



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA


ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial
y Diseño Industrial

Análisis del impacto ambiental de la flota de aeronaves
comercial actual y futura mediante análisis del ciclo de vida

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

AUTOR/A: Gutiérrez Palmeiro, Nuria

Tutor/a: López Juárez, Marcos

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

RESUMEN

El impacto medioambiental es uno de los temas más tratados en la actualidad dentro del sector aeronáutico, ya que las previsiones a futuro muestran un aumento notable de operaciones aéreas y, por tanto, un mayor número de emisiones a la atmósfera de gases de efecto invernadero y otros contaminantes.

El análisis del ciclo de vida o Life-Cycle Assessment (LCA) evalúa el impacto ambiental de un producto durante todas las fases de su ciclo de vida, desde su producción y vida útil hasta su desecho y tratamiento de residuos. El objetivo de este Trabajo de Fin de Máster es aplicar LCA a la flota actual de aeronaves en operación dentro de la Unión Europea para computar su impacto ambiental neto y emisiones contaminantes derivadas del uso de combustibles aeronáuticos convencionales. El análisis de cada aeronave tendrá en cuenta los materiales empleados, los procesos de fabricación y mantenimiento, las emisiones medias a lo largo de su vida útil y la gestión de residuos al final del ciclo.

Tras este primer análisis de las aeronaves actuales se efectúa una comparación con el posible impacto ambiental de la flota de aeronaves futura, considerando tanto un escenario positivo con cambios significativos en las políticas medioambientales, como un escenario negativo sin cambios en dichas políticas.

Se considerará el impacto medioambiental a futuro de la incorporación de nuevos materiales, métodos de fabricación y uso de nuevos combustibles como el hidrógeno o los combustibles sostenibles de aviación (SAF).

Palabras clave: Análisis de Ciclo de Vida, Impacto ambiental, Emisiones, Aeronaves, Combustibles Sostenibles de Aviación, Hidrógeno.

RESUM

L'impacte mediambiental és un dels temes més tractats en l'actualitat dins del sector aeronàutic, ja que les previsions a futur mostren un augment notable d'operacions aèries i, per tant, un major nombre d'emissions a l'atmosfera de gasos d'efecte d'hivernacle i altres contaminants.

L'anàlisi del cicle de vida o Life-Cycle Assessment avalua l'impacte ambiental d'un producte durant totes les fases del seu cicle de vida, des de la seua producció i vida útil fins a la seua deixalla i tractament de residus. L'objectiu d'este Treball de Fi de Màster és aplicar LCA a la flota actual d'aeronaus en operació dins de la Unió Europea per a computar el seu impacte ambiental net i emissions contaminants derivades de l'ús de combustibles aeronàutics convencionals. L'anàlisi de cada aeronau tindrà en compte els materials emprats, els processos de fabricació i manteniment, les emissions mitjanes al llarg de la seua vida útil i la gestió de residus al final del cicle.

Després d'esta primera anàlisi de les aeronaus actuals s'efectua una comparació amb el possible impacte ambiental de la flota d'aeronaus futura, considerant tant un escenari positiu amb canvis significatius en les polítiques mediambientals, com un escenari negatiu sense canvis en estes polítiques.

Es considerarà l'impacte mediambiental a futur de la incorporació de nous materials, mètodes de fabricació i ús de nous combustibles com l'hidrogen o els combustibles sostenibles d'aviació (SAF).

Paraules clau: Anàlisi de Cicle de Vida, Impacte ambiental, Emissions, Aeronaus, Combustibles Sostenibles d'Aviació, Hidrogen.

ABSTRACT

The environmental impact is one of the most discussed topics currently within the aeronautical sector, since future forecasts show a notable increase in air operations and, therefore, a greater number of greenhouse gas emissions into the atmosphere and other contaminants.

The Life-Cycle Assessment (LCA) evaluates the environmental impact of a product during all phases of its life cycle, from its production and useful life to its disposal and waste treatment. The objective of this Master's Thesis is to apply LCA to the current fleet of aircraft in operation within the European Union to compute their net environmental impact and polluting emissions derived from the use of conventional aeronautical fuels. The analysis of each aircraft will take into account the materials used, the manufacturing and maintenance processes, the average emissions throughout its operational life and waste management at the end of the cycle.

After this first analysis of the current aircraft, a comparison is made with the possible environmental impact of the future aircraft fleet, considering both a positive scenario with significant changes in environmental policies, and a negative scenario without changes in said policies.

The future environmental impact of the incorporation of new materials, manufacturing methods and use of new fuels such as hydrogen or sustainable aviation fuels (SAF) will be considered.

Keywords: Life-Cycle Assessment, Environmental Impact, Emissions, Aircraft, Sustainable Aviation Fuels, Hydrogen.

LISTA DE ACRÓNIMOS

AC Aircraft Characteristics

ACV Análisis de Ciclo de Vida

APU Auxiliary Power Unit

ATJ Alcohol To Jet

BOM Bill Of Materials

CHJ Catalytic Hydrothermolysis Jet

CCS Carbon Capture and Storage

CCU Carbon Capture and Utilisation

CDO Decarboxylation

CFRP Carbon Fiber-Reinforced Polymers

CORSIA Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation

DAC Direct Air Capture

EASA European Union Aviation Safety Agency

ECAC European Civil Aviation Conference

EoL End-of-Life

FT Fischer-Tropsch

GFRP Glass Fiber-Reinforced Polymers

GHG Greenhouse Gases

GWP Global Warming Potential

HDO Hydrodeoxygenation

HEFA Hydroprocessed Esters and Fatty Acids

IATA International Air Transport Association

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change

LCA Life-Cycle Assessment

LHV Lower Heating Value

LQ Large Quad

LTA Large Twin Aisle

LTO Landing and Take-Off Cycle

MEW Manufacturer's Empty Weight

MTOW Maximum Take-Off Weight

MZFW Maximum Zero-Fuel Weight

NI No Improvements

ODS Objetivos de Desarrollo Sostenible

OEW Operating Empty Weight

ONU Organización de las Naciones Unidas

PM Particulate Matter

P-R Payload-Range

PtL Power-to-Liquid

PTW Pump To Wake

RWGS Reverse Water Gas Shift

SA Single Aisle

SAF Sustainable Aviation Fuel

SI Significant Improvements

STA Small Twin Aisle

SPK Synthetic Paraffinic Kerosene

TCDS Type-Certificate Data Sheet

UE Unión Europea

WBM Weight and Balance Manual

WTP Well To Pump

WTW Well To Wake

Índice general

1	Introducción	13
1.1.	Contextualización	13
1.2.	Justificación	19
1.3.	Objetivos	21
1.4.	Estructura del trabajo	22
2	Metodología	25
2.1.	Estructura general	25
2.2.	Análisis del ciclo de vida	27
2.3.	Alcance del proyecto	28
2.4.	Escenario	35
2.5.	Condiciones de contorno del sistema y flujos ambientales	37
2.6.	Categorías del impacto y unidades funcionales	38
2.7.	Inventario del ciclo de vida	39
3	Análisis de ciclo de vida de la flota actual	50
3.1.	Listado y análisis de la flota	50
3.2.	Análisis Cradle-to-Gate	57
3.3.	Análisis Well-to-Wake	62
3.4.	Análisis Cradle-to-Grave	67
4	Análisis de ciclo de vida de la flota a futuro	71
4.1.	Normativa y objetivos	71
4.2.	Combustibles sostenibles	73
4.3.	Otras medidas de reducción de impacto ambiental	78
4.4.	Impacto ambiental de la flota futura	79
5	Conclusiones y trabajos futuros	98
5.1.	Conclusiones	98
5.2.	Hipótesis y limitaciones del estudio	101
5.3.	Trabajos futuros	102
6	Pliego de Condiciones	104

7 Presupuesto	106
7.1. Cómputo de tiempo	106
7.2. Cómputo de precios unitarios	106
7.3. Cómputo total	107
REFERENCIAS	108

Índice de figuras

1.1. Número de vuelos en tiempo real. <i>Fuente: Flightradar24 [2]</i>	13
1.2. Número de pasajeros estimado para 2040 y 2050. <i>Fuente: ACI [3]</i>	14
1.3. Porcentaje de crecimiento anual europeo 2017-2040. <i>Fuente: EUROCONTROL [4]</i>	15
1.4. Estimación de operaciones diarias adicionales para 2040. <i>Fuente: EUROCONTROL [4]</i>	16
1.5. Porcentaje de CO_2 anual derivado de la aviación. <i>Fuente: Our World in Data [12]</i>	18
1.6. Objetivo de Desarrollo Sostenible nº7. <i>Fuente: ONU [13]</i>	20
1.7. Objetivo de Desarrollo Sostenible nº12. <i>Fuente: ONU [13]</i>	20
1.8. Objetivo de Desarrollo Sostenible nº13. <i>Fuente: ONU [13]</i>	20
1.9. Diagrama de objetivos principales y secundarios.	21
2.1. Estructura general de la metodología.	26
2.2. Ciclo de vida de un producto según LCA. <i>Fuente: OneClick LCA [17]</i>	27
2.3. Etapas simplificadas del ciclo de vida de una aeronave.	28
2.4. Distribución de materiales de Airbus A350. <i>Fuente: Airbus [18]</i>	29
2.5. Vuelos según su alcance por año. <i>Fuente: EUROCONTROL [21]</i>	31
2.6. Diagrama entre sectores del EoL. <i>Fuente: ENVISA [22]</i>	33
2.7. Emisiones GHG-100 entre materiales nuevos y reciclados. <i>Fuente: ENVISA [22]</i>	34
2.8. Países miembros de la Unión Europea. <i>Fuente: FRA [24]</i>	35
2.9. Emisiones GHG-100 por kg de Jet fuel para distintos escenarios. <i>Fuente: FRA [24]</i>	36
2.10. Flujos ambientales y condiciones de contorno del ACV.	37
2.11. Faseado de un análisis típico <i>cradle-to-grave</i>	37
2.12. Ciclo WTW de Jet Fuel convencional. <i>Fuente: GREET [30]</i>	40
2.13. Refinado de Jet Fuel convencional. <i>Fuente: GREET</i>	42
2.14. Obtención de aceite de camelina. <i>Fuente: GREET</i>	43

2.15. Refinado de Jet Fuel a partir de aceite de camelina. <i>Fuente: GREET</i>	43
2.16. Obtención de H_2 y CO_2 para RWGS. <i>Fuente: GREET</i>	44
2.17. Obtención de LH_2 mediante electrólisis. <i>Fuente: GREET</i>	44
2.18. Distribución en porcentaje de aviones por fabricante.	46
2.19. Diagrama Payload-Range del A350-900. <i>Fuente: [35]</i>	47
2.20. Consumo por km vs rango en A350-900 <i>Fuente: [35]</i>	47
2.21. Consumo por pasajero y 100 km del A350-900. <i>Fuente: [35]</i>	48
3.1. Nº de aviones comerciales activos en la UE. Comparación entre modelos de aeronaves.	52
3.2. Categorización de aeronaves y rangos típicos. <i>Fuente: GREET [36]</i>	53
3.3. Consumo de combustible por operación típica. Comparación entre modelos de aeronaves.	55
3.4. Consumo de combustible por kilómetro recorrido. Comparación entre modelos de aeronaves.	56
3.5. Consumo de combustible por pasajero. Comparación entre modelos de aeronaves.	56
3.6. Consumo en kg/km frente a OEW por aeronave.	57
3.7. Contribución de los materiales de cada aeronave a las emisiones GHG-100 - AIRBUS.	60
3.8. Contribución de los materiales de cada aeronave a las emisiones GHG-100 - BOEING.	61
3.9. Emisiones GHG-100 en fase Cradle-to-Gate según el OEW de la aeronave.	62
3.10. Emisiones por operación típica en LTO. <i>Fuente: GREET [36]</i>	65
3.11. Emisiones Well-to-Wake por OEW y modelo de aeronave.	67
3.12. Contribución de cada fase a las emisiones GHG-100 totales - AIRBUS.	69
3.13. Contribución de cada fase a las emisiones GHG-100 totales - BOEING.	69
3.14. Emisiones Cradle-to-Grave por OEW y modelo de aeronave.	70
4.1. Contribuciones a la neutralidad climática 2050. <i>Fuente: IATA[51]</i>	73
4.2. Reacción de hidrogenación en HEFA. <i>Fuente: CBSCI [55]</i>	74
4.3. Proceso Reverse Water Gas Shift Reaction (RWGS). <i>Fuente: hte [57]</i>	76
4.4. Contribución de emisiones GHG-100 por producción de combustible. Escenario 2030 SI (AIRBUS).	82
4.5. Contribución de emisiones GHG-100 por producción de combustible. Escenario 2030 SI (BOEING).	83
4.6. Contribución de emisiones GHG-100 por producción de combustible. Escenario 2040 SI (AIRBUS).	85
4.7. Contribución de emisiones GHG-100 por producción de combustible. Escenario 2040 SI (BOEING).	86
4.8. Contribución de emisiones GHG-100 por producción de combustible. Escenario 2050 SI (AIRBUS).	88

