción del tráfico aéreo debido a la imposibilidad de algunas compañías de cumplir con ellas. Serán necesarias inversiones en mejorar la tecnología de la flota y los cambios operacionales podrían implicar aumentos de costes. Esto podría ser compensado con ayudas por parte de la UE. Esta inversión está justificada porque supondría conseguir un tráfico aéreo adaptado a las necesidades futuras.

Es necesario señalar que este escenario prevé una rápida recuperación de la crisis del COVID-19. Aun así, es posible que los escenarios más restrictivos como son la prohibición al tráfico de corto recorrido en la zona 1 y la dispersión en la zona 2, se vean aplazados en el tiempo por la reducción del tráfico debido a la crisis. No obstante esto sería temporal y estas medidas volverían a ser necesarias porque los avances tecnológicos no podrán dar respuesta a todas las demandas medioambientales del futuro.

8.3.3 Inclusión de gases como NOx y el H2O en el mercado de emisiones de CO2 y la imposición de nuevas tasas y normativas reguladoras.

Se expone a continuación un escenario a corto plazo. Se trata de un escenario puramente normativo que puede entenderse como un plan de contingencia o acción a corto plazo. En este escenario se propone incluir los gases que emiten los motores de las aeronaves que no sean en base carbono, NOx y vapor de agua, en los sistemas de mercado de emisiones EU ETS además de crear algunas tasas de emisiones.

Se propone este escenario porque tendrá un menor impacto sobre las aerolíneas, al seguir con el sistema de comercio de emisiones. Se incluyen dos elementos importantes como son el NOx y el vapor de agua porque son considerados como grandes olvidados en algunos acuerdos climáticos. Se ha demostrado el importante impacto sobre el clima que generan.

La inclusión de gases sin carbono en el EU ETS incentiva a las aerolíneas y a los fabricantes a reducir los impactos medioambientales de la aviación. Además recalca la importancia que tienen otro tipo de gases como los que no tienen carbono en su composición. A medida que los impactos no relacionados con el CO2 aumentan proporcionalmente con la distancia, las aerolíneas que operan muchos vuelos de larga distancia, se enfrentarán a un mayor aumento de costes. Para evitar distorsiones competitivas, es importante incluir todos los vuelos que salen hacia y desde Europa en el sistema.

Es un escenario que tendría una vida corta que estaría enfocada a conseguir resultados de reducción de emisiones mediante incentivos que tendrían como resultado la aplicación de los escenarios de medio y largo plazo anteriormente propuestos. Este escenario es probable que no se dé solo sino de forma paralela con alguno de los dos propuestos anteriormente. Más probablemente con el segundo. De hecho, los dos escenarios propuestos necesitan de normativas medioambientales para poder ser impulsados y llevados a cabo.

Este escenario prevé seguir con las normativas activas en la actualidad y propone algunas otras como la compensación con otras actividades. En el ya comentado seminario "The world-wide scientific network for aviation research and policy in the Netherlands" (Airneth) de Rogier Lieshout, curiosamente se muestra como medida de mitigación este escenario. Las compensaciones por emisiones de carbón. Medidas basadas en el mercado que actualmente se aplican (EU ETS y CORSIA).

Muchas iniciativas van en el sentido económico con acciones tecnológicas. En el programa CORSIA existe el objetivo de estabilizar las emisiones de CO₂ a niveles del año 2020 lo que supone que el CO₂ se mantenga durante muchos años. Las emisiones del resto de gases se reducirían pero no son el objetivo de este programa.

Hasta el momento, los límites del Anexo 16, Parte 2, se han usado para construir esquemas de tasas relacionadas con las emisiones de NO_x y HC en 25 aeropuertos de países europeos como Alemania, Dinamarca, Reino Unido, Suecia o Suiza, estableciendo categorías de motores según sus emisiones y aplicando porcentajes de incremento de tasas de aterrizaje sobre los tipos de motores más contaminantes. Aunque la normativa no es exactamente la misma en todos ellos, las líneas generales se basan en los principios defendidos por la Conferencia Europea de Aviación Civil (CEAC) y en la filosofía de OACI sobre tasas ambientales, que requiere a los Estados no obtener más dinero del necesario para los programas ambientales dirigidos a mitigar el efecto que se penaliza.

La metodología consiste en seguir imponiendo las medidas actuales en materia del mercado de emisiones pero incluyendo los que no tienen base carbono. Además se propone aumentar algunas tasas ambientales y hacer que más actores sigan el ejemplo de algunos aeropuertos como el de Zúrich que fue el primer aeropuerto mundial que implantó una tasa sobre las emisiones de NO_x de los aviones civiles. El producto de la recaudación se destina a una variedad de medidas, entre las que se incluyen la sustitución de vehículos y equipos de pista con motores de explosión por vehículos eléctricos, el reemplazamiento de la climatización de los edificios del aeropuerto por energía solar y plantas de gas de ciclo combinado, subvenciones a los transportes colectivos que acceden al aeropuerto, así como el mantenimiento del equipo monitor de la calidad de aire local. Los vehículos eléctricos en tierra es una medida que puede adoptarse en la UE a corto plazo.

Endurecer los gravámenes sobre aeronaves antiguas y contaminantes para reducir su uso, es otra opción.

Ante la posible inviabilidad económica de algunas tasas. Se plantea también la posibilidad de utilizar compensaciones. Esto es, al no poder reducir emisiones provenientes de la aviación, se compensarán con otras actividades como pueden ser la reforestación o la reconversión de industrias contaminantes. Esto va en línea con el comercio de emisiones.

Buscando otros escenarios parecidos al propuesto, además del ya mencionado, se puede citar el proyecto de investigación del Dr. Janina Scheelhaase, Economic impacts of regulating aviation's full climate impact: insights from the AviClim research Project. El Dr. Scheelhaase presentó los resultados de un estudio que analizó la forma más rentable de reducir el impacto climático total de la aviación. Se consideraron varias opciones: (1) un impuesto climático sobre todas las emisiones relevantes, (2) un impuesto climático sobre las emisiones de NO_x combinado con un esquema de comercio de CO₂ y (3) la inclusión de CO₂, NO_x, H₂O y estelas de vapor en un esquema de comercio de emisiones. Para cada opción se consideraron varios escenarios con respecto a la cobertura geográfica.

En el estudio se ve cómo la primera propuesta, imponer un impuesto climático, resultaría la más costosa para las aerolíneas, lo que significaría reducciones de rutas y aumentos de costes. El comercio de emisiones mostrado en las propuestas segunda y tercera, se ven como una opción que afectaría menos a las aerolíneas porque se espera que sean subsidiadas por los gobiernos.

La tercera opción, incluir algunos gases en el comercio de emisiones global, sería la que menor impacto económico tendría aunque también la menos efectiva a nivel climático.

Se presentan algunos inconvenientes importantes. Las medidas normativas son muy difíciles de consensuar y llevar a cabo en un mundo fragmentado como el nuestro. Prueba de ello son los numerosos convenios medioambientales fallidos. No hay consenso en emisiones de las industrias y mucho menos en la aviación.

Otra desventaja importante es que no se pueden reducir las emisiones con medidas puramente normativas, con tasa e imposiciones legales. Es necesario que vayan de la mano de avances tecnológicos de las aeronaves y los sistemas de navegación. Se considera que en la actualidad hay suficientes medidas en este sentido pero su aplicabilidad es complicada a nivel europeo y casi imposible a nivel mundial. Además para poder imponer sanciones, es necesario tener elementos de medida fiables de las mismas y poder identificar su procedencia. Esto en la actualidad no es posible. Las emisiones son calculadas de diversas maneras (como el consumo de combustible) pero no son exactas.

La ventaja más importante que tienen las medidas normativas es que sirven de incentivo o motor de arranque de acciones en diferentes cambios para poder cumplir los objetivos de reducción de emisiones propuestos. Al aplicarse en forma de comercio de emisiones, las aerolíneas no se verán tan afectadas económicamente. Una vez más se plantea la imposición de normativa como una herramienta y no como medio de reducción de emisiones.

Por tanto un escenario meramente normativo parece poco probable, sobre todo a medio o largo plazo.

9. Resultados.

Los efectos negativos como consecuencia de emisiones procedentes de la actividad aérea sobre las personas, el clima y la propia aviación son innegables.

La OACI no es optimista a este respecto y pronostica que, en ausencia de medidas adicionales para 2050, las emisiones provenientes de la actividad aérea podrían triplicarse. En general, no se esperan significativos avances tecnológicos que conlleven reducciones drásticas de emisiones. Debido a los factores limitantes expuestos, sólo podrían darse si se cambia el sistema de producción de propulsión o mediante combustibles sostenibles alternativos usados en los motores actuales. Además aunque aparezca una tecnología prometedora, se tardará mucho tiempo (objetivo 2035) en que llegue a instalarse en las aeronaves debido a los complicados procesos de pruebas y ensayos de seguridad que deben pasar los componentes aeronáuticos.

El impacto del CO₂ es del 50% y el otro 50% es del resto de componentes. Por eso en el tercer escenario se propone incluirlos en los mercados de emisiones y en el segundo las restricciones se aplican teniendo en cuenta ese 50% de gases sin base en carbono. Se ha llegado a la conclusión de que hay relación entre la densidad de tráfico aéreo y las concentraciones de gases procedentes de la aviación y se ha visto la importancia del lugar, la altura de emisión de los gases y el tipo de componentes. Todo ello encaminado a dar unas acertadas propuestas en los escenarios.

Se deberían mejorar los sistemas de monitorización de los gases causantes del efecto invernadero para poder llevar un mejor seguimiento, control y poder dar una buena respuesta.