4.9. Contribución de emisiones GHG-100 por producción de combustible. Escenario 2050 SI (BOEING).	89
4.10. Contribución de emisiones GHG-100 por producción de combustible. Escenario 2050 SI con H_2 (AIRBUS).	92
4.11. Contribución de emisiones GHG-100 por producción de combustible. Escenario 2050 SI con H_2 (BOEING).	93
4.12. Emisiones totales en 2050 con y sin el criterio de contabilizar emi- siones SAF.	95
4.13. Emisiones totales de un A320-200 por operación para cada escenario.	96
4.14. Porcentajes de variación de emisiones respecto al estado actual. . . .	97
5.1. Comparativa entre ACV propio y de J. Verstraete para el A320-200. .	102

Índice de cuadros

2.1. Factores de multiplicación GWP-100	38
2.2. Distribución en porcentaje de aviones por fabricante.	45
3.1. Listado de aeronaves activas de AIRBUS en la UE	51
3.2. Listado de aeronaves activas de BOEING en la UE	51
3.3. Consumos típicos de la flota AIRBUS	54
3.4. Consumos típicos de la flota BOEING	54
3.5. Desglose de materiales en aeronaves de AIRBUS.	58
3.6. Desglose de materiales en aeronaves de BOEING.	58
3.7. Emisiones GHG-100 por kg de material según GREET 2023 [kg CO2 eq./kg]	58
3.8. Cálculo de la contribución del peso estructural a partir del WBM . .	59
3.9. GHG-100 por material de producción de aeronaves AIRBUS.	60
3.10. GHG-100 por material de producción de aeronaves BOEING.	61
3.11. Consumo total de la fase de operación (60000 FH) - AIRBUS.	63
3.12. Consumo total de la fase de operación (60000 FH) - BOEING.	63
3.13. Emisiones derivadas de producción de combustible - AIRBUS.	64
3.14. Emisiones derivadas de producción de combustible - BOEING.	64
3.15. Emisiones por contaminante y kg de combustible: LTO y crucero. . .	65
3.16. Emisiones GHG-100 por operación y en 60000 FH - AIRBUS.	66
3.17. Emisiones GHG-100 por operación y en 60000 FH - BOEING.	66
3.18. Emisiones GHG-100 totales, Cradle-To-Grave - AIRBUS.	68

3.19. Emisiones GHG-100 totales, Cradle-To-Grave - BOEING.	68
4.1. Porcentaje mínimo de SAF por año. <i>Fuente: ReFuelEU [49]</i>	72
4.2. Porcentajes de producción de tipo de combustible por década	80
4.3. Emisiones unitarias por 1 kg de combustible para cada escenario.	80
4.4. Emisiones por producción de combustible. Escenario 2030 (AIRBUS).	81
4.5. Emisiones por producción de combustible. Escenario 2030 (BOEING).	82
4.6. Emisiones por producción de combustible. Escenario 2040 (AIRBUS).	84
4.7. Emisiones por producción de combustible. Escenario 2040 (BOEING).	85
4.8. Emisiones por producción de combustible. Escenario 2050 (AIRBUS).	87
4.9. Emisiones por producción de combustible. Escenario 2050 (BOEING).	88
4.10. Propiedades del hidrógeno y el Jet A-1.	90
4.11. Emisiones por kg de combustible. Escenario 2050 con H_2	90
4.12. Emisiones por producción de combustible. Escenario 2050 con hidrógeno (AIRBUS).	92
4.13. Emisiones por producción de combustible. Escenario 2050 con hidrógeno (BOEING).	93
7.1. Presupuesto: cómputo de tiempo	106
7.2. Presupuesto: gastos materiales y licencias de software.	107
7.3. Presupuesto: gastos de personal.	107
7.4. Presupuesto: gastos de energía.	107
7.5. Presupuesto: Cómputo total.	107

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se exponen los motivos y objetivos del presente trabajo, acompañados del contexto actual que justifica el análisis de ciclo de vida de la flota de aeronaves comerciales en la UE.

1.1. Contextualización

El transporte aéreo de pasajeros tiene más importancia que nunca en términos sociales, económicos y ambientales. En 2023, la media global de vuelos diarios asciende a 120000, con cifras ya en ascenso para 2024 [1]. Un volumen tan elevado de vuelos diarios supone la emisión cantidades no despreciables de gases de efecto invernadero a la atmósfera. En la Figura 1.1 se puede ver la saturación del espacio aéreo en tiempo real y como el uso de la aviación comercial es cada vez más habitual.



Figura 1.1: Número de vuelos en tiempo real. *Fuente: Flightradar24 [2]*

Numerosos estudios pronostican que esta tendencia creciente continuará avanzando a ritmos vertiginosos a medio y largo plazo, siendo necesario interponer medidas que garanticen la sostenibilidad medioambiental del sector aeronáutico. Contabilizando incluso el descenso del número de operaciones aéreas ocasionado por la pandemia en 2020, se observa como en la Figura 1.2 se prevé una recuperación de la demanda hasta duplicar el número de pasajeros en 2042 y, finalmente en 2052, un aumento del 250% respecto del número de pasajeros en este 2024, con un total de 24 mil millones de pasajeros globales anuales en aviación comercial.

En la actualidad, los vuelos domésticos suponen un 59% respecto del número de operaciones totales y los vuelos internacionales un 41%; en el 2052, se prevé que estos porcentajes se acerquen hasta un 54% y 46% respectivamente.

Long-term global passenger traffic forecast 2016–2052

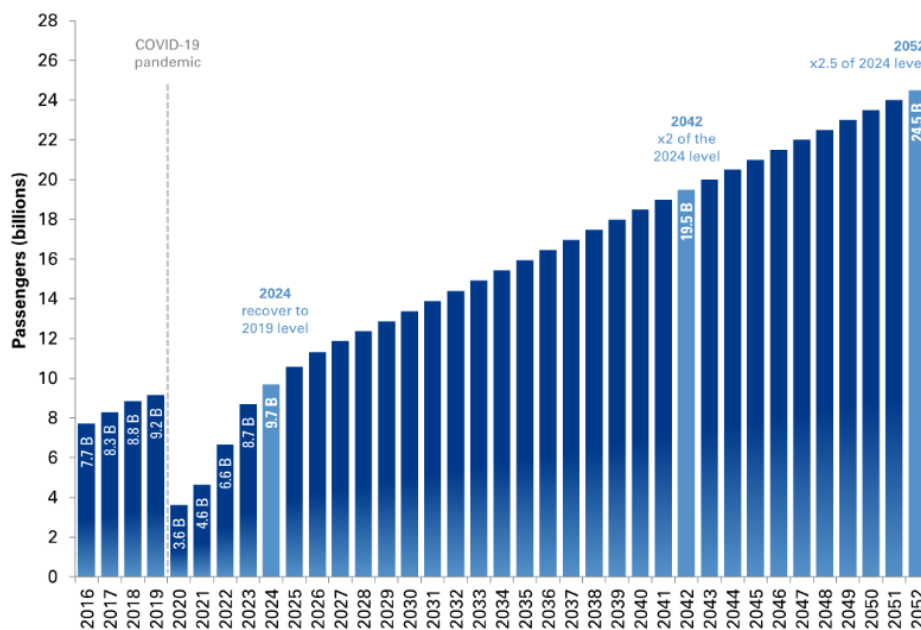


Figura 1.2: Número de pasajeros estimado para 2040 y 2050. Fuente: ACI [3]

En cuanto al crecimiento en países europeos, *EUROCONTROL* estima un incremento porcentual anual medio de un 1,9% del número de operaciones en países miembros de la ECAC, con un especial aumento en Europa del Este, tal y como se muestra en la Figura 1.3. España prevé un aumento anual del 1,8%.

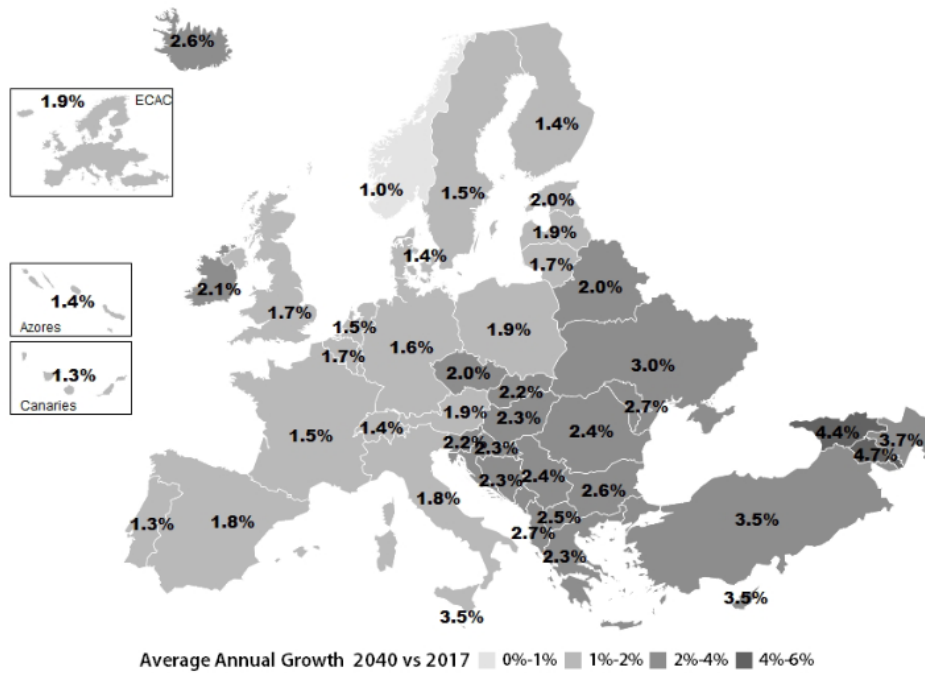


Figura 1.3: Porcentaje de crecimiento anual europeo 2017-2040.
 Fuente: EUROCONTROL [4]

Estos porcentajes de crecimiento se traducen en un notable aumento de las operaciones aéreas que satisfagan la demanda prevista para el año 2040. En la Figura 1.4 se muestra la distribución de las operaciones adicionales necesarias por cada región diariamente, llegando en algunas zonas a +100 vuelos diarios adicionales.

En capítulos siguientes se analiza la emisión de gases de efecto invernadero durante el ciclo de vida de las distintas aeronaves comerciales que operan dentro de la UE en el presente y en las décadas de 2030, 2040 y 2050. El aumento de operaciones anteriormente mencionado se tiene en cuenta en los análisis del ciclo de vida y, por tanto, influyen en la estimación de emisiones futuras. Una vez revisados los resultados obtenidos se puede cuantificar y evaluar el impacto de aplicar o no normativa medioambiental e incorporar nuevas tecnologías y combustibles sostenibles.