OACI considera los combustibles sostenibles como una herramienta potencial de reducción de emisiones y aunque ha conseguido importantes avances con el programa CORSIA, entre muchos otros programas. Se han visto problemas importantes. El principal problema es conseguir que los combustibles sean sostenibles de verdad. Tampoco se esperan avances significativos en nuevas formas de energía o motores eléctricos hasta 2035. Esta medida de reducción de emisiones se perfila como la más prometedora a corto plazo pero necesita de una importante inversión para conseguir resultados satisfactorios y poder ofrecer combustibles sostenibles a buen precio. Existe una clara tendencia a aumentar los porcentajes de combustibles sostenibles en vuelos comerciales y parece que seguirá siendo así.

En cuanto a medidas normativas y económicas se han visto varios convenios enfocados a reducir emisiones y sus complicados progresos. En los últimos años se ha incluido a la actividad aérea como actor en estas emisiones pero son necesarios mayores pasos y un consenso global que parece difícil de alcanzar. Aunque algunas medidas como el mercado de emisiones parece un buen camino a seguir, no hay que olvidar que las medidas normativas y económicas por sí solas no serán capaces de conseguir los objetivos de neutralidad de emisiones, necesitan ser acompañadas de medias tecnológicas, operacionales, etc. En el escenario tres de este trabajo se apunta en este sentido, además de la necesidad de reconocer las emisiones como el

NOx y el H₂O. Sin embargo el punto fuerte a medio plazo son las medidas de reducción de emisiones de carácter operacional. Visto que no es posible reducir emisiones significativamente gracias a la tecnología antes del 2035, se orientan las soluciones del trabajo en la dirección de las operaciones.

Se han estudiado las formas existentes de reducir emisiones para poder en base a ello, pronosticar el futuro del ATM y poder proponer algunas nuevas. De las cuatro aéreas de acción estudiadas (combustibles, operativas, tecnológicas y medidas normativas o económicas) se ha visto las operativas como las más viables en el horizonte 2035. Las medidas tecnológicas tardarán en dar resultados.

Para lograr una predicción del futuro del ATM se presentan tres escenarios, el primero a implantar a largo plazo, el segundo a medio plazo y el tercero a corto plazo. Todos dentro del horizonte 2035. El primer escenario propone crear zonas prohibidas al tráfico aéreo como el Polo Norte, para reducir la concentración de emisiones. Se trata de un escenario poco probable a corto plazo, que conllevaría complicaciones en la gestión del tráfico aéreo y no conseguiría reducción alguna de emisiones.

En el segundo escenario, el más probable de los tres. En este escenario se hace un estudio de la dispersión de los gases, las zonas más contaminadas, los tipos de vuelos, etc. Para llegar a dividir el espacio aéreo europeo en dos zonas y dos fases. Cada una de ellas tendrá unas medidas concretas de acción. Estas medidas pueden consultarse en la tabla 9.1.

En el escenario se ofrece como solución principal la dispersión de los vuelos para reducir los niveles de contaminación en ciertas zonas. Además de un paquete de medidas restrictivas operacionales, tecnológicas y de combustible que deberán aplicarse. Se permite adaptar las medidas a la casuística de la zona y a los tipos de vuelos. Este escenario es el que mayor inversión de los tres requiere pero es el más prometedor, viable y sostenible.

El tercer escenario normativo es presentado como medida de contingencia a corto plazo. En él se defiende la incorporación de las emisiones que no tienen carbono en su composición en el mercado de emisiones europeo. Sería una medida de bajo impacto económico en las aerolíneas.

A nivel europeo el segundo escenario es viable y sostenible gracias a proyectos ya en marcha pero a nivel global es muy difícil que se dé. Especialmente en la región Asia/Pacífico.

Seguramente la solución no esté sólo en el escenario dos. Sino que la solución consistirá en imponer a corto plazo medidas normativas como la inclusión de los gases como el NOx y el vapor de agua en los sistemas de comercio de emisiones (escenario tres), para después a medio plazo imponer restricciones operacionales y restrictivas con sus normativas necesarias de aplicación (escenario 2). Es de esperar a largo plazo, mejoras tecnológicas pero se sigue en la actual tendencia de que las emisiones aumenten más que los vuelos, los lentos avances en materia tecnológica hará que ésta no pueda dar respuestas a corto ni medio plazo y tengan que prohibirse algunas zonas.

En la tabla siguiente se puede ver un resumen de la propuesta de restricciones planteadas en el escenario dos. Se ha elegido este por ser el más probable que se dé. Aunque estas restricciones sirven de incentivo para reducir emisiones es deseable que se apliquen también medidas normativas como la propuesta en el escenario tres.

Tabla 9.1 Propuestas de restricciones escenario 2.

Zona	Descripción de la restricción	Detalles	Fase	Tipo de restricción	Implantación	Coste
1	Prohibir vuelos de corto recorrido	<ul style="list-style-type: none"> Vuelos Regionales (500km) y corto recorrido (1000km). Aplicará a aviones regionales y de fuselaje estrecho. Vuelos redundantes 	1 y 2	Operacional	Corto plazo	Bajo
	Aterrizajes verdes (CDO, esperas, Merge, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> Aterrizajes verdes antes del 2035 Aproximaciones eficientes Mejorar tecnología. A bordo y en tierra 	1	Operacional	Corto plazo	Alto
	Velocidades variables	<ul style="list-style-type: none"> Permite reducir emisiones y facilita el tráfico por darle agilidad a la velocidad. XMAN 	1 y 2	Operacional	Corto/Medio	Medio
	Combustibles sostenibles	<ul style="list-style-type: none"> Objetivo 2035. IntraEU al 25% e internacionales al 10% 	1 y 2	Combustible	Medio plazo	Medio
	Reducción de emisiones en tierra	<ul style="list-style-type: none"> Vehículos eléctricos (no usar motores) A-CDM 	1	Operacional/Tecnológica	Corto plazo	Bajo
	Aumentar el factor de ocupación	<ul style="list-style-type: none"> Al 90%. Si no se llega, la aerolínea paga tasa. En medio y largo recorrido. 	1 Y 2	Tecnológica	Corto plazo	Bajo
	Mejoras tecnológicas de aeronaves	<ul style="list-style-type: none"> Para la navegación De diseño Aviones híbridos 		Tecnológica	Largo plazo	Alto
2	Dispersar las trayectorias de los vuelos	<ul style="list-style-type: none"> Obligatoria para rutas contaminadas (noroeste) y voluntaria para el resto Aplicable a altos niveles de vuelo 	2	Operacional	Medio/Largo	Alto
	Reducir velocidad	<ul style="list-style-type: none"> Solo en zona 2 para reducir emisiones No se impone velocidad variable por su complejidad 	1 y 2	Operacional	Corto plazo	Bajo
	Combustibles sostenibles	<ul style="list-style-type: none"> Objetivo 2035. IntraEU al 20% e internacionales al 8% 	1 y 2	Combustible	Medio plazo	Medio
	Rutas más eficientes	<ul style="list-style-type: none"> Variaciones de altura de 700m por creación de estelas Aumentar altura para no aumentar concentraciones locales pero sin 	2	Operacional	Medio	Alto
	Reducción de emisiones en tierra	<ul style="list-style-type: none"> Vehículos eléctricos (no usar motores) A-CDM 	1	Operacional/Tecnológica	Corto plazo	Bajo
	Vuelos en formación de aviones de fuselaje estrecho	<ul style="list-style-type: none"> Aplicaría a aviones de fuselaje estrecho siempre que sea posible Acoplamiento y desacoplamiento de la formación 	2	Operacional	Medio/Largo	Alto
	Aeropuertos alternativos	<ul style="list-style-type: none"> Se ofrece como medida de dispersión en fase 1 y como respuesta a la futura congestión del tráfico 	1	Operacional	Corto plazo	Bajo
	Limitar o prohibir escalas	<ul style="list-style-type: none"> Evitar despilfarro. Primar la eficiencia energética Medios de transporte alternativos 	1	Operacional	Corto plazo	Bajo
Mejoras tecnológicas de aeronaves	<ul style="list-style-type: none"> Para la navegación De diseño de las aeronaves 	1 y 2	Tecnológica	Largo plazo	Alto	

10. Conclusiones, propuestas y sugerencias.

Tras el desarrollo de los contenidos previos y la exposición de los tres escenarios propuestos, se concluye con que el objetivo fijado para este trabajo fin de máster se ha logrado de forma satisfactoria pero no al 100%. Se ha podido lograr el objetivo de estudiar con intención predictiva el futuro de la gestión del tráfico aéreo atendiendo a las previsibles restricciones debidas a la contaminación de los motores en el horizonte 2035. Pero es necesario señalar que, aunque el objetivo de predecir se ha logrado, no ha sido posible asegurar un alto grado de exactitud de las predicciones debido a la incertidumbre que rodea el sector. Por un lado está la actual crisis ocasionada por el COVID-19 la cual, aunque se ha tenido en consideración a la hora de hacer las predicciones de tráfico aéreo, presenta una situación de difícil predicción. Por otro lado se ha visto una falta de información y medios para poder tener en cuenta todos los factores necesarios para poder asegurar una elevada exactitud en las predicciones.

El hecho de no estar claros los efectos ni las cantidades de gases emitidas resulta un problema de fondo que condiciona en cierta medida los resultados. Es claro que las acciones de mitigación se ven influenciadas por los resultados de los niveles de contaminación. Por ello es necesaria una mayor inversión en investigación sobre los efectos climáticos de los gases provenientes de la aviación, su concentración, distribución, etc. Es necesario tener en cuenta que las emisiones procedentes de la aviación no se pueden distinguir de emisiones de otras fuentes. No se sabe con exactitud las cantidades de NOx que son emitidas a la atmosfera por los motores de aviación. Tampoco se ha podido demostrar de forma fehaciente el impacto medioambiental real de las emisiones de los gases de los aviones. Se han estudiado sus efectos positivos y negativos y priman los negativos. Es necesario apoyar programas que van en este sentido para poder actuar en consecuencia en materias como los avances tecnológicos u operativos.

Se han estudiado las formas existentes de reducir emisiones para poder en base a ello, pronosticar el futuro del ATM y poder proponer algunas nuevas. De las cuatro aéreas de acción estudiadas (combustibles, operativas, tecnológicas y medidas normativas o económicas) se ha visto las operativas como las más viables en el horizonte 2035. Las medidas tecnológicas tardarán en dar resultados. En general, para la consecución del objetivo fijado y de las propuestas de restricciones planteadas, se necesita una inversión, un consenso global y una legislación que apoye las medidas y sirva de incentivo para avanzar en materia tecnológica. Se ha visto que a nivel global esto parece inalcanzable con vistas al horizonte 2035 sin embargo, a nivel europeo, es posible conseguirlo gracias a los avances que se han producido en materia de legislación, consenso y programas como es el Cielo Único Europeo, entre otros.

Para lograr alcanzar al 100% el objetivo de este trabajo sería necesaria una mejor recopilación y compartición de información relativa a emisiones, previsiones de tráfico, avances en programas propios de países, resultados de estudios de investigación, etc. Sería deseable una colaboración más estrecha entre países para lograr una gestión global sostenible del espacio aéreo.

La inclusión de forma más concreta de las emisiones procedentes de la aviación en los convenios de reducción de emisiones, también supondría una manera de incentivar la compartición de información para poder así lograr una mejor predicción del futuro para poder anticiparse y ser capaces de dar respuestas a los desafíos venideros.

Aunque en este estudio se han visto los combustibles sostenibles, se ha hecho especial hincapié en los avances tecnológicos y sobre todo operativos y procedimentales por considerarlos más viables en el horizonte 2035. Sería recomendable seguir investigando en las soluciones que pueden dar los combustibles sostenibles a corto plazo, líneas de investigación de biocombustibles, combustibles alternativos como el hidrógeno, etc.

Otra línea de estudio podría ser el estudio y la comparación de programas como el SESAR europeo y el NextGen americano para poder, al compararlos, predecir mejor el futuro en base a las nuevas tendencias de sus estudios en activo. Gracias a proyectos ya existentes como el A-CDM, aterrizajes y aeropuertos verdes, SES, FRA, FRAMaK, XMAN, AMAN, etc. Se están consiguiendo reducciones de emisiones importantes pero es necesario enfocar los esfuerzos hacia este objetivo y no permitir que la reducción de emisiones sea una simple consecuencia. En este trabajo se proponen medidas operativas y restricciones concretas para reducir emisiones apoyándose en programas existentes para reducir costes de implantación y asegurar su viabilidad.

En este trabajo se ha mostrado el escenario dos como más viable pero es necesario destacar que seguramente la solución no esté sólo en el escenario dos. Sino que la solución se perfila muy compleja y dinámica. Consistirá en la inteligente combinación de medidas y acciones en diversas direcciones para asegurar dar una respuesta sostenible en todos los aspectos.

Es cierto que se plantean muchas dudas con respecto a la solución pero lo que sí es seguro es que el futuro de la aviación va a estar condicionado a las emisiones y el respeto del medio ambiente y los organismos implicados deben ser capaces de estar a la altura y dar las soluciones necesarias.

11. Bibliografía.

Aena. (s.f.). *Medio Ambiente*. Obtenido de <http://www.aena.es/es/aeropuerto-barcelona/medio-ambiente.html>

Aena. (2010). Nota de prensa. *Aena impulsa nuevas actuaciones para la reducción de emisiones de CO2, el uso eficiente de los recursos naturales y el control y la vigilancia del ruido*.

Association, A. I. (2019). *Environmental report*. Obtenido de Aviation's Next Advance, Sustainable High-Speed Flight: https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2019/ENVReport2019_pg81-84.pdf

Authority, C. A. (2015). *POLICY FOR 'POINT MERGE' AND 'TROMBONE' TRANSITION PROCEDURES*. Safety and Airspace Regulation Group.

BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO. (2018). *BOE-A-2018-2137 Proyecto Brain*. Madrid.

Bucuroiu, R. (27 de 06 de 2019). *EUROCONTROL*. Obtenido de European Network Operations Plan 2019-2024: <https://www.eurocontrol.int/publication/european-network-operations-plan-2019-2024>

Bucuroiu, R. (15 de 05 de 2020). *EUROCONTROL*. Obtenido de European Network Operations Plan, 2020 Recovery Plan: <https://www.eurocontrol.int/publication/network-operations-plan-2020-recovery-plan>

EASA certifies electric aircraft, first type certification for fully electric plane world-wide. (2020). Cologne.

EASA, E. a. (2019). *European Aviation Environmental Report*.

ENAIRES. (2018). Nota de prensa. *ENAIRES mejora los aterrizajes al Aeropuerto de Barcelona-El Prat con un rediseño de su espacio aéreo*.

ENAIRES. (s.f.). *Sostenibilidad Medioambiental*. Obtenido de https://www.enaire.es/sobre_enaire/sostenibilidad-medioambiente_servidumbres/nuestro_compromiso

EUROCONTROL. (2020). *Point Merge*. Luxembourg.

EUROCONTROL. (2019). *The aviation network – Decarbonisation issues*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Europea, C. (16 de 01 de 2020). *Eur-Lex*. Obtenido de [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0557R\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0557R(01))

Europea, C. (s.f.). *Pacto Verde Europeo*. Obtenido de https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es

Europea, C. (s.f.). *Web oficial de la Unión Europea*. Obtenido de Régimen de comercio de derechos de emisión de la UE (RCDE UE): https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_es

- Garraín, D. (2012). *Estudios de ACV de combustibles alternativos en aviación: caso del queroseno obtenido por hidrotreamiento de aceite vegetal de camelina*. Madrid: CIEMAT – Dpto. Energía – Ud. Análisis de Sistemas Energéticos.
- Grandt, M. (s.f.). *SESAR*. Obtenido de FREE ROUTE AIRSPACE MAASTRICHT AND KARLSRUHE: https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/wac2014/Demo5.MET-20140305_FRAMaK_ATM_world_Congress_final.pdf
- Graver, B. (2018). *ICCT*. Obtenido de CO2 emissions from commercial: https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_CO2-commercl-aviation-2018_20190918.pdf
- Grewe, V. (s.f.). *Airneth. Aviation non-CO2 effects and climate mitigation options*. DELFT.
- ICAO. (2019). *DESTINATION GREEN, The Next Chapter, Environmental Report AVIATION AND ENVIRONMENT*. Montreal.
- Jankovec, O. (15 de 04 de 2020). Carta de ACI a IATA. *Medidas ambientales y el Covid-19*. Bruselas.
- Lieshout, R. (9 de Enero de 2020). *Airneth*. Obtenido de Non CO2 climate impacts of aviation.
- Matt Grote, I. W. (2014). Direct carbon dioxide emissions from civil aircraft. *Atmospheric Environment, University of Southampton*, 214-224.
- Penner, J. E. (1999). INFORME ESPECIAL DEL IPCC. *La aviación y la atmósfera global*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- Plaza, P. T. (2020). Presentación Air Operations Mangement.
- Royal Aeronautical Society*. (s.f.). Obtenido de <https://www.aerosociety.com/news/high-time-for-hydrogen/>
- SESAR. (2019). *A proposal for the future architecture of the European Airspace*.
- SESAR, E. A. (2020). *European ATM Master Plan*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2019.
- Smedt, L. P. (10 de 03 de 2020). *EUROCONTROL*. Obtenido de Environment: rethinking european aviation: <https://www.eurocontrol.int/publication/skyway-2020-environment>
- STATFOR. (2018). *EUROCONTROL*. Obtenido de European aviation in 2040, Challenges of growth: <https://www.eurocontrol.int/publication/challenges-growth-2018>
- Teoh, R. (2020). Mitigating the Climate Forcing of Aircraft Contrails by Small-Scale Diversions and Technology Adoption. *Environmental science and technology. Pubsacs*

12. Anexos.

Anexo I. Tablas y gráficas sobre niveles de emisiones y densidad de tráfico.

Emisiones de CO2 por pasajero e intensidad de emisiones de carbono. Datos expresados por regiones reconocidas por ICAO.

Tabla I.1 Emisiones por regiones.

Rank	Route Group (Not directional specific)	CO ₂ [MMT]	% of Total CO ₂	RPKs (billions)	% of Total RPKs	Carbon Intensity [g CO ₂ /RPK]
1	Intra-Asia/Pacific	186	25	2,173	26	86
2	Intra-North America	136	18	1,425	17	96
3	Intra-Europe	103	14	1,189	14	86
4	Europe ↔ North America	50.0	6.7	597	7.0	84
5	Asia/Pacific ↔ Europe	43.4	5.8	523	6.1	83
6	Asia/Pacific ↔ North America	38.7	5.2	459	5.4	84
7	Asia/Pacific ↔ Middle East	33.5	4.5	388	4.6	86
8	Intra-Latin America/Caribbean	29.1	3.9	303	3.6	96
9	Europe ↔ Middle East	25.1	3.4	291	3.4	86
10	Latin America/Caribbean ↔ North America	23.4	3.1	290	3.4	81
11	Europe ↔ Latin America/Caribbean	21.1	2.8	259	3.1	81
12	Africa ↔ Europe	16.5	2.2	197	2.3	84
13	Intra-Middle East	9.18	1.2	79.0	0.9	116
14	Middle East ↔ North America	8.84	1.2	98.8	1.2	89
15	Intra-Africa	8.62	1.2	72.6	0.9	119
16	Africa ↔ Middle East	7.75	1.0	84.8	1.0	91
17	Africa ↔ Asia/Pacific	2.73	0.4	30.0	0.4	91
18	Africa ↔ North America	1.90	0.3	19.4	0.2	98
19	Asia/Pacific ↔ Latin America/Caribbean	0.91	0.1	10.2	0.1	89
20	Latin America/Caribbean ↔ Middle East	0.79	0.1	8.29	0.1	96
21	Africa ↔ Latin America/Caribbean	0.46	0.1	4.73	0.1	97
Total		747	100	8,503	100	88

Tabla I.2 Emisiones de CO2 por pasajero de los 10 países que más emisiones de CO2 de la aviación tienen.