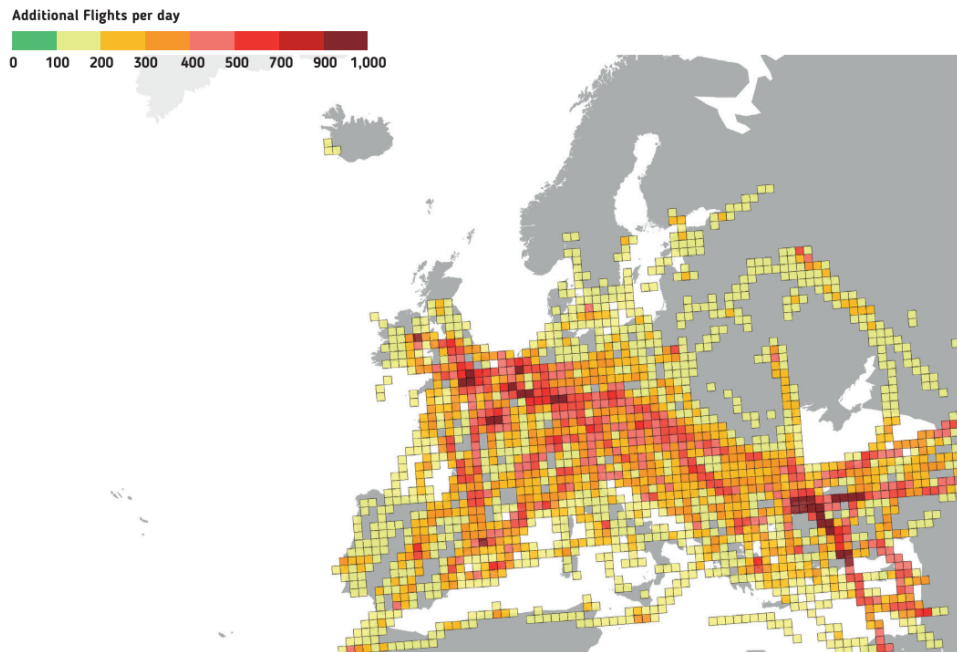


Figura 1.4: Estimación de operaciones diarias adicionales para 2040.

Fuente: EUROCONTROL [4]

Principales contaminantes del sector aeronáutico

Las aeronaves producen emisiones contaminantes a lo largo de todo su ciclo de vida, incluyendo las fases de diseño, producción y ensamblaje de sus componentes, así como el impacto ambiental causado por el vertido de partes desechadas tras el fin de su vida útil. Sin embargo, es en la fase de operación de las aeronaves donde se contabiliza el mayor número de contaminantes, ya que se producen emisiones directas derivadas del uso de combustibles aeronáuticos.

Entre las distintas categorías de impacto ambiental que pueden atribuirse a la operación de aeronaves se encuentran, entre otros, la contaminación acústica y la emisión de gases y partículas a la atmósfera: el ruido causado especialmente en las inmediaciones de los aeropuertos afecta negativamente tanto a las personas como a la fauna local, alterando los patrones de conducta de animales y afectando al equilibrio natural de sus hábitats. Para las personas, experimentar ruido excesivo durante largos periodos de tiempo puede provocar pérdida de audición, alteraciones del sueño e incluso complicaciones graves de salud resultantes en muerte prematura [5]. Para reducir la contaminación acústica, actualmente se intenta evitar en lo posible la aproximación de aviones a áreas urbanas y espacios protegidos, además de implementar nuevos diseños

de motores y góndolas que en la actualidad han conseguido reducir hasta en un 75% el ruido total de los aviones en los últimos 50 años [6]. La contaminación acústica no será medida en este análisis de ciclo de vida.

Por otro lado, durante el vuelo de aeronaves propulsadas por combustibles aeronáuticos convencionales como el queroseno se generan emisiones contaminantes derivadas de la combustión. Los gases y partículas contaminantes más destacables son los siguientes [7] [8]:

- **Dióxido de carbono (CO_2):** es el gas de efecto invernadero más representativo y resulta de la combustión completa de combustibles fósiles. Es responsable directo de efectos negativos como la reducción de la capa de ozono.
- **Vapor de agua (H_2O):** es también resultante de la combustión completa y, aunque es inocuo para la salud, se asocia a la formación de cirros (nubes altas compuestas de cristales de hielo) y estelas de vapor o “contrails” que atrapan una parte de la radiación solar reflejada por la superficie de la Tierra y consecuentemente contribuye al calentamiento global.
- **Óxidos de nitrógeno (NO_x):** es un producto cada vez más presente en la combustión por el aumento de presión y temperatura en los motores aeronáuticos modernos. Provoca la formación de ozono (O_3) en la troposfera. Además, son causantes de enfermedades crónicas respiratorias y cerebrovasculares y desequilibrios en ecosistemas como lluvia ácida o niebla fotoquímica (smog).
- **Monóxido de carbono (CO):** es producto de una combustión incompleta y extremadamente tóxico para el ser humano: provoca una variedad de síntomas por dificultar el transporte de oxígeno en sangre y, en altas exposiciones, la muerte.
- **Dióxido de azufre (SO_2):** se produce cuando el azufre presente en los combustibles fósiles se pone en contacto y reacciona con el oxígeno del medio. Es un compuesto tóxico que afecta al sistema respiratorio y a fauna y flora si es disuelto en agua o absorbido por el suelo.
- **Hidrocarburos (HC):** cuando son producto de una combustión incompleta, tienen mayor efecto invernadero que el CO_2 y tienen propiedades carcinógenas y contaminantes.
- **Partículas (PM):** también son resultado de una combustión incompleta y tóxicas para el ser humano: las partículas de 10 micras o menores (PM_{10}) penetran en el sistema respiratorio y las menores a 2.5 micras ($PM_{2,5}$) pueden alcanzar los alveolos pulmonares y provocar desde grandes complicaciones hasta muertes prematuras [9].

Los gases de efecto invernadero contribuyen al calentamiento global por ser capaces de absorber radiación infrarroja que luego es emitida dentro de la atmósfera en forma de calor, aumentando la temperatura media y creando un efecto similar al de un invernadero [10]. El efecto invernadero en sí es un proceso natural para nada nocivo, ya que es el responsable de evitar que la radiación solar se disemine en el espacio, manteniendo la temperatura en un rango habitable por el ser humano. Sin este efecto, la temperatura media superficial de la Tierra sería de -20°C [11]. El problema reside en el efecto invernadero de origen antropogénico, causado por la emisión de grandes volúmenes de gases como el CO_2 durante actividades industriales o de cualquier otra categoría. Estos nuevos gases de efecto invernadero se suman al proceso natural y potencian la retención de calor hasta niveles no deseados.

El dióxido de carbono (CO_2) no es uno de los gases con más capacidad para atrapar calor (el gas metano CH_4 atrapa 23 veces más calor y el óxido nitroso N_2O es 296 veces más efectivo que el CO_2) sin embargo, es muchísimo más abundante en la atmósfera que cualquier otro gas de efecto invernadero. Por esta razón, se atribuye como principal responsable del calentamiento global al CO_2 y las medidas se deben concentrar en la reducción de éste.

Se estima que en la actualidad el porcentaje anual de contribución de CO_2 del sector aeronáutico se sitúa en un 2,5%, y desde los inicios de la aviación ha contribuido al calentamiento global en un 4% [12]. Estos porcentajes han aumentado con el paso de los años (Ver Figura 1.5) y se prevé que sigan creciendo en relación directa con el aumento de demanda de transporte anteriormente mencionado. Por estas razones, a lo largo de este trabajo se hará hincapié en el uso de combustibles alternativos que reduzcan la emisión de CO_2 , como puede ser el uso de hidrógeno (H_2).

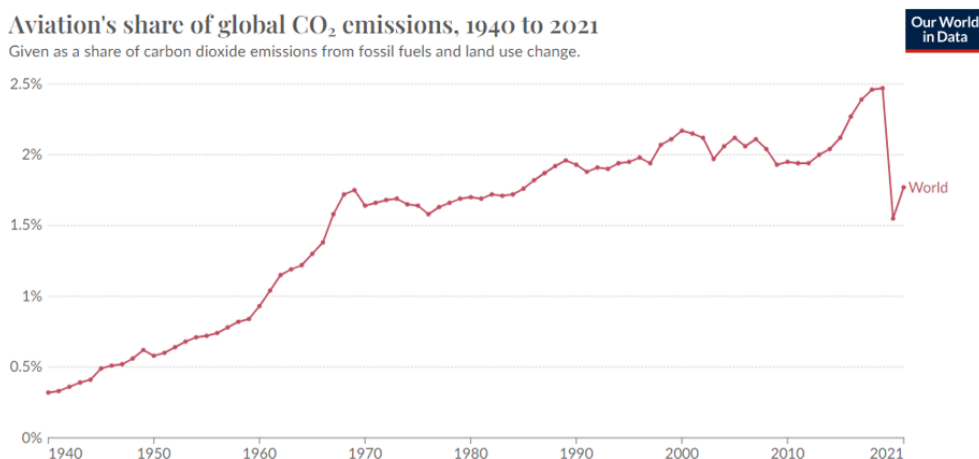


Figura 1.5: Porcentaje de CO_2 anual derivado de la aviación.

Fuente: *Our World in Data* [12]

1.2. Justificación

Una vez expuesto el escenario actual y las previsiones futuras de la problemática medioambiental que atañe al sector aeronáutico, se hace visible la urgencia de tomar medidas correctivas que limiten el volumen de emisiones contaminantes ante el esperado aumento de demanda de transporte aéreo en los próximos 30 años. Es necesario, por lo tanto, determinar primero el alcance del impacto ambiental de la flota aérea en su conjunto para tomar las acciones a futuro que garanticen la sostenibilidad del sector.

El presente proyecto responde a la necesidad de un análisis de impacto medioambiental del sector aeronáutico de carácter general y con perspectivas a futuro, de forma que se pueda evaluar cuantitativamente los efectos de incluir nuevos materiales y combustibles aeronáuticos a medio y largo plazo.

En la actualidad, existen pocos estudios que analicen detalladamente el ciclo de vida de aeronaves comerciales y la mayoría de estos están centrados en aeronaves concretas, principalmente debido a la falta de información de dominio público sobre materiales, procedimientos y ensamblajes por parte de proveedores aeronáuticos. Este trabajo pretende visualizar el impacto de la flota aérea actual y futura como un conjunto, centrándose menos en la eficiencia individual de cada aeronave y más en la importancia de los avances tecnológicos en materia de reducir el impacto ambiental.

En adición a lo anterior, la redacción de este proyecto entra en relación con los *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)*. Los ODS son 17 objetivos acordados por todos los Estados miembros de las Naciones Unidas y que forman parte de la *Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*, la cual aboga por establecer un plan de acción que apueste por una sociedad más próspera y sostenible [13]. De los 17 objetivos, el análisis de ciclo de vida de la flota aérea comercial está en relación directa con 3 de ellos:

- **Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna:** el uso de nuevos combustibles aeronáuticos sostenibles cumpliría este objetivo (Figura 1.6).



Figura 1.6: Objetivo de Desarrollo Sostenible nº7. *Fuente: ONU [13]*

- **Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles:** reducir las emisiones y utilizar materias renovables soluciona el problema del aumento de demanda (Figura 1.7).



Figura 1.7: Objetivo de Desarrollo Sostenible nº12. *Fuente: ONU [13]*

- **Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos:** la reducción de emisiones del sector aeronáutico contribuye a frenar el cambio climático (Figura 1.8).



Figura 1.8: Objetivo de Desarrollo Sostenible nº13. *Fuente: ONU [13]*

El cumplimiento de estos objetivos influye positivamente en muchos ámbitos de sostenibilidad (salud, ecosistemas...) que forman parte de otros ODS y, por ello, tienen también una relación indirecta con el presente análisis.

1.3. Objetivos

A continuación se definen los objetivos principales y secundarios a conseguir en el análisis de del ciclo de vida expuesto en este trabajo.