Rank	Departure country	Operations	CO ₂ [MMT]	% of Total CO ₂	RPKs (billions)	% of Total RPKs
1	United States ^a	Domestic	126	17	1,328	16
		International	56.1	7.4	650	7.6
		Total	182	24	1,976	23
2	China ^b	Domestic	65.9	8.8	781	9.2
		International	29.0	3.9	361	4.2
		Total	94.9	13	1,142	13
3	United Kingdom ^c	Domestic	1.51	0.2	12.0	0.2
		International	28.3	3.8	328	3.9
		Total	29.8	4.0	350	4.1
4	Japan	Domestic	9.41	1.2	95.5	1.1
		International	14.0	1.9	172	2.0
		Total	23.4	3.1	267	3.1
5	Germany	Domestic	1.53	0.2	12.4	0.1
		International	20.7	2.8	235	2.8
		Total	22.2	3.0	247	2.9
6	United Arab Emirates	Domestic	<0.01	<0.1	<0.01	<0.1
		International	21.1	2.8	233	2.7
		Total	21.1	2.8	233	2.7
7	India	Domestic	10.8	1.4	125	1.5
		International	8.60	1.2	109	1.3
		Total	19.4	2.6	234	2.8
8	France ^d	Domestic	4.53	0.6	48.9	0.6
		International	14.7	2.0	172	2.0
		Total	19.2	2.6	221	2.6
10	Australia ^e	Domestic	6.65	0.9	76.3	0.9
		International	12.3	1.7	144	1.7
		Total	19.0	2.5	220	2.6
10	Spain	Domestic	2.88	0.4	28.9	0.3
		International	15.6	2.1	203	2.4
		Total	18.5	2.5	232	2.7
Rest of the World			298	40	3,381	40
Total			747	100	8,503	100

Tabla I.3 Emisiones de CO2 por pasajero e intensidad de emisiones de carbono según el tipo de aeronave.

Aircraft Class	Departures		RPKs		Avg Distance [km]	CO ₂		Carbon Intensity [g CO ₂ /RPK]
	Million	% of total	billions	% of total		[MMT]	% of total	
Regional	9.77	26	303	4	632	47	6	156
Narrowbody	25.1	66	4,629	54	1,330	395	53	85
Widebody	3.10	8	3,570	42	4,700	305	41	85
Total	38	100	8,503	100	1,425	747	100	88

En la siguiente grafica se representar el porcentaje de cantidad de CO2 emitida y la distancia en kilómetros. También se puede ver la intensidad de la emisión de carbono anteriormente explicada en este documento.

Tabla I.4 Cantidad e intensidad de emisiones de carbono según distancia recorrida.

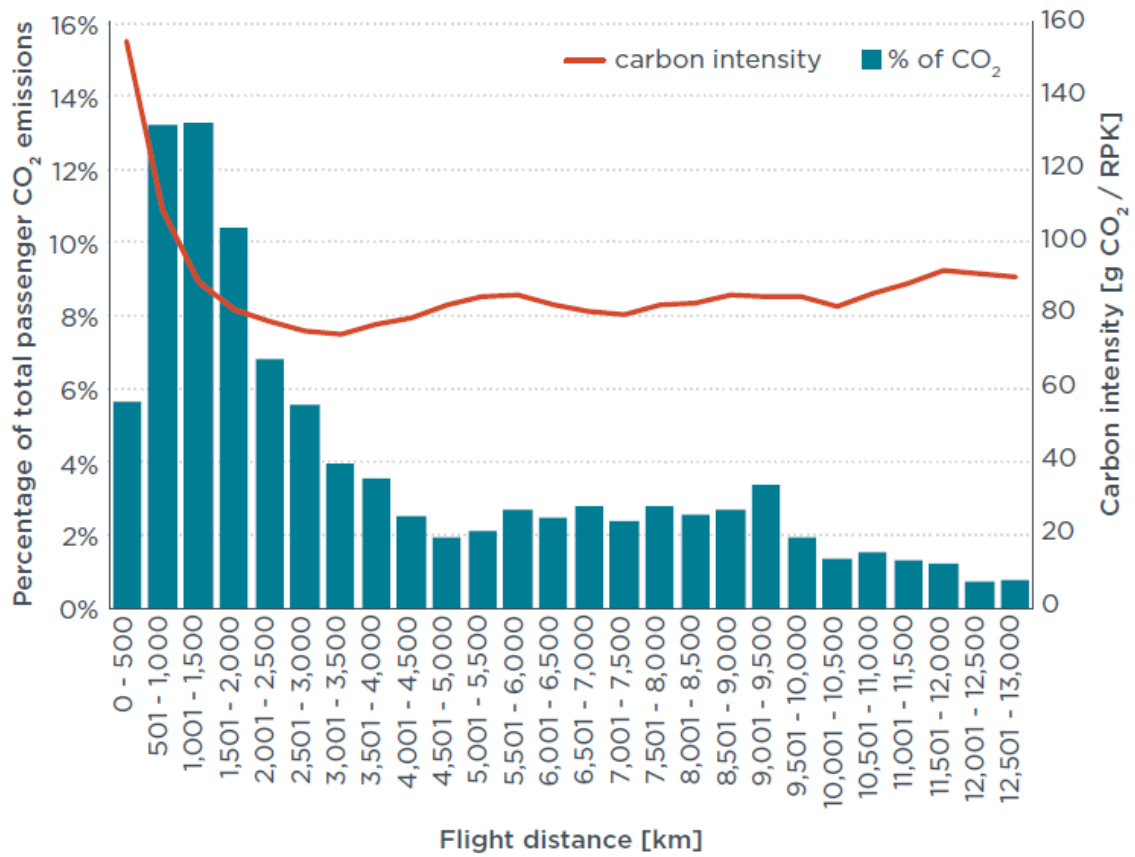


Figura I.1 Concentraciones de NO₂ a nivel mundial. Fuente ESA. Datos de 2019.