Se define como único objetivo principal **evaluar el impacto ambiental de la flota de aeronaves actual y futura en términos de gases de efecto invernadero**. Para ello se propone el cumplimiento de estos objetivos secundarios (Ver Figura 1.9):

1. **Estructurar y delimitar la metodología seguida del análisis de ciclo de vida de acuerdo a los estándares:** siguiendo las directrices impuestas por los estándares *ISO 14040* e *ISO 14044* y con parámetros del análisis determinados por decisiones informadas.
2. **Analizar y comparar las características de consumo de cada modelo de aeronave incluido en la flota actual.**
3. **Llevar a cabo un análisis de ciclo de vida para contabilizar las emisiones de la flota actual.**
4. **Llevar a cabo una comparación entre el impacto ambiental de la flota actual y la futura en 2050 considerando los nuevos combustibles propuestos en el sector aeronáutico.**



Figura 1.9: Diagrama de objetivos principales y secundarios.

1.4. Estructura del trabajo

En esta sección se resume la estructura del trabajo por capítulos, con una breve explicación por cada apartado.

Capítulo 1: Introducción

En este capítulo se muestra el contexto actual y la motivación tras la redacción de este proyecto. Está compuesto por cuatro secciones:

Contextualización

Contiene información sobre las perspectivas a futuro en cuanto a demanda de transporte aéreo y aumento de operaciones en aeropuertos. Se listan las principales emisiones contaminantes producidas por el sector aeronáutico y su efecto en el cambio climático.

Justificación

Expone los argumentos por los que es necesario un estudio de esta naturaleza, además de cómo se relaciona con los objetivos de desarrollo sostenible propuestos para la próxima década.

Objetivos

Define los objetivos principales y secundarios para conseguir un análisis del ciclo de vida acorde a expectativas.

Estructura del trabajo

Es este apartado, muestra la organización del trabajo y su estructura

Capítulo 2: Metodología

En este capítulo se describe la metodología seguida para el análisis de ciclo de vida, justificando adecuadamente todas las decisiones tomadas. Se divide en siete secciones:

Estructura general

Contiene un diagrama de bloques que explica de forma visual cada uno de los pasos seguidos que permiten definir los parámetros del análisis y cómo se encuentran interconectados.

Análisis del ciclo de vida

Se define el análisis del ciclo de vida, los estándares sobre los que se rige y los parámetros necesarios para delimitar el análisis.

Alcance del proyecto

Es el primer parámetro del ACV: se define el alcance que tiene el análisis, es decir, qué porcentaje del ciclo de vida de la aeronave abarca y con qué profundidad se analiza cada fase o etapa.

Escenario

Es el segundo parámetro del ACV: se define el contexto del análisis en un horizonte temporal, más las condiciones externas tenidas en cuenta.

Condiciones de contorno del sistema y flujos ambientales

Es el tercer parámetro del ACV: contiene esquemas del faseado de ACV y diagramas de flujo que muestran los recorridos medioambientales desde la extracción de materias primas hasta la producción de residuos y emisiones.

Categorías de impacto y unidades funcionales

Es el cuarto parámetro del ACV: concreta las categorías de impacto que se contabilizan en el análisis (ejemplo: GHG-100) y sus unidades.

Inventario del ciclo de vida

Es el quinto parámetro del ACV: lista las fuentes de datos sobre las que se genera el inventario del ciclo; los datos base sobre los que se apoya el análisis.

Capítulo 3: Análisis de ciclo de vida de la flota actual

En este capítulo se muestran los resultados del ACV obtenidos para la flota actual de aeronaves.

Listado y análisis de la flota

En esta sección se analizan los consumos y categorías de cada aeronave.

Análisis Cradle-to-Gate

Aquí se exponen los resultados relacionados fabricación de la aeronave.

Análisis Well-to-Wake

Y aquí los resultados relacionados con la producción de combustible.

Análisis Cradle-to-Grave

Para terminar, se exponen los resultados del ACV completo.

Capítulo 4: Análisis de ciclo de vida de la flota futura

En este capítulo se muestran los resultados del ACV obtenidos para la flota futura de aeronaves en las décadas de 2030, 2040 y 2050.

Normativa y objetivos

Contiene los objetivos y normativa de sostenibilidad que son de aplicación o lo serán en los próximos años.

Combustibles sostenibles

Se listan y comentan los combustibles aeronáuticos alternativos que se encuentran actualmente en desarrollo, con sus ventajas e inconvenientes y factibilidad a medio o largo plazo.

Otras medidas de reducción de impacto ambiental

Comenta otras medidas y nuevas tecnologías no relacionadas con combustibles que pueden significar una reducción del impacto ambiental.

Impacto ambiental de la flota futura

En este apartado finalmente se muestran los resultados del análisis a futuro y se comparan los distintos escenarios por décadas entre sí mismos y al estado actual. Se compara el uso de combustibles sostenibles con el uso de combustibles aeronáuticos convencionales.

Capítulo 5: Conclusiones y trabajos futuros

En este capítulo se analizan los resultados y comparaciones obtenidas y se establecen conclusiones en base a observaciones de tendencias.

Capítulo 6: Pliego de Condiciones

En este capítulo se presenta el Pliego de Condiciones de este trabajo.

Capítulo 7: Presupuesto

En este capítulo se contabilizan el coste económico necesario para replicar este proyecto.

Capítulo 2

Metodología

En este capítulo se describe la metodología seguida durante todo el proyecto y los criterios y suposiciones que se han tomado como base para el Análisis del Ciclo de Vida (ACV).

2.1. Estructura general

Para comenzar, en la Figura 2.1 se muestra la estructura general de la metodología, dividida en una secuencia de pasos que definen los parámetros esenciales de entrada para el presente análisis.

La división de la metodología en dichos parámetros pretende responder de manera sencilla y organizada a las preguntas que deberían ser planteadas antes del inicio de un análisis de ciclo de vida. Estas preguntas pueden ser tan sencillas e intuitivas como *¿Qué se hace?*, *¿Cuándo y dónde?*, *¿De qué manera?*, *¿En base a qué datos?*, etc.

Se ha optado por estructurar la metodología en base a los siguientes parámetros de ACV:

Alcance

Define el alcance que tiene el análisis, es decir, qué porcentaje del ciclo de vida de la aeronave abarca y con qué profundidad se analiza cada fase o etapa.

Escenario

Define el contexto del análisis tanto en un horizonte espacial como en un horizonte temporal, haciendo hincapié en las condiciones externas propias del contexto.

Condiciones de contorno y flujos ambientales

Contiene los diagramas de flujo que muestran los recorridos medioambientales desde la extracción de materias primas hasta la producción de residuos y emisiones.

Categorías del impacto y unidades funcionales

Concreta las categorías de impacto sobre las que se basan los resultados del análisis y las unidades en las que se visualizan esos resultados.

Inventario del ciclo de vida

Lista las fuentes de datos sobre las que se genera el inventario del ciclo, es decir, los datos base sobre los que se apoya el análisis. Estos datos provienen tanto de fuentes aisladas como de bases de datos de inventarios.

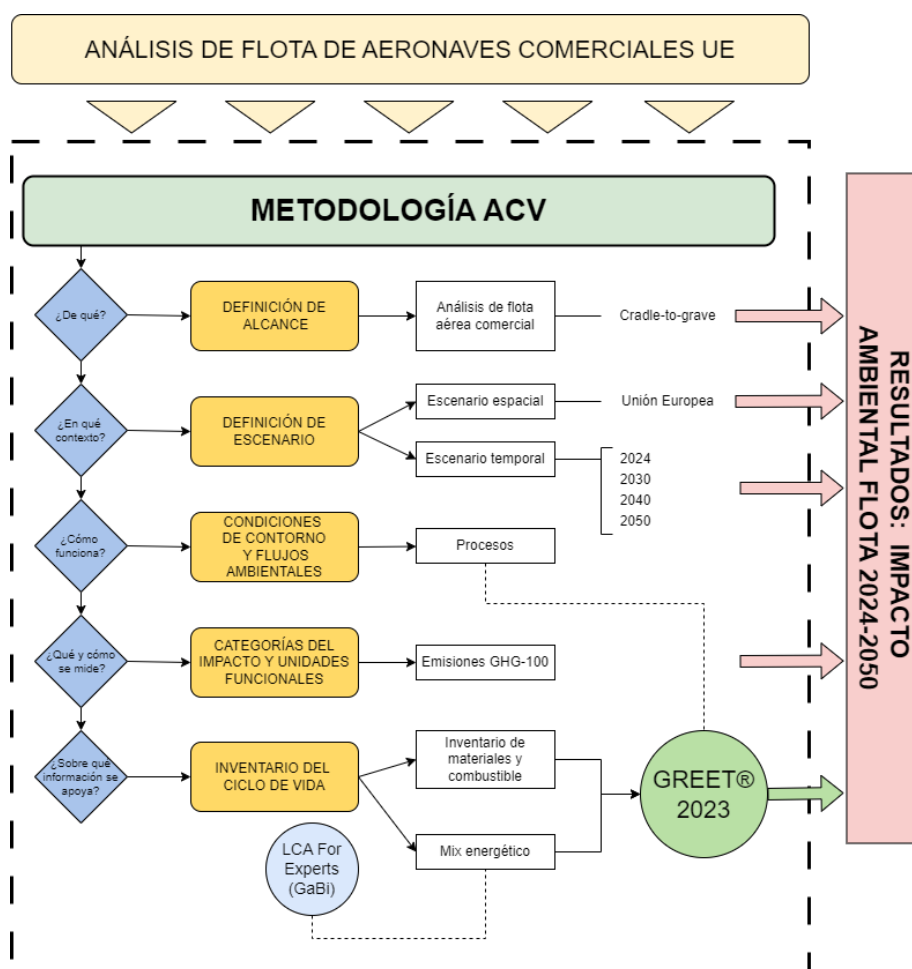


Figura 2.1: Estructura general de la metodología.

2.2. Análisis del ciclo de vida

El análisis del ciclo de vida o *Life-Cycle Analysis* (por sus siglas ACV o LCA) es una metodología utilizada para evaluar el impacto medioambiental potencial de un producto durante una o más fases de su ciclo de vida de una manera cuantificada [14]. Este análisis se rige por los estándares *ISO 14040* [15] e *ISO 14044* [16], los cuales definen los principios, marco de referencia, requisitos y directrices a seguir para efectuar un análisis de calidad y comparable a cualquier otro sector, tecnología o actividad.



Figura 2.2: Ciclo de vida de un producto según LCA. Fuente: *OneClick LCA* [17]

El análisis de ciclo de vida se divide en cuatro fases diferenciadas [15]:

1. Fase de definición del objetivo y el alcance, en la que se delimitan las condiciones de contorno del sistema y el nivel de detalle del análisis.
2. Fase de análisis del inventario, que implica la recopilación de datos necesarios para el estudio.
3. Fase de evaluación del impacto ambiental, en la que se proporciona la información para evaluar el impacto ambiental del inventario.
4. Fase de interpretación, en la que discuten los resultados obtenidos y se obtienen las conclusiones del estudio.

En los siguientes apartados se describen con más detalle las hipótesis consideradas para este proyecto, definiendo los parámetros que delimitan la base del presente ACV tal y como se listaron en la sección anterior.

2.3. Alcance del proyecto

Se define como objetivo principal del proyecto la obtención del impacto medioambiental de la flota de aeronaves comercial actual y futura en la Unión Europea, mediante un análisis de ciclo de vida de los gases de efecto invernadero emitidos por aeronave a lo largo de toda su vida, desde su fabricación hasta su eliminación.

El tipo de análisis que contabiliza todas las etapas del ciclo de vida de un producto se denomina “cradle-to-grave” (traducido: de la cuna a la tumba) y abarca el impacto ambiental de todos los procesos desde que se extraen las materias primas para su fabricación hasta la disposición de los residuos tras el fin de la vida útil del producto.

El ciclo de vida de una aeronave comercial convencional tiene tres fases diferenciadas: fase de fabricación, fase de operación y fase de gestión de residuos, tal y como se muestra en la Figura 2.3.