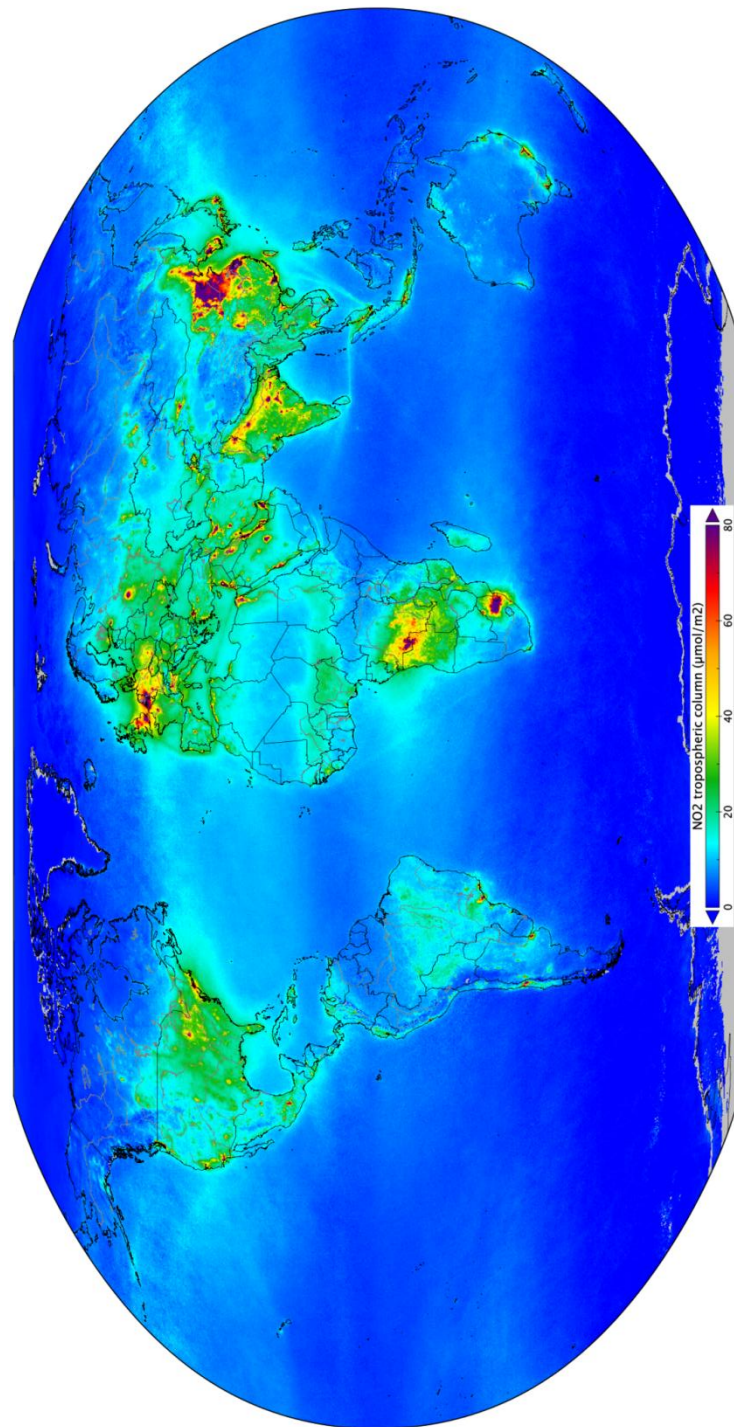
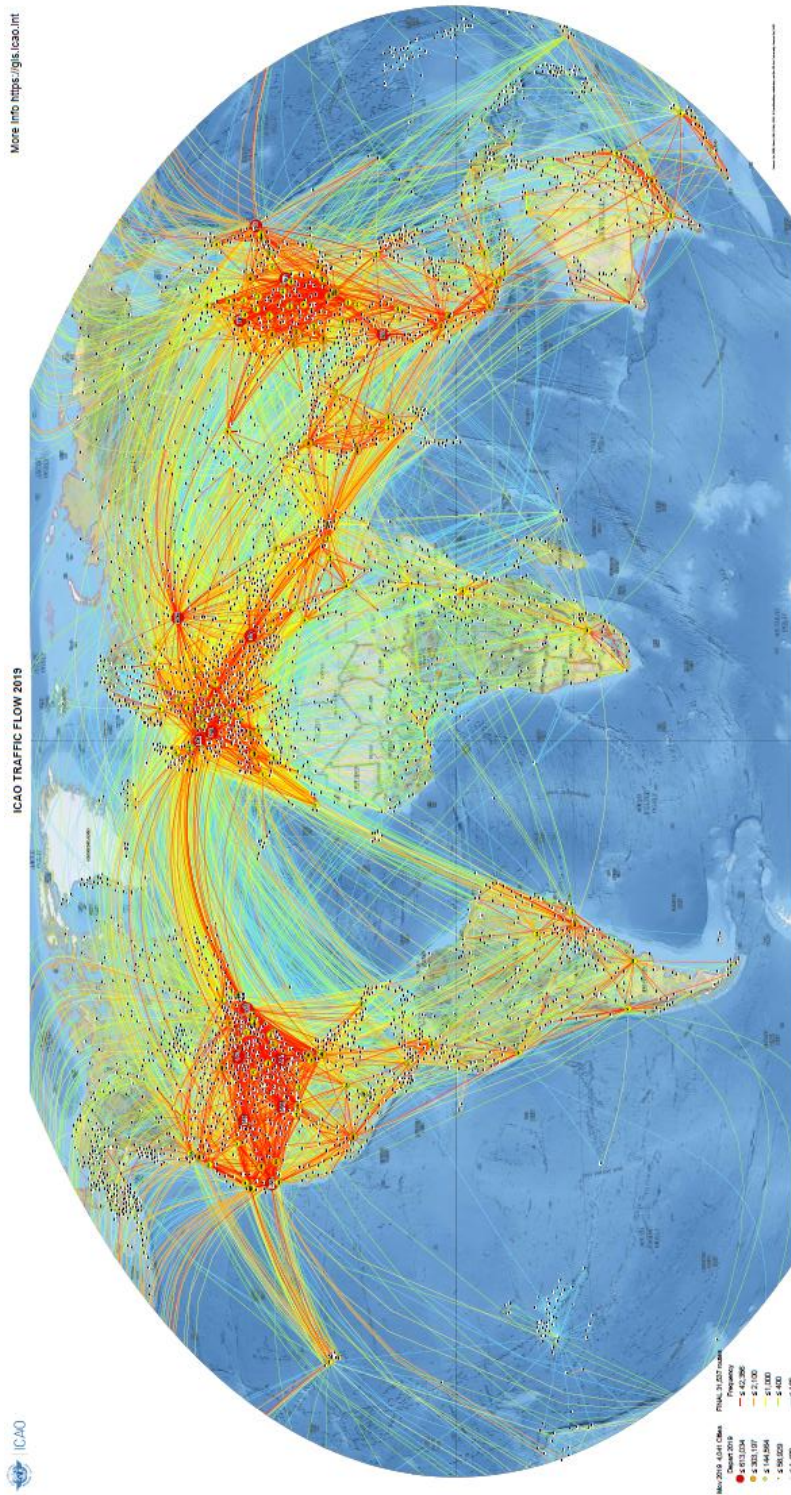


Figura I.2 Traffic flow 2019 ICAO.



Anexo II. Formas de reducir emisiones.

II.1 Combustibles y alternativas.

En el proceso de contaminación de un motor, un elemento crucial a tener en cuenta es el combustible utilizado. Las emisiones dependen del diseño y funcionamiento del motor pero las partículas emitidas al ser quemado dependen del combustible utilizado. Por ello, se hará un breve acercamiento a los diferentes tipos de combustibles utilizados y los que nos esperan en el futuro.

Los aviones modernos ahora son un 85%¹² más eficientes en combustible que los primeros aviones y un vuelo de hoy emite un 50% menos de CO₂ que un vuelo comparable en los años noventa.

El combustible supone alrededor del 25% de los costes de una aerolínea. Los combustibles utilizados en aviación son, por lo general, más refinados que los utilizados en otros medios de transporte. Los combustibles de aviación llevan aditivos para mitigar los riesgos de congelación o explosión. Estos aditivos los hacen más contaminantes. Se estima que una tonelada de combustible para la aviación, al quemarlo emite de media 3,16 toneladas de CO₂. El 97% de las emisiones de una aerolínea provienen del uso del combustible.

Tipos

Basados en gasolina.

Son combustibles altamente refinados, más que el queroseno, son utilizados en motores alternativos de combustión interna. Estos combustibles son denominados Avgas, siendo el más extendido el 100LL.

La combustión de 1 litro de este combustible genera 2,199 kg de CO₂.

Basados en queroseno.

Son combustibles utilizados en motores jet de turbina, tienen unas especificaciones estandarizadas y también pueden usarse en motores diesel. El Jet A-1 es un combustible a base de queroseno sin plomo, su variante militar es el llamado JP-8. La variante americana de este combustible es el Jet A. El Jet B, con su variante militar JP-4, es una mezcla de queroseno y nafta.

La combustión de 1 litro de queroseno genera 2,580 kg de CO₂. Ligeramente por encima de los basados en gasolina. En la combustión de diesel se puede llegar a 2,7 kg por CO₂.

Combustibles en el futuro

Se trata de exponer qué combustibles más respetuosos con el medio ambiente podemos esperar.

¹² Fuente: AIA, Aviation's Next Advance: Sustainable High-Speed Flight.

Basados en gas natural.

En algunos motores es posible utilizar como combustible gas natural comprimido o gas natural líquido. Presentan dos ventajas significativas, son más baratos y emiten menor cantidad de CO₂ a la atmósfera. Algunos aviones como el Tupolev Tu-155 han usado este tipo de combustible pero la baja energía específica, además del riesgo que supone tener gas almacenado, hace que este tipo de combustible no sea el idóneo.

Basados en síntesis.

Son los conocidos como combustibles sintéticos.

El queroseno parafínico sintético SPK (Synthetic paraffinic kerosene). Se puede conseguir por síntesis, bioderivado o a partir de transferencia de aceite vegetal de coco tal como sostiene Rodríguez de la Rubia en su estudio¹³. Las semillas de camelina son muy utilizadas por sus propiedades.

Pilas de combustible.

Mediante una reacción química de iones de hidrógeno con oxígeno se consigue electricidad consumiendo el combustible. Se trata de pilas que se recargan y emiten vapor de agua. Su desarrollo es moderado pero Airbus está llevando a cabo un proyecto para utilizarlas para producción de energía auxiliar en lugar del APU. El avión HY4 de cuatro plazas es el mayor hasta la fecha que utiliza estas pilas.

Son necesarios por lo menos 5 años más de desarrollo para poder reducir el peso de las pilas y darles una mayor aplicabilidad.

Combustible de hidrógeno.

El combustible a base de hidrógeno eliminaría las emisiones de dióxido de carbono de las aeronaves pero aumentaría las de vapor de agua. Puede ser utilizado tanto como combustible en motores de combustión interna como fuente de energía para producir electricidad.

El combustible de hidrógeno podría ser la solución en un futuro. Hasta 2040 no se espera que pueda entrar en servicio un motor de estas características según el estudio "Operational Performance Prediction of a Hydrogen-Fueled Commercial Transport" de Maniaci, David C. de la Universidad de Pensilvania.

Hay un prototipo de motor instalado en un avión Piper (ZeroAvia) de cinco pasajeros con un motor híbrido eléctrico-Hidrógeno. Para más información consultar la bibliografía de este texto.

Aunque este tipo de combustible parece muy prometedor presenta algunos problemas como la necesidad de cambiar las plantas propulsoras y sistemas de almacenamiento y refrigeración del combustible para poder aprovechar sus propiedades, reducir el precio de producción para poder competir con otros combustibles, entre otros retos de carácter puramente técnico.

¹³. Fuente: ESTUDIOS DE ACV DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN AVIACIÓN: CASO DEL BIOQUEROSENO OBTENIDO POR HIDROTRATAMIENTO DE ACEITE VEGETAL DE CAMELINA

Biocombustibles.

Los gastos en combustible, son los más importantes de una aerolínea y hoy en día el precio de los biocombustibles es mucho mayor (ocho veces mayor)¹⁴ que el de combustibles fósiles.

Los biocombustibles son una mezcla de hidrocarburos provenientes de productos agrícolas en forma de biomasa, materia orgánica originada en un proceso biológico. Generalmente se utilizan combinados con combustibles fósiles. Los productos agrícolas más comunes de los que se obtienen estos combustibles, considerados de primera generación, son: maíz, trigo, remolacha, etc. Para la aviación, son los conocidos como Bio-SPK (Biological derived synthetic paraffinic Kerosene). Los llamados TF-SPK (Fischer-Tropsch synthetic paraffinic Kerosene) se producen procesando biomasa mediante pirólisis. Los de segunda generación son obtenidos a partir de recursos no alimentarios como la camelina, jatropha, algas, levadura, residuos, etc.

Es muy importante destacar que con los avances de los motores de nueva generación estos biocombustibles se pueden mezclar directamente con el queroseno. No son necesarias modificaciones en los motores. Mediante la prueba de análisis conocida como ASTM D6866, mediante el carbono 14 se puede saber el porcentaje de combustible biológico que hay en el combustible que se está utilizando.

Hay planes de construcción de plantas de biocombustible por parte de la Unión Europea para aumentar el volumen de producción y reducir el coste.

Entre las ventajas de estos combustibles está que los gases de CO₂ que emiten son absorbidos por las plantas a partir de las cuales provienen mientras que los que provienen de combustibles fósiles no. No emiten azufre y emiten menos CO₂.

Aunque así presentados estos datos parecen la solución a la contaminación, la realidad es diferente. El cultivo de plantas destinadas a este fin entra en conflicto con el cultivo de alimentos ya que se utiliza tierra cultivable y agua. Además esto encarece algunos alimentos y favorece la deforestación para conseguir más tierras de cultivo. El cultivo de combustibles ha contribuido en un 30% de la inflación de los precios de los alimentos, según el Instituto internacional de investigación sobre la política alimentaria y el Fondo monetario internacional.

Se utilizan grandes cantidades de agua, 20 litros de agua por cada kilogramo de biodiesel. Además de contaminarla con productos agrícolas. Hay un negativo balance energético y ecológico.

El uso de biocombustibles parece la solución a corto plazo pero se descartaría a largo plazo por la imposibilidad de abastecer la demanda de manera sostenible. El grupo SAFUG sostiene que para considerarlos sostenibles, deben tener un rendimiento equivalente a los combustibles fósiles y emitir menos CO₂. Esto a día de hoy no es así y no parece que vaya a serlo en un futuro próximo porque aunque las investigaciones con la camelina, entre otras, parecen prometedoras encuentran los obstáculos de la producción agrícola.

¹⁴ Fuente: El Español https://www.elespanol.com/economia/empresas/20190618/aviacion-apuesta-reducir-emisiones-biocombustibles-solucion-definitiva/406960348_0.html

Combustibles sostenibles.

Son aquellos que engloban combustibles con muchas procedencias, todas ellas hacen que estos combustibles sean sostenibles. Las reducciones de emisiones de SAF provienen de todo el ciclo de vida del combustible. Por ejemplo, el combustible podría provenir del aceite de cocina usado, de los desechos domésticos, de la biomasa (como los desechos de madera) o de las plantas. La industria se ha comprometido a usar solo SAF que proviene de fuentes que no degradan el medio ambiente. No se utiliza aceite de palma, por ejemplo, en ninguna aeronave.

El objetivo de IATA es que SAF comprenda el 2% de todo el uso de combustible para 2025.

El precio de los biocombustibles es alto, sólo podría implantarse con ayudas. Los gobiernos deberían ver los combustibles sostenibles para la aviación como se ven otras formas de energía de hoy en día como la eólica.

Aviones eléctricos.

Sustituir los motores de combustión por motores eléctricos puede hacer que el tráfico aéreo sea más verde. Cuestión aparte es la contaminación que genera la obtención de esa electricidad.

En gran parte debido al problema del almacenamiento de la electricidad a bordo, aún no se ha llegado a un motor eléctrico con capacidad propulsora para ser instalado de forma masiva en los aviones comerciales actuales. Esto parece bastante improbable que suceda por lo menos hasta 2040 ya que se requiere todavía de muchos avances tecnológicos además de que una vez se hayan conseguido, el poseso de pruebas y validación se prevé lento.

Uno de los proyectos más prometedores ha sido cancelado. Se trata del proyecto E-fan X llevado a cabo por Rolls-Royce, Siemens y Airbus en el que se pretendía fabricar un motor 100% para su uso en aviones comerciales. Se pueden ver sus características en la lista del Anexo I. aunque una parte del proyecto es continuada por Airbus, el llamado Airbus E-Aircraft System Test House, la realidad es que ha sido un fracaso como todos los proyectos que pretendían desarrollar un motor eléctrico con prestaciones parecidas a los actuales. No obstante se siguen dando hitos como el anuncio el día 10 de junio del 2020 por parte de EASA de la primera certificación de un avión 100% eléctrico. El Pipistrel Velis Electro es un avión biplaza que ha hecho historia. La aeronave está equipada con el primer motor eléctrico certificado por EASA, el E-811-268MVLC. En la bibliografía se puede encontrar el enlace a la nota de prensa además del enlace a la página web del proyecto, el cual se puede encontrar en el Anexo I de este trabajo.

Según la revista Skyway de EUROCONTROL, no se esperan grandes aviones comerciales con prestaciones a las actuales y plenamente operativos antes del año 2050.

II.2 Medidas normativas y económicas.

Durante los últimos 50 años se han venido sucediendo conferencias de Naciones Unidas sobre el medio ambiente y su desarrollo. La primera fue en Estocolmo seguida por la de Río de Janeiro, Johannesburgo y Río+20 todas con resultados lejanos a los deseados.

Kioto.

La Conferencia de Río fue testigo de la aprobación de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), que afirma la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que condujo a la firma en 1997 del Protocolo de Kioto. El Protocolo de Kioto es un protocolo de la CMNUCC suscrita en 1992, es un acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global. El CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆. Pero en el Protocolo de Kioto se sostenía que el único gas de efecto invernadero producido por la aviación es el CO₂. Actualmente se añaden los NO_x, vapor de agua, sulfuros, etc. Que podrían aumentar el efecto del calentamiento del CO₂ en un 50%.

En la fallida cumbre de Copenhague, Kioto se prorrogó hasta 2020 mediante la llamada Enmienda de Doha, adoptada en la capital de Qatar en 2012. La UE tuvo una limitada implicación en Kioto. Está previsto que el acuerdo de París sustituya al de Kioto en el año 2020 y esta vez la UE sí está implicada con una amplia coalición de países.

Frente al Acuerdo de París, Kioto sólo incluía obligaciones de reducción de emisiones para los países industrializados y ponerlo en marcha costó una década. En 1997 los países no sabían ni medir sus emisiones ni disponían de marcos regulatorios ni tecnologías para hacerlo.

Sus resultados han sido buenos. El objetivo fue de reducir las emisiones un 5% y se redujeron un 20%.

Acuerdo de París.

El Acuerdo de París es un protocolo de la (CMNUCC) su objetivo es que la temperatura no suba más de 2 grados a finales de siglo, y si es posible no más de 1,5, y para ello los países presentan objetivos nacionales de lucha contra el cambio climático que se renovarán al alza cada cinco años y aunque los planes nacionales no bastarán para mantener el calentamiento global por debajo de 2 °C, el Acuerdo señala el camino para llegar a esa meta. Se buscará la transparencia y la rendición de cuentas. Se buscará la cooperación y el apoyo entre países, especialmente a los países en desarrollo

Cerca de 200 países se comprometieron a cooperar para transitar hacia un mundo libre de emisiones en la segunda mitad de siglo mediante el Acuerdo de París.

Poner en marcha el Acuerdo de París costará menos de cinco años gracias al aprendizaje de Kioto.

Este acuerdo parece prometedor, sin embargo, como apunta OACI, el Acuerdo de París no pone restricciones concretas para la aviación internacional y esto debería subsanarse.

Pacto Verde Europeo.

El Pacto Verde Europeo es una hoja de ruta para dotar a la UE de una economía sostenible. Pretende impulsar el uso eficiente de los recursos mediante el paso a una economía limpia y circular, restaurar la biodiversidad y reducir la contaminación. En él se describen las inversiones necesarias y los instrumentos de financiación disponibles, y explica cómo garantizar una transición justa e integradora.

La UE será climáticamente neutra en 2050. Para ello, la Comisión propondrá una “Ley Europea del Clima” con el fin de convertir este compromiso político en una obligación jurídica y en un incentivo para la inversión. Los ámbitos de actuación del Pacto son muy diversos, van desde la biodiversidad a la industria sostenible pasando por la acción climática.

Uno de sus ámbitos de actuación que nos interesa en este trabajo es es la movilidad sostenible. El transporte representa la cuarta parte de las emisiones de gases de efecto invernadero, que siguen aumentando. El Pacto Verde busca reducir estas emisiones el 90 % de aquí a 2050.

En el siguiente gráfico se puede ver que la aviación civil es responsable del 13,9% de las emisiones de gases de efecto invernadero.

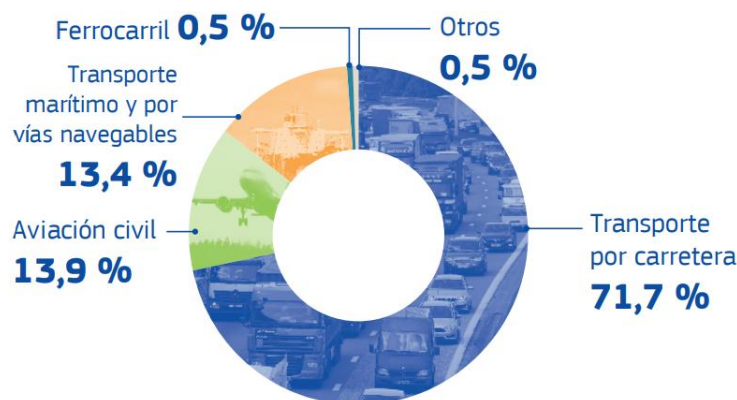


Figura II.1 Cuota de las emisiones de gases de efecto invernadero por modo de transporte (2017)

Fuente: Statistical pocketbook 2019, Comisión Europea.