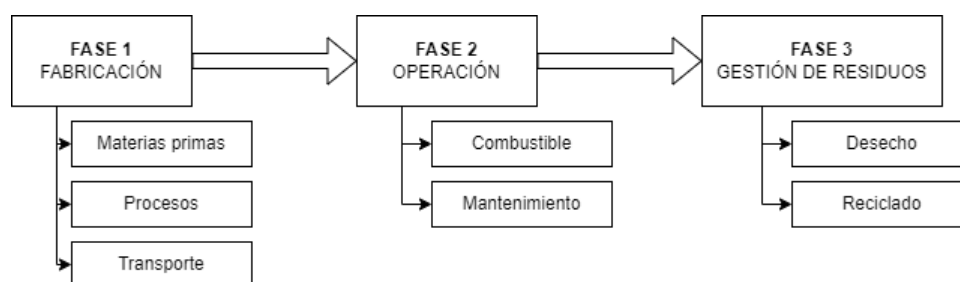


Figura 2.3: Etapas simplificadas del ciclo de vida de una aeronave.

Fase 1: Fabricación

Esta es la primera etapa del ciclo de vida de una aeronave, comenzando por la extracción y transporte de materias primas necesarias para la fabricación por partes del avión. Algunos de los materiales empleados principalmente son aluminio, acero, titanio y materiales compuestos de fibra de carbono y vidrio. Como ejemplo de la distribución de materiales típica en la actualidad, se muestra en la Figura 2.4 los porcentajes de cada material utilizado en el Airbus A350 XWB.

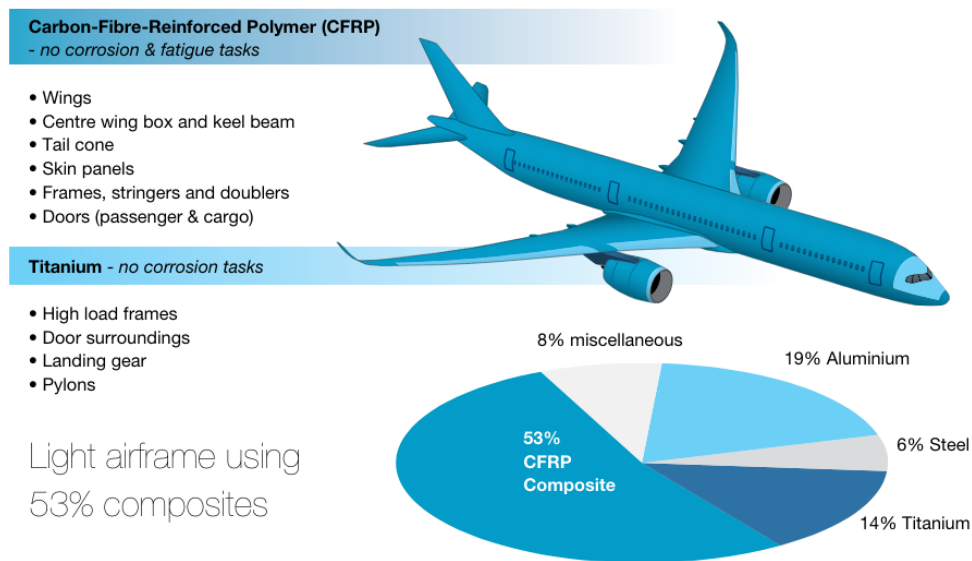


Figura 2.4: Distribución de materiales de Airbus A350. Fuente: Airbus [18]

El impacto ambiental de esta fase no sólo comprende el causado por las materias primas en sí, sino que se tienen en cuenta también los procesos de fabricación y el transporte derivado de estos. Concretamente, en el sector aeronáutico, el transporte de materiales y partes de aeronaves hasta su ensamblaje final constituye una parte importante del proceso de fabricación: la compañía *Airbus* tiene más de 12000 proveedores de piezas de aeronaves repartidos en todo el mundo que fabrican y envían las diferentes partes de las que se compone un avión comercial [19].

Los procesos de fabricación como el tratamiento de materias primas o el mecanizado de piezas también suponen un impacto ambiental añadido y deben tenerse en cuenta dentro de un análisis de ciclo de vida. En este trabajo se tomarán en consideración tanto la producción de piezas de aeronaves en su fase inicial como la producción de todo el combustible que precisará la aeronave a lo largo de toda su fase de operación.

Optimizando los procesos de producción y de transporte se puede incidir positivamente en el impacto total del ciclo de vida.

Fase 2: Operación

La segunda y más importante etapa del ciclo es la fase de operación, en la que la aeronave es utilizada por las aerolíneas para transportar pasajeros o carga durante toda su vida útil. Esta fase genera más del 95% del total de emi-

siones [7] durante el ciclo de vida completo debido a la quema de combustibles fósiles en sus motores.

Según estudios [20], por cada kilogramo de queroseno consumido se generan las siguientes emisiones:

- 3,16 kg de CO_2
- 1,24 kg de H_2O
- 14 g de NO_x
- 0,8 g de SO_2
- 0,4 g de HC
- 0,0025 g de PM
- OH , CH_4 y lubricante

El consumo de combustible se verá afectado por numerosos factores que no siempre dependen de la propia eficiencia del motor, sino de cómo de optimizada se encuentra la aeronave respecto de la distancia del recorrido y la carga de pago que se le es asignada. En vuelos domésticos o de corto alcance, se consume más combustible por kilómetro recorrido debido al aumento de consumo contabilizado en las fases de despegue y aterrizaje.

EUROCONTROL define el tipo de vuelo según las distancias de recorrido de esta manera [21]:

1. Ultra-corto alcance: <500 km
2. Corto alcance: 500 - 1500 km
3. Medio alcance: 1500 - 4000 km
4. Largo alcance: >4000 km

En la actualidad los vuelos de corto alcance representan un 43% del número de vuelos total, sin embargo, ese porcentaje está en continuo descenso y se espera que disminuya aún más con el tiempo, tal como muestran las tendencias en la Figura 2.5.

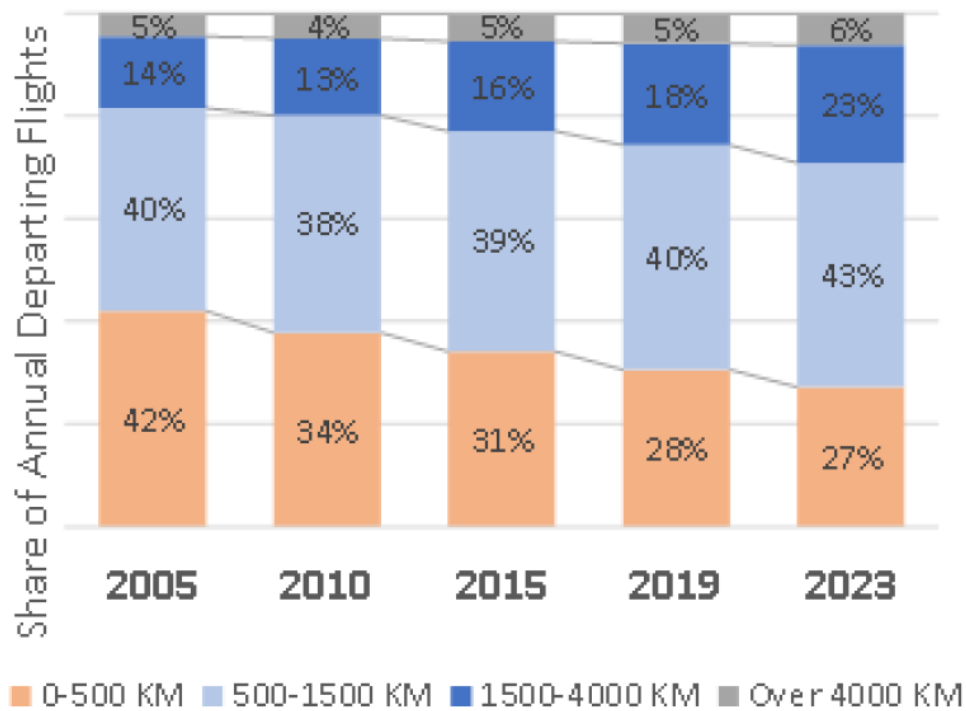


Figura 2.5: Vuelos según su alcance por año. Fuente: EUROCONTROL [21]

Durante todo el ciclo de vida útil de la aeronave estará sometida a mantenimientos continuos para preservar su estado de aeronavegabilidad y garantizar la seguridad de sus usuarios. El programa de mantenimiento viene definido por requisitos del propio avión determinados por el fabricante, por la aerolínea que lo opere, la normativa del aeropuerto y las pautas de mantenimiento comunes a todas las aeronaves.

El mantenimiento se divide en [22]:

1. **Mantenimiento base**, realizado por las aerolíneas.
2. **Mantenimiento de línea o rutinario**, que comprende la limpieza, reabastecimiento e inspecciones visuales, entre otros.
3. **Mantenimiento no rutinario**, que se efectúa sólo cuando se notifica un problema. Existen 4 tipos de inspección dependiendo de la naturaleza del mantenimiento:
 - Pre-vuelo: Antes del vuelo se inspeccionan niveles de presión de las

ruedas, del aceite, condición de los frenos y equipamiento de emergencia.

- A-Check: consiste en una inspección del interior y el exterior del avión, comprobando también las unidades de potencia y los motores. Se realiza cada 400-600 horas de vuelo.
- B-Check: incluye actividades de prevención como el cambio de aceite y filtros. Se realiza cada 750 horas de vuelo.
- C-Check: incluye inspecciones detalladas de los motores, el revestimiento, estructura y sistemas del avión, además de calibraciones de los controles de vuelo. Se realiza cada 3000 horas de vuelo.
- D-Check: este es un mantenimiento que restaura el avión por completo, retirando del avión todo el equipamiento interior. La inspección dura 1 mes o más y debe realizarse cada 6-8 años.

Las emisiones de estas acciones provienen del uso de energía, de la producción de recambios y del uso de productos de limpieza y mantenimiento.

El mantenimiento está presente la fase de operación, pero sus emisiones no son comparables al propio uso del avión y el margen de mejora está limitado [7]: sólo en los casos en los que es necesario el reemplazo del motor o cualquier componente estructural tendrá una huella directa en el impacto ambiental del sector aeronáutico.

Fase 3: Gestión de residuos

Esta tercera y última fase comienza cuando el avión llega al final de su vida útil, a su *End-of-Life (EOL)*.

Los aviones comerciales de pasajeros tienen una esperanza de vida típica de 25-30 años, sin embargo, el final de la vida útil de una aeronave no siempre viene dado por razones de seguridad, sino también por razones económicas: es práctica habitual desechar aeronaves hacia los 15 años desde su fabricación en favor de otras más modernas y eficientes.

Durante la década anterior se estima que una media de 650 aeronaves fueron retiradas del mercado anualmente y se espera que más del 30% de la flota actual esté retirada para el 2030 [23]. De no ser por nuevas propuestas de reutilización y reciclado de aeronaves, todos estos materiales serían descartados y abandonados en vertederos.

En la actualidad se tiene poca información de cómo los procesos de gestión de residuos en aviación pueden reducir el impacto ambiental del sector. La in-

formación más reciente proviene de un estudio de sostenibilidad contratado por la EASA y publicado en 2023 [22].

En este estudio se hace hincapié en la importancia de la economía circular y cómo se interconecta la gestión de residuos dentro y fuera del sector aeronáutico. En la Figura 2.6, se muestra en azul la industria perteneciente al sector aeronáutico y en naranja, la industria de gestión de residuos fuera de este sector.

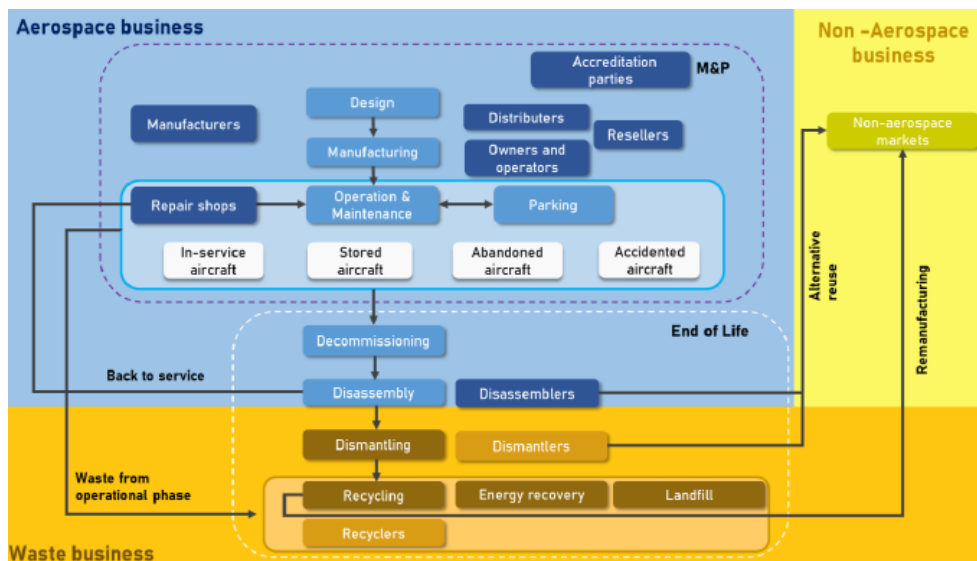


Figura 2.6: Diagrama entre sectores del EoL. Fuente: ENVISA [22]

De forma general se puede describir la gestión de residuos tras el proceso de desmontaje de la aeronave en tres categorías [22]:

1. **Partes reutilizables en aviación:** algunas partes del avión como motores, APU, tren de aterrizaje y otros componentes pueden ser re-certificados e instalados en otra aeronave.
2. **Partes reciclables:** los materiales y componentes de la aeronave no reutilizables pueden ser separados y reciclados para volver al proceso de producción tanto dentro como fuera del sector aeronáutico. Materiales como el aluminio u otros metales suelen volver a la producción de aeronaves, mientras que los revestimientos interiores y tapizados son reciclados y utilizados fuera de la industria.
3. **Partes no reciclables:** que son enviadas a vertedero. Nuevos procesos de reciclado de materiales compuestos han aparecido en esta última década que impiden que éstos sean desechados.

En la actualidad no existe ninguna medida de obligado cumplimiento que regule la gestión de residuos de aeronaves, pero algunos fabricantes ya cuentan con programas de reciclado como es el caso de AIRBUS con *TARMAC Aerosave* o Boeing con *AFRA*. Se estiman cifras muy positivas: alrededor del 95% de los materiales de una aeronave pueden ser reciclados.

El estudio anteriormente mencionado también obtiene valores aproximados de las emisiones GHG-100 derivadas de la fabricación del aluminio y de materiales compuestos reciclados. En la Figura 2.7, se puede ver la gran diferencia de impacto ambiental entre 1 kg de producto fabricado de forma convencional o a partir de reciclado.

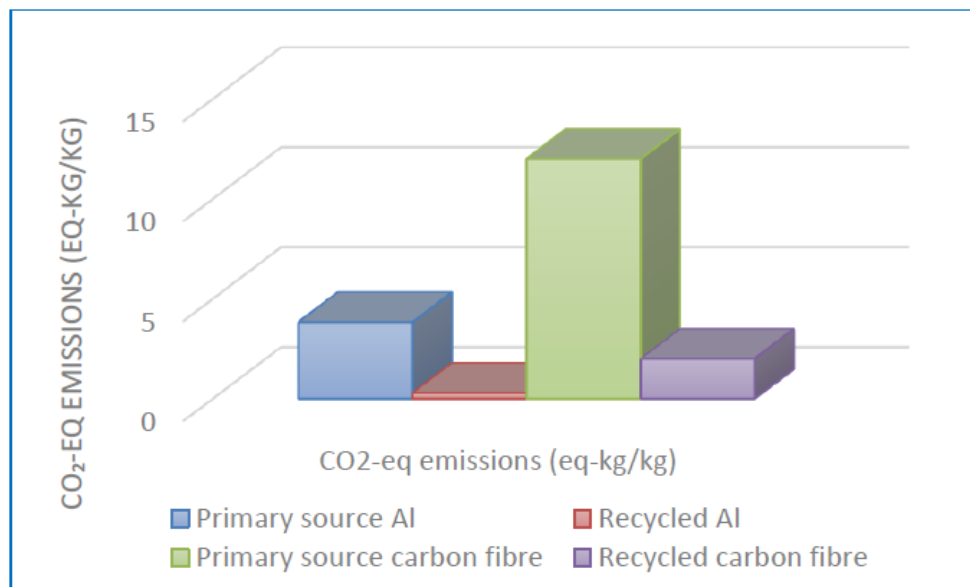


Figura 2.7: Emisiones GHG-100 entre materiales nuevos y reciclados. *Fuente: ENVISA [22]*

En un proceso de reciclado de metales de una aeronave comercial se suelen obtener 17 toneladas de aluminio, 2 toneladas de titanio y 3 toneladas de otros metales. Los materiales compuestos, sin embargo, no tienen un proceso efectivo de reciclado y el aumento exponencial de su uso en aeronaves insta a desarrollar la tecnología necesaria para cumplir con los objetivos de sostenibilidad.

En este análisis de ciclo de vida no se contabilizará la fase de gestión de residuos por la falta de datos numéricos que avalen la reducción de impacto ambiental dentro del propio sector aeronáutico. En su lugar, el proceso de producción contará con un porcentaje de materiales reciclados genérico en base a los datos en *GREET* para simular el impacto positivo del reciclaje durante EoL.

2.4. Escenario

El escenario espacial sobre el que se ejecuta el presente ACV son los 27 países que componen la Unión Europea actualmente (Figura 2.8).

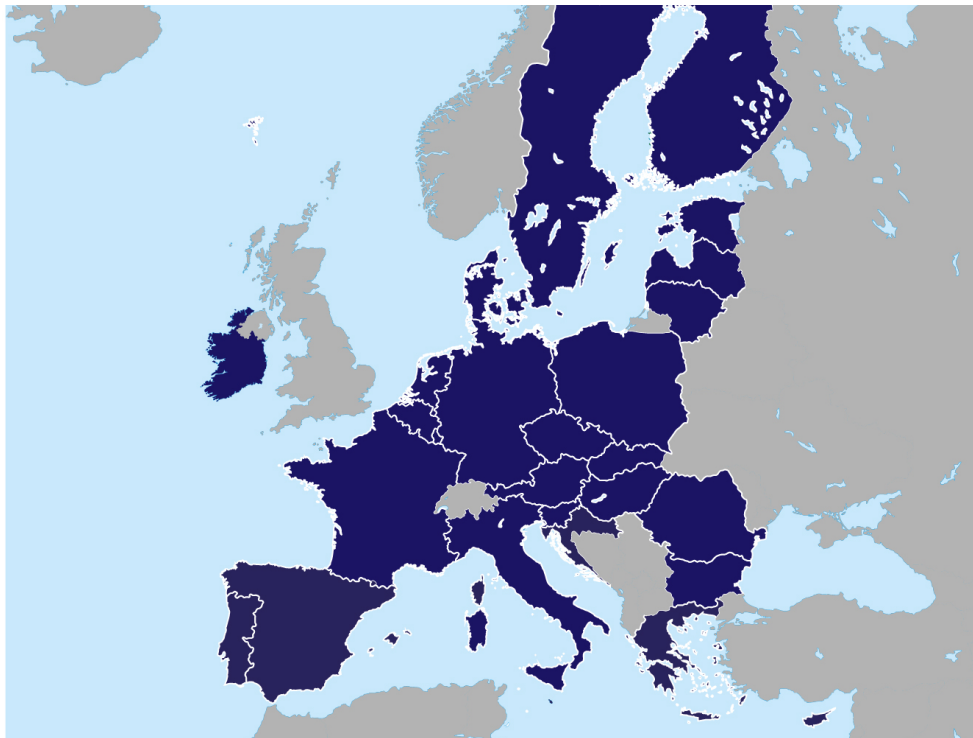


Figura 2.8: Países miembros de la Unión Europea. *Fuente: FRA [24]*

El motivo de reducir el alcance del análisis a la UE es delimitar el número de aviones y operaciones con las que trabaja y así simplificar el inventario del ciclo de vida, que ya de por sí es extenso y variado. Además, contabilizar sólo los países miembros asegura que seguirán los mismos objetivos de sostenibilidad y directrices impuestas por la Unión Europea. Por último, la UE cuenta con organismos que ofrecen gran cantidad de recursos, estadísticas y proyecciones relacionadas con el sector aeronáutico y su impacto ambiental.

El escenario temporal comprende un primer análisis del ciclo de vida del estado actual (operaciones aéreas y flota en 2024) y otro análisis complementario a futuro de los años 2030, 2040 y 2050. La incertidumbre del estado futuro obliga a asumir los *mixes energéticos* presentes en cada década en función de las tendencias actuales y los objetivos de desarrollo sostenible. Para obtener los mixes energéticos se ha utilizado el software *LCA For Experts (GaBi)* [25], que contiene una base de datos amplia y distintas estimaciones de tendencias

energéticas. Tras la obtención de los datos para cada escenario, se ajustan al índice GWP100 (Ver Sección 2.6) mediante la base de datos de caracterización de factores de impacto *CML-IA* de la Universidad de Leiden [26] y finalmente se introducen los mixes energéticos actualizados al software *GREET* [27].

Como se ha comentado en el párrafo anterior, uno de los mayores problemas de este análisis radica en la incertidumbre de la futura legislación de la UE en materia de emisiones y la eficacia real de estas medidas a largo plazo: dependiendo del escenario elegido, los resultados del análisis podrían llegar a ser muy distintos a los futuros. Para solventar este problema, se plantean dos escenarios futuros basados en distintas tendencias según *GaBi*:

- **No Improvements (NI)**: escenario en el que las medidas de sostenibilidad se mantienen en los niveles “normales”, es decir, que vaticinan las tendencias actuales si no hay ningún cambio significativo tecnológico o en la legislación europea.
- **Significant Improvements (SI)**: escenario más positivo en el que se producen cambios significativos en las medidas de sostenibilidad, reduciendo las emisiones aeronáuticas a ritmos más acelerados.

En el siguiente gráfico (2.9) puede comprobarse la diferencia entre elegir uno u otro escenario en las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG): la reducción de impacto ambiental por kg de combustible convencional a medida que avanza el tiempo sigue siendo visible para ambos escenarios, pero en el escenario negativo/normal el cambio es muchísimo más lento.

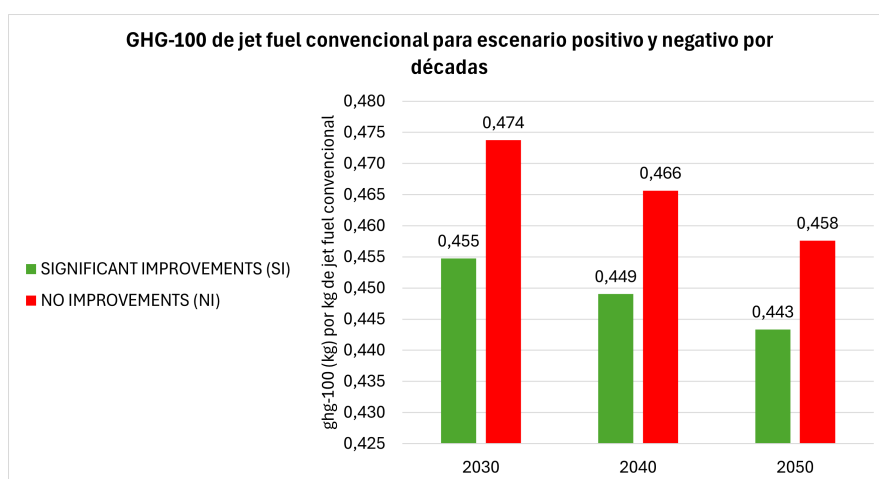


Figura 2.9: Emisiones GHG-100 por kg de Jet fuel para distintos escenarios.

Fuente: FRA [24]

2.5. Condiciones de contorno del sistema y flujos ambientales

La siguiente Figura 2.10 presenta las condiciones de contorno del ciclo de vida completo de una aeronave, en el que se muestran de forma simplificada las rutas de producción de todos los procesos que forman parte del presente análisis. Los procesos de fabricación individual de cada producto elaborado están definidos conforme al software *GREET 2023*.