- Como medidas económicas más significativas que se plantean en el Pacto Verde son:
- Reducir la asignación gratuita de derechos a las compañías aéreas en el marco del comercio de derechos de emisión.
 - Poner fin a las subvenciones a los combustibles fósiles.
 - Ampliar el comercio de derechos de emisión al sector marítimo.
 - Aplicar un sistema de tarificación vial eficaz en la UE.

En el Pacto Verde se sostiene que hay que transportar más mercancías por ferrocarril o vías navegables, y el Cielo Único Europeo debe reducir de forma significativa las emisiones de la aviación sin coste alguno para los consumidores y las empresas. También muestra la necesidad de mejorar la calidad del aire en las inmediaciones de los aeropuertos.

Iniciativas de IATA y OACI.

En 2009 IATA puso tres objetivos medioambientales. Mejorar en un 1,5% la eficiencia de los motores en el periodo 2009-2020, crecimiento neutro de emisiones en línea con el Pacto Verde Europeo después del 2020 y reducción al 50% de emisiones para el 2050 en comparación con 2005.

Los cuatro pilares de ICAO son medidas basadas en el mercado con programas como CORSIA, mejoras tecnológicas en diseño de motores y estructura de las aeronaves, mejora de las infraestructuras junto con mejoras operacionales en la navegación y en los aeropuertos. Por último, el cuarto pilar son los combustibles sostenibles. ICAO ofrece herramientas muy interesantes para calcular emisiones de CO₂, calculadora de ahorro de combustible, etc.

II.2.1 Sistemas de derechos de emisiones y CORSIA.

Es una opción basada en el mercado, tiene el potencial de alentar la innovación tecnológica y mejorar la eficiencia aunque también podrían provocar una reducción de la demanda de viajes aéreos. Es un sistema de derechos de emisión de dióxido de carbono creado por la Unión Europea obliga desde el año 2012 todas las aerolíneas que vuelan a un aeropuerto europeo a pagar una tasa en función de las emisiones. Las emisiones de CO₂ provenientes de la aviación en la UE actualmente son del 3%. Este sistema, también considerado régimen, es el principal mercado de emisiones del mundo y el de mayor tamaño.

El RCDE UE constituye un hito de la política europea de lucha contra el cambio climático y su herramienta principal para reducir de forma rentable las emisiones de gases de efecto invernadero. El tráfico aéreo hacia aeropuertos de la UE, Islandia o Noruega procedente de cualquier parte del mundo está exento del RCDE UE hasta el 31 de diciembre de 2023, solo se aplica a vuelos entre aeropuertos situados en el Espacio Económico Europeo (EEE).

Con el RCDE UE se consigue desarrollar un mercado del carbono que tiene como objetivo reducir las emisiones fomentando los avances tecnológicos poniendo precio al carbón. Desde el 2016 se han reducido en un 8%. Siguiendo con esta dinámica en 2020 las emisiones serán 21% inferiores a las de 2005 y en 2030 se espera que sean un 43% más bajas.

Logros conseguidos¹⁵:

¹⁵ Fuente: European Commission, Climate strategies and targets, Progress made in cutting emissions.

- Reducción de emisiones en un 23% entre 1990 y 2018. El crecimiento de la economía durante el mismo periodo fue de 61%.
- En el periodo 2017-2018 las emisiones más importantes fueron en plantas de producción de energía con un 2%. En el transporte no aéreo, construcción, etc. la reducción fue del 0,9%.
- Las emisiones de la aviación internacional aumentaron en un 19% los últimos 5 años, datos de 2018. Cubiertos por el EU ETS.

Futuro y objetivos 2030:

En contribución al Acuerdo de París, la UE quiere reducir en un 40% las emisiones para el año 2030 en comparación con 1990. Para ello se revisará el EU ETS, se sectorizarán las zonas, se optimizará el espacio de tierra y se emitirá legislación al respecto.

El segundo periodo del Protocolo de Kioto (2013-2020) se diferencia de estas políticas europeas en varios aspectos. Por un lado el Protocolo de Kioto cubre diversos sectores, toma como base diferentes años y es algo más restrictivo porque su objetivo es mantener en el 20% las emisiones durante todo el periodo de 2013-2020 no como objetivo a lograr en 2020.

El futuro del RCDE UE es la fase 4 que se desarrollará en el periodo 2021-2030. Se aumentará el ritmo de reducción de emisiones al 2,2%¹⁶ anual a partir del primer año de la fase, mantener la asignación de derechos y ayudar en la innovación.

CORSIA.

El programa CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) impulsado por ICAO, tiene como objetivo estabilizar las emisiones de CO₂ en los niveles de 2020 al exigir a las aerolíneas que compensen el crecimiento de sus emisiones después de 2020.

CORSIA complementa al resto de medidas al compensar la cantidad de emisiones de CO₂ que no pueden reducirse mediante el uso de mejoras tecnológicas, mejoras operativas y combustibles de aviación sostenibles con unidades de emisiones del mercado de carbono. CORSIA es el primer programa de compensación de carbono en todo el sector, el primer programa de este tipo para abordar las emisiones de una sola industria a nivel mundial, la primera vez que la aviación internacional experimentará un crecimiento neutral en carbono.

En la grafica siguiente puede verse que el mayor potencial de reducción de emisiones de CO₂ está en los combustibles sostenibles y CORSIA, seguido por la mejora tecnológica y las mejoras operacionales.

¹⁶ Fuente: Comisión Europea, Régimen de comercio de derechos de emisión de la UE (RCDE UE).

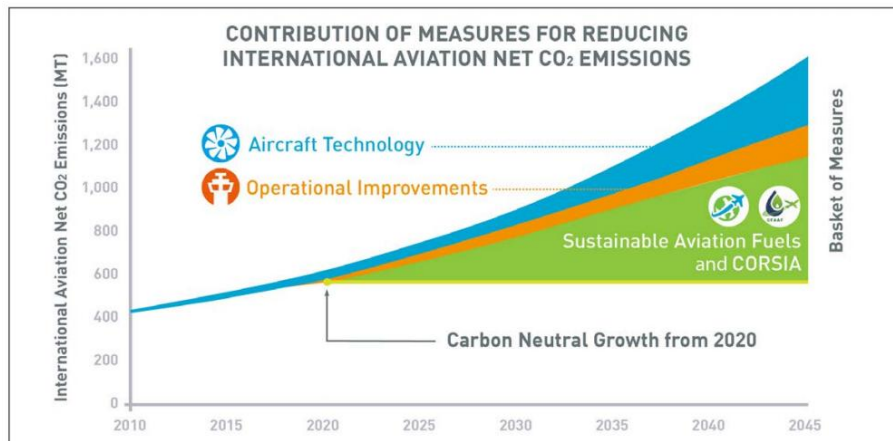


Figura II.2 Contribución a la reducción de emisiones de diferentes medidas. Fuente: European Aviation Environmental Report 2019

Se estima que entre 2021 y 2035, el sector de la aviación internacional tendría que compensar unas 2.500 millones de toneladas de emisiones de CO₂ para lograr un crecimiento neutral en carbono.

A las aerolíneas se les requerirá que monitoricen las emisiones en todas sus rutas internacionales. Compensar las emisiones de las rutas con la compra de unidades de emisión elegibles generadas por proyectos que reducen las emisiones en otros sectores.

Durante el período 2021-2035, se estima que se compensará alrededor del 80% de las emisiones por encima de los niveles de 2020. Esto se debe a que la participación en las primeras fases es voluntaria para los estados, y hay excepciones para aquellos con baja actividad de aviación. Todos los países de la UE se unirán al esquema desde el principio. Sus acciones irán en consonancia con el Acuerdo de París. Además del programa CORSIA, OACI ha adoptado una nueva norma innovadora para responder al impacto de las emisiones de CO₂ de la aviación en el clima mundial. En palabras del Presidente del Consejo de la OACI, Dr. Olumuyiwa Benard Aliu, “el transporte aéreo es el primer sector del mundo que adopta una norma de diseño relativa a las emisiones de CO₂”. Se trata de una norma que aplicará a nuevos diseños de tipo de aviones a partir de 2020 y a diseños de tipo de aviones que ya están en producción, a partir de 2023. Los aviones en producción que no cumplan la norma a partir de 2028 ya no podrán seguir fabricándose, a menos que se modifiquen los diseños adecuadamente.¹⁷

II.2.2 Gravámenes medioambientales.

Se trata básicamente de impuestos. Para tener un efecto significativo estos gravámenes deben ser impuestos en un marco internacional, cosa que hoy día no existe y además parece bastante difícil de conseguir. La eficacia de estas medidas no es probada y presenta conflictos de intereses con otros medios de transporte como el tren de alta velocidad. Aproximadamente el 10% de los viajes en avión europeos podrían hacerse en tren.

¹⁷ Fuente: Comunicado de prensa OACI, Montreal, 6 de marzo de 2017.

Anexo III. Tabla de proyectos de aviones híbridos y eléctricos.

Tabla III.1 Proyectos de aviones híbridos y eléctricos, 2019.¹⁸

Project	Type	Category	MTOW (KG)	Pax	Target Entry in Service	Cruise altitude (FT)	Cruise Speed (kt)	Payload (KG)	Range (KM)	Engine power (kW)
Airbus/Siemens/Rolls Royce E-Fan X	Hybrid-electric	Large commercial aircraft	N.A.	100	2030	N.A.	N.A.	6650	N.A.	2000
NASA X-57 Maxwell	Electric	General Aviation/recreational aircraft	N.A.	2	2020-2021	9000	149.464	N.A.	160	60 +10
Zunum Aero ZA10	Hybrid-electric	business aircraft	5216.3	12	2020	max. 25,000	295	1134	1127	1000+500
Uber Elevate	Electric	VTOL	N.A.	up to 4	2023	1,000 - 2,000	130	498.96	97	N.A.
Lilium	Electric	VTOL	639.6	5	2025	3300	160	200	300	320
Pipistrel Alpha Electro	Electric	General Aviation/recreational aircraft	549.8	2	2018	N.A.	85	200	600	60
Kitty Hawk Cora	Electric	VTOL	N.A.	2	2022	up to 3000	95	N.A.	100	N.A.
Kitty Hawk Flyer	Electric	VTOL	N.A.	1		10	17	N.A.	10.7	
Airbus (A ³) Vahana	Electric	VTOL	725.7	1	2020	N.A.	95	113	100	360
Airbus City Airbus	Electric	VTOL	2199.2	4	2023	N.A.	59	N.A.	96	8*100
Airbus/Audi Pop up	Electric	VTOL	N.A.	2	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	130	N.A.
Boeing Aurora eVTOL	Electric	VTOL	798.3	2	2020	N.A.	48.6	N.A.	N.A.	N.A.
Ehang 184	Electric	VTOL	N.A.	1	N.A.	9843	54	100	16	106
Volocopter 2X	Electric	VTOL	450	2	2018	6562	27	160	27	N.A.
Eviation Alice	Electric	business aircraft	6349.8	9	2021	32 808	240	1250	1046	N.A.

¹⁸ Fuente: ICAO <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/electric-aircraft.aspx>

Wright Electric/Easy Jet	Electric	Large commercial aircraft	N.A.	at least 120	2027	N.A.	N.A.	N.A.	539	3*260
Extra aircraft/Siemens Extra 330LE	Electric	General Aviation/recreational aircraft	1000.1	2	2016	9843	184 (top)	N.A.	N.A.	260
Magnus Aircraft/Siemens eFusion	hybrid diesel-electric	General Aviation/recreational aircraft	600.1	2	N.A.	N.A.	100-130	N.A.	1100	60
Solar Impulse 2	Electric	General Aviation/recreational aircraft	N.A.	1	N.A.	27887	38	N.A.	N.A.	N.A.
Bye Aerospace Sun Flyer 2	Electric	General Aviation/recreational aircraft	861.8	2	N.A.	N.A.	55-135	363	N.A.	90
Ampaire TailWind	Electric	business aircraft	N.A.	9	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	161	N.A.
Embraer Dreammaker	Electric	VTOL	N.A.	N.A.	2024	2,600-3,300	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Bell Nexus	Electric	VTOL	N.A.	4	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Boeing Sugar VOLT	Hybrid-electric	Large commercial aircraft	N.A.	135	2030-2050	N.A.	N.A.	N.A.	6482	N.A.
DigiSky SkySpark	Electric	General Aviation/recreational aircraft	N.A.	2	N.A.	N.A.	162 (top)	N.A.	500	65
Hamilton aEro	Electric	General Aviation/recreational aircraft	420	1	2017	N.A.	92	N.A.	160	80
Dufour aEro 2	Electric	VTOL	N.A.	2	N.A.	N.A.	173	N.A.	120	N.A.
PC Aero Elektra One Solar	Electric	General Aviation/recreational aircraft	300	1	N.A.	19600	76	100	600	32
PC Aero Elektra Two Solar	Electric	General Aviation/recreational aircraft	450	2	N.A.	65616	37.8	200	almost unlimited	23

Anexo IV. Aeropuertos alternativos.

Tabla IV.1 Aeropuertos alternativos.

From	Type of traffic	to Regions	Amount	Observation
LFPG Paris	All-Cargo	All	50% LFOB/Beauvais	About 10% of total flights at LFPG; but given timing of cargo does it really save capacity?
	Scheduled/ Charter	ESRA/Other Europe	20% LFOB/Beauvais; 10% LFPT/Pontoise	
EDDF Frankfurt	All-Cargo	All	45% EDDK/Koln, 45% EDDP/Leipzig	Though only about 5% of total
	Business Aviation	All	90% EDFE/Egelsbach	
	Scheduled/ Charter	ESRA/Other Europe	10% EDFH/Hahn, 20% EDDB/Berlin	(Not so 'local')
EGLL London	Scheduled/ Charter	ESRA/Other Europe	15% EGMC/Southend 15% EGGW/Luton	Transfer to EGKK and EGSS considered in CG13 have been taken out of the list of possible options as they will have little space for extra operations from EGLL
EHAM Amsterdam	All-Cargo	All	80% EHRD/Rotterdam	EHAM is 5% All-Cargo (2% business)
	Scheduled/ Charter	ESRA/Other Europe	10% EHLE/Lelystad 20% EHEH/Eindhoven, 20% EHRD/Rotterdam	(EHEH and EHRD are rank 2 and 4 in NL)
LEBL Barcelona	Scheduled/ Charter	ESRA/Other Europe	15% LEGE/Girona 15% LERS/Reus	
EKCH Copenhagen	Scheduled/ Charter	ESRA/Other Europe	20% ESMS/Malmo	
	Business Aviation	All	90% EKRK/Roskilde	
LEMD Madrid	Scheduled/ Charter	ESRA/Other Europe	20% LEGT/Getafe	
LIMC Milan	Scheduled/ Charter	ESRA/Other Europe	20% LIML/Linate 15% LIME/Bergamo	
EDDM Munich	Scheduled/ Charter	ESRA/Other Europe	20% EDMA/Augsburg 20% EDJA/Memmingen	
ENGM Oslo	Scheduled/ Charter	ESRA/Other Europe	20% ESMS/Malmo	
LIRF Rome	Scheduled/ Charter	ESRA/Other Europe	20% LIRA/Ciampino	

Anexo V. Legislación aplicable.

El derecho internacional considera al Estado el titular de la soberanía sobre el espacio aéreo de su territorio. La regulación básica se puede consultar en el Convenio sobre la Aviación Civil Internacional. En el artículo 9 del citado convenio se establece que cada estado contratante puede restringir zonas de su espacio aéreo por motivos de seguridad pública o medioambiental. Que sería justo el caso que nos ocupa.

- Constitución Española. En el Derecho español, la libertad de circulación es reconocida como Derecho Fundamental por la Constitución Española en su art.19 y como mandato a los poderes públicos en su art.139.2.

La prohibición de sobrevolar ciertas zonas del territorio español podría entenderse como inconstitucional por el artículo 19.

- Directiva 2004/38 de la Unión Europea. A nivel europeo la libertad de circulación se establece en la directiva mencionada.

La Doctrina jurídica y la Jurisprudencia han puesto tradicionalmente de relieve que la libertad de circulación corresponde exclusivamente a la persona y no a los medios de que ésta se valga para circular, permaneciendo libre el legislador para regular el uso de éstos.

- Real Decreto 1180/2018, de 21 de septiembre, por el que se desarrolla el Reglamento del aire y disposiciones operativas comunes para los servicios y procedimientos de navegación aérea
- Boletín Oficial del Estado, BOE-A-2018-15406, del 10 de noviembre de 2018, capítulo IV, artículo 19: Zonas restringidas para la protección medioambiental y artículo 22.
- Reglamento (UE) No 716/2014 de La Comisión 716/2014, la regulación europea que entra en vigor en enero de 2022. Para un tráfico aéreo libre, como se propone en el "Free Route".

En cuanto a normativa de derechos de emisiones y de medioambiente destacan algunas:

- 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 (DO L 275, 25.10.2003, pp. 32-46)
- Directiva (UE) 2018/410 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 14 de marzo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2003/87/CE para intensificar las reducciones de emisiones de forma eficaz en relación con los costes y

facilitar las inversiones en tecnologías hipocarbónicas, así como la Decisión (UE) 2015/1814 (Texto pertinente a efectos del EEE.)

- Decisión (UE) 2018/853 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifican el Reglamento (UE) n.º 1257/2013 y las Directivas 94/63/CE y 2009/31/CE del Parlamento Europeo y del Consejo y las Directivas 86/278/CEE y 87/217/CEE del Consejo, en lo que atañe a las normas de procedimiento en el ámbito de la información en materia de medio ambiente, y por la que se deroga la Directiva 91/692/CEE del Consejo (DO L 150, 14.6.2018, pp. 155-161)
- Decisión (UE) 2015/1814 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 6 de octubre de 2015, relativa al establecimiento y funcionamiento de una reserva de estabilidad del mercado en el marco del régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero en la Unión, y por la que se modifica la Directiva 2003/87/CE (DO L 264, 9.10.2015, pp. 1-5)
- 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.
- La Asamblea de OACI aprobó en 2004 la decisión del CAEP/6 de reducir los límites un 12% adicional, aplicable a nuevos motores a partir del 01/01/2009.

En el plano europeo se han emitido normativas destinadas a mejorar la gestión del espacio aéreo.

- Regulación (EC) N° 549/2004, 550/2004, 551/2004 y 552/2004, son regulaciones básicas en el marco del Cielo Único Europeo. Con su revisión de la regulación (EC) n° 1070/2009 destinado a aumentar el rendimiento general del sistema de gestión del tráfico aéreo en Europa. Esta segunda revisión fue elaborada para el SES II.
- Regulación (EU) N° 677/2011 para la gestión de la red de navegación aérea.
- Regulation (EU) No 2019/123 en la que se especifican las tareas del Network Manager.
- Commission Implementing Decision (EU) 2019/709 de 6 Mayo de 2019 en el que se renueva a Eurocontrol como Network Manager.
- Regulation 1070/2009 - Improving the Performance of European Aviation System

Legislación medioambiental

- Reales Decretos 1073/2002 y 1796/2003 valores límites de emisiones de gases contaminantes.

A handwritten signature in blue ink, written in a cursive style. The signature appears to be 'Tsonko Totev' and is enclosed within a double-line rectangular border.

Tsonko Totev Totev