Los flujos ambientales se corresponden con los parámetros de entrada, es decir, las materias primas, energía y agua necesarias para la producción de la aeronave y su combustible; y los parámetros de salida, conformados por los residuos y emisiones atmosféricas causantes del impacto ambiental. En la Figura 2.11 se muestra cómo se integran las fases en las que se divide el esquema anterior dentro de un análisis *cradle-to-grave*.

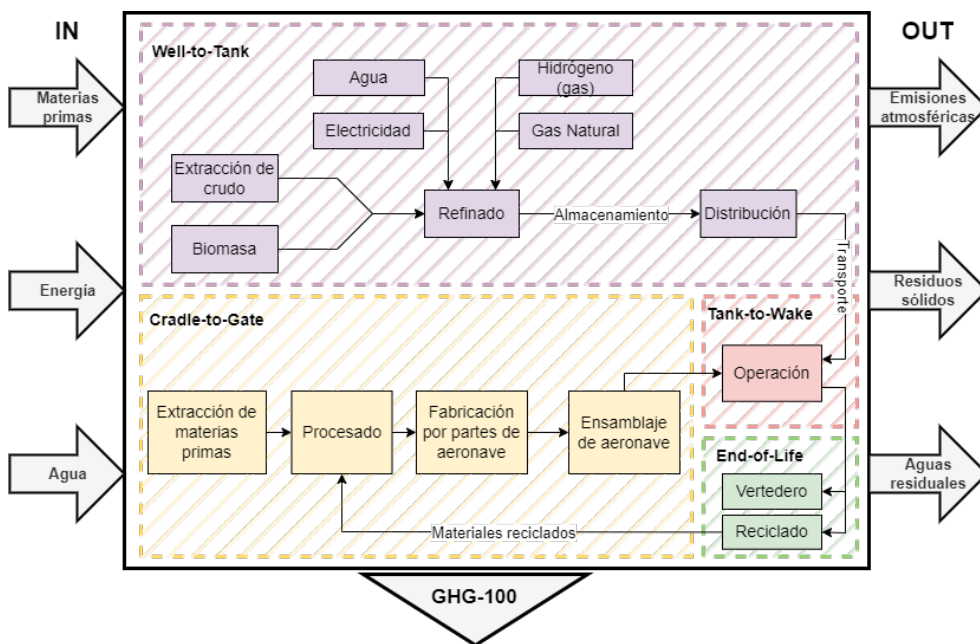


Figura 2.10: Flujos ambientales y condiciones de contorno del ACV.

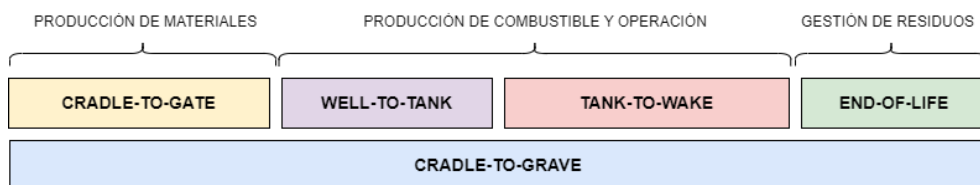


Figura 2.11: Faseado de un análisis típico *cradle-to-grave*.

2.6. Categorías del impacto y unidades funcionales

La categoría de impacto elegida para este análisis de ciclo de vida es el GHG-100.

GHG-100 se define como el potencial de calentamiento global que pueden ocasionar los gases de efecto invernadero en un periodo de 100 años desde su emisión. Para determinar el potencial de calentamiento global de un gas determinado se usa el índice GWP (Global Warming Potential), que compara el potencial de calentamiento de 1 tonelada del gas de estudio con 1 tonelada de un gas de referencia, que siempre suele ser el dióxido de carbono. El potencial de un gas es proporcional a su permanencia en la atmósfera y a su capacidad para absorber e irradiar calor [28].

Algunos de los factores aplicados para cada gas de efecto invernadero por el índice GWP están determinados por IPCC [29] y se presenta en la Tabla 2.1:

Factores de multiplicación GWP-100		
Gas	Factor	Años en atmósfera
Dióxido de carbono (CO_2)	1	-
Metano (CH_4)	28	12,4
Óxido nitroso (N_2O)	265	121
Tetrafluorometano (CF_4)	6630	50000
Difluorometano aerosol ($HFC - 152a$)	138	1,5

Cuadro 2.1: Factores de multiplicación GWP-100

y el cálculo de GHG-100 se haría con la siguiente ecuación 2.1, expresado en kg:

$$GHG_{100} = m_{CO_2} \cdot GWP_{CO_2} + m_{CH_4} \cdot GWP_{CH_4} + \dots \quad (2.1)$$

Respecto de las unidades funcionales utilizadas, se emplea el kg como unidad de entrada y de salida para el ACV del estado actual de la flota. El GHG-100 se expresa como resultado en kg de emisiones absolutas durante el ciclo de vida completo de una aeronave.

En el estado de la flota futura se expresan los resultados el kg de GHG-100 por operación completada y se comparan con los resultados actuales en ese mismo formato.

2.7. Inventario del ciclo de vida

El inventario del ciclo de vida se define como el conjunto de las fuentes de información de los datos manejados en el análisis y las hipótesis que se aplican a éste.

Inventario de fase de fabricación

Las emisiones GHG-100 derivadas de la fase de fabricación de materiales y combustible se obtienen del software *GREET 2023*, versión 14000. Como se ha comentado anteriormente en la *Sección 2.4: Escenario*, los mixes energéticos provienen de la base de datos *LCA For Experts (GaBi)* y se estudian 7 escenarios en total:

- Estado actual EU (27 países)
- Año 2030 (Significant Improvements - SI)
- Año 2030 (No Improvements - NI)
- Año 2040 (Significant Improvements - SI)
- Año 2040 (No Improvements - NI)
- Año 2050 (Significant Improvements - SI)
- Año 2050 (No Improvements - NI)

Para el cálculo de las emisiones GHG-100 se tendrán en cuenta exclusivamente el CO_2 , el N_2O y el CH_4 , puesto que son los gases que se suelen emplear en este tipo de análisis por encontrarse en concentraciones suficientes como para ser cuantificados.

GREET devuelve las emisiones por unidad de masa, energía o volumen del material de entrada seleccionado, teniendo en cuenta el proceso de fabricación del material incluyendo extracción, producción y transporte. Este software recoge, por una parte, las emisiones desde la extracción hasta el surtidor o “Well To Pump (WTP)” y por otra parte las emisiones desde el surtidor hasta su uso o “Pump To Wake (PTW)”. La suma de ambos es referida como “Well To Wake (WTW)” (Ver Figura 2.12).

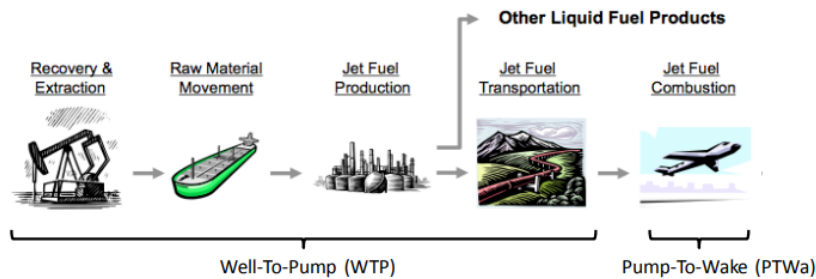


Figura 2.12: Ciclo WTW de Jet Fuel convencional. *Fuente: GREET [30]*

En el análisis de la fase de fabricación de la aeronave, por lo tanto, conviene obtener resultados WTP de los materiales y el combustible necesarios, expresados en kg de producto.

Para obtener los parámetros de entrada se debe elaborar un desglose de los materiales empleados en la producción de cada aeronave, lo que se conoce como un *Bill Of Materials (BOM)*: este documento es muy común en procesos de fabricación e identifica con detalle todos los materiales, piezas y herramientas necesarios para fabricar una parte o sub-partes sin dar lugar a desviaciones en el producto final.

El listado de piezas y detalles de fabricación suelen ser documentos clasificados y existe poca o nula información sobre los materiales utilizados en cada aeronave, por lo que en este análisis se ha optado por dividir la totalidad de la aeronave en un desglose por porcentajes de los materiales más representativos de ésta.

Una vez establecidos los porcentajes, se asocian al peso en vacío de la aeronave en cuestión (Operating Empty Weight, OEW) que sí suele ser de conocimiento público. El resultado final de este proceso son los materiales expresados en kilos y pueden ser asociados a las emisiones GHG-100 por kg de material obtenidos por *GREET*.

A continuación se listan las fuentes de datos oficiales de las que provienen los pesos y porcentajes de materiales con los que se trabaja en el análisis:

- **Aircraft Characteristics for Airport Planning (AC)**: contiene información de dimensiones y pesos de la aeronave, limitaciones de despegue, aterrizaje, de giro, visión, etc. destinadas a aerolíneas y aeropuertos. También se puede llamar *Airport Planning Manual*.

- **Weight and Balance Manual (WBM):** contiene la distribución correcta de pesos en la aeronave y sus límites de carga. Además cuenta con un informe de pesos medidos reales de los componentes extraíbles pero necesarios para que el avión se considere operativo. Sin estos componentes, la aeronave se encuentra en su peso en vacío del fabricante, el denominado *Manufacturer's Empty Weight (MEW)*.
- **Type-Certificate Data Sheet (TCDS):** emitidos por la EASA, certifican la aeronavegabilidad del diseño de la aeronave y contiene detalles de los pesos, motores instalados y limitaciones con los que ha sido certificado. También existen los certificados de tipo de motores aeronáuticos, con información técnica de estos.
- **Otras publicaciones oficiales:** revistas técnicas, seminarios y publicaciones procedentes del propio fabricante o aerolíneas con el objetivo de publicitar sus aeronaves o su propia marca. Ejemplo: Airbus Technical Magazine FAST [18].

Inventario de fase de producción de combustible

Durante la fase de operación se deberá suplir en todo momento a la aeronave del combustible que sea requerido. La producción de ese combustible, en el caso del queroseno, requiere la extracción de materias primas no renovables y una serie de procesos de refinado antes de ser almacenado y distribuido. En el caso de combustibles sostenibles de aviación se requiere algún paso adicional en la producción y varían las fuentes de materia prima.

Los procesos de producción de combustible tanto en el escenario actual como en los escenarios futuros vienen definidos por el software *GREET*. A continuación, se muestra un detalle de los procesos o “pathways” que se han tenido en cuenta durante los análisis de ciclo de vida:

Combustible convencional

Pathway GREET 2023: Conventional Jet Fuel from Crude Oil.

El proceso comprende la extracción de crudo, su refinado hasta conseguir Jet Fuel y su almacenamiento. El proceso de refinado considerado tiene las siguientes entradas y salidas (Figura 2.13):

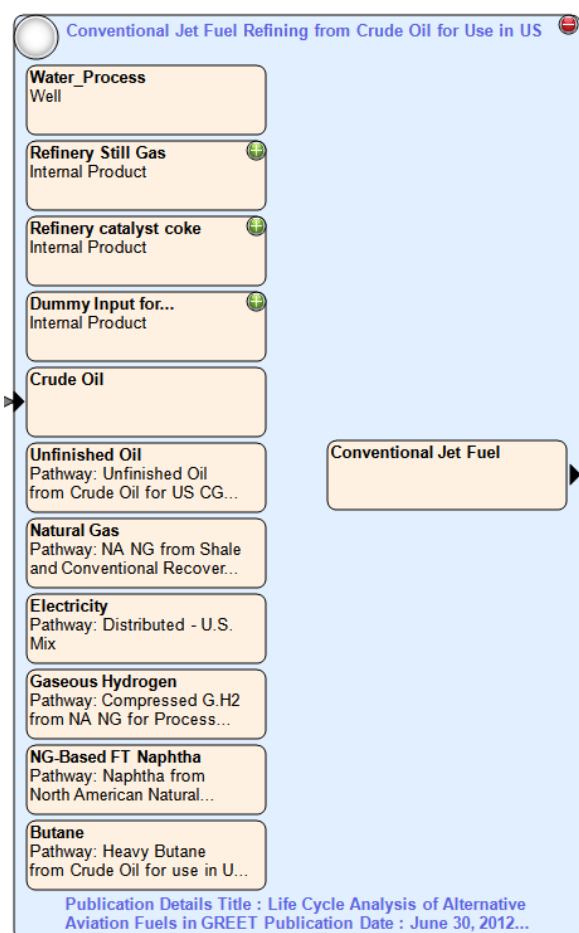


Figura 2.13: Refinado de Jet Fuel convencional. *Fuente: GREET*

Combustible SAF (biomasa)

Pathway GREET 2023: Camelina Oil-based Renewable Jet Fuel.

Este combustible procede del aceite de camelina. El proceso comprende la extracción de camelina, su transformación a aceite, su conversión a Jet Fuel, transporte y almacenamiento. En la Figura 2.14 se muestra el detalle del proceso de obtención de aceite y en la Figura 2.15 el proceso de transformación a Jet Fuel:

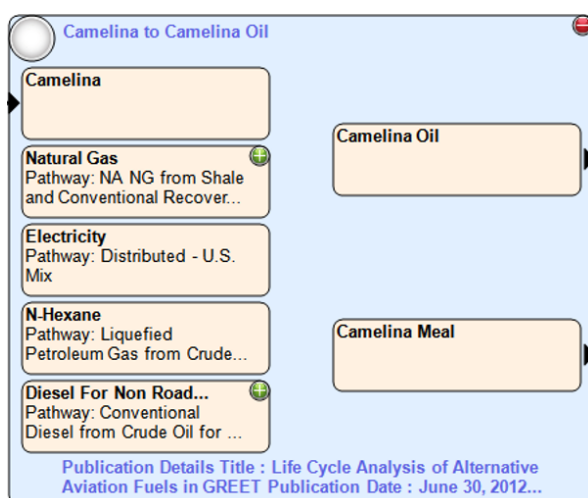


Figura 2.14: Obtención de aceite de camelina. *Fuente: GREET*

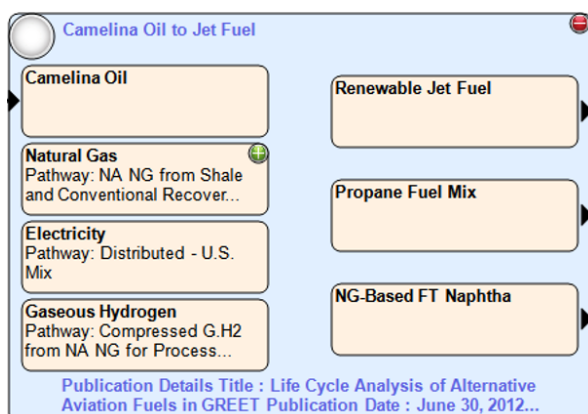


Figura 2.15: Refinado de Jet Fuel a partir de aceite de camelina. *Fuente: GREET*

SAF sintético

Pathway GREET 2023: FT Fuel Production with RWGS.

Este combustible es producido a partir de la combinación de hidrógeno con CO_2 atmosférico. El proceso comprende la producción de hidrógeno y captura de dióxido de carbono, la transformación de estos en un gas de síntesis mediante RWGS, la obtención de hidrocarburos mediante FT, el transporte y almacenamiento. En la Figura 2.16 se muestra el proceso de obtención de H_2 y CO_2 :

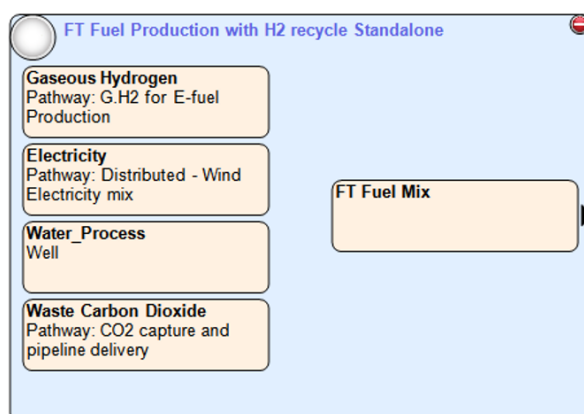


Figura 2.16: Obtención de H_2 y CO_2 para RWGS. Fuente: GREET

Hidrógeno líquido

Pathway GREET 2023: Central Plants: L.H2 production from PEM Electrolysis - Solar (or Wind).

El hidrógeno líquido como combustible se obtiene a partir de un proceso de electrólisis a partir de energía solar o eólica, para posteriormente ser convertido en líquido, transportado y almacenado. La Figura 2.17 muestra los pasos seguidos para su obtención:

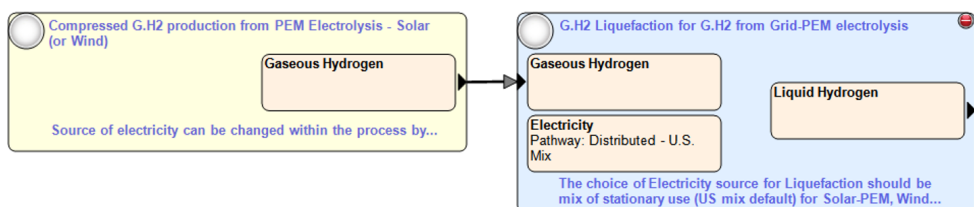


Figura 2.17: Obtención de LH_2 mediante electrólisis. Fuente: GREET

Inventario de fase de operación

El primer paso tras haber definido el alcance es determinar los diferentes tipos de aviones que componen la flota aérea comercial en la Unión Europea.

Para poder comenzar con el análisis, se parte de una lista de aerolíneas europeas (fuente: [31], última actualización en marzo de 2023) que ofrecen vuelos regulares tanto regionales como intercontinentales, omitiendo aerolíneas *charter*. De esta lista se han desechado aquellas aerolíneas con sede en países no pertenecientes a la UE.

Una vez obtenida la lista de aerolíneas, se procede a recopilar la flota de aeronaves activa con la que cuenta cada una de ellas (fuente: [32], información de abril de 2024). Los resultados muestran que hay un total de 2971 aeronaves comerciales en activo dentro de la UE de 7 fabricantes distintos, divididas en los porcentajes mostrados en el siguiente gráfico de rueda 2.18:

AVIONES COMERCIALES ACTIVOS EN LA UE POR FABRICANTE	
AIRBUS	59,68%
BOEING	31,57%
EMBRAER	3,4%
ATR	3,13%
CRJ	1,14%
DASH	0,64%
BEECH	0,44%

Cuadro 2.2: Distribución en porcentaje de aviones por fabricante.

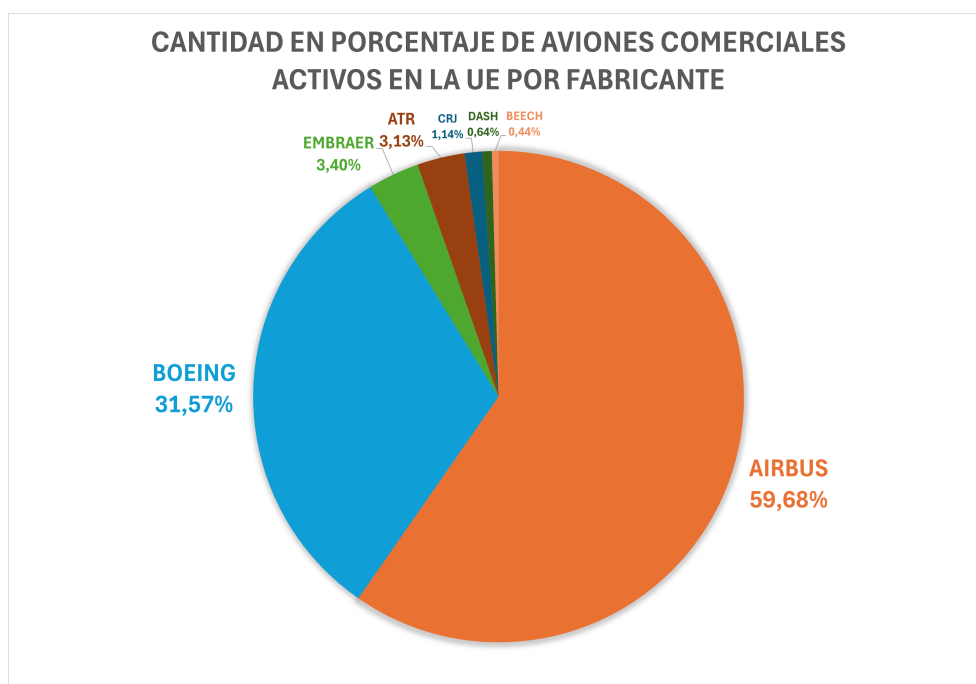


Figura 2.18: Distribución en porcentaje de aviones por fabricante.

Echando un vistazo a la Tabla 2.2 se puede concluir que las compañías *BOEING* y especialmente *AIRBUS* tienen un monopolio de las operaciones aéreas en la UE y esto se ve reflejado en su flota. *EMBRAER* y *ATR*, aunque en mucho menor porcentaje, siguen estando presentes como competidores en el mercado europeo.

El listado completo de los modelos de aeronave que componen la flota considerada en este ACV se puede encontrar en el Capítulo 3.

Las emisiones GHG-100 procedentes de la fase de operación de una aeronave se producen principalmente durante la combustión del Jet Fuel, en la que se calcula que aproximadamente se desprenden 3,16 kg de CO_2 por cada kg de Jet A1 consumido [33]. Determinar el consumo de combustible de un avión es complicado por la cantidad de factores que participan en ello: tipo de motor, altura de vuelo, fase de vuelo, rango, peso del avión, número de pasajeros o cantidad de cargo, etc. El consumo no es dependiente sólo de la eficiencia del motor instalado, y por lo tanto es erróneo utilizar los valores medios de consumo de éste.

Para calcular el consumo de la fase de operación se ha optado por emplear una hoja de cálculo diseñada por M. Burzlaff de una de sus publicaciones en

la Universidad de Hamburgo [34], y modificada posteriormente por su supervisor D. Scholz para incluir el consumo en las fases de despegue y aterrizaje (fases LTO) [35]. Esta hoja de cálculo tiene como entrada los pesos MTOW y MZFW, el número de pasajeros a bordo, la velocidad de crucero y el diagrama *Payload-Range* (Carga de pago vs Rango) de la aeronave (Figura 2.19), todo datos encontrados en el documento AC del modelo de avión anteriormente comentado.

El resultado son varios diagramas representativos del consumo de combustible respecto del rango, expresando el consumo en [kg/km] (Figura 2.20); y respecto del número de pasajeros y rango, expresado en [kg/(pax·100 km)], lo que se conoce como curva de bañera (Figura 2.21).

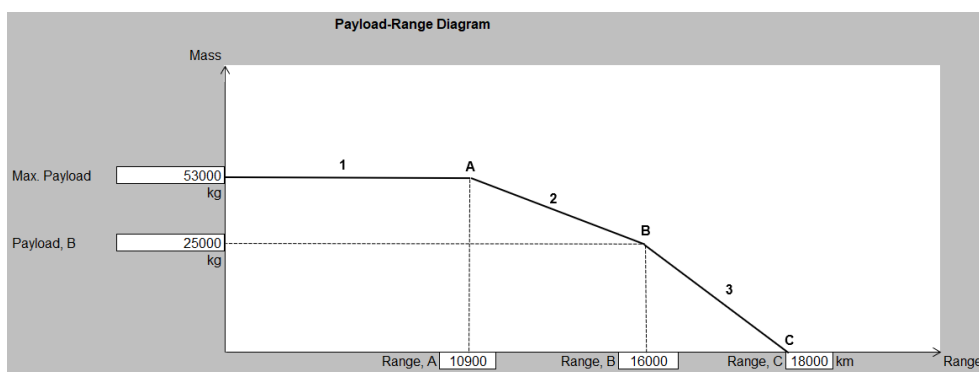


Figura 2.19: Diagrama Payload-Range del A350-900. Fuente: [35]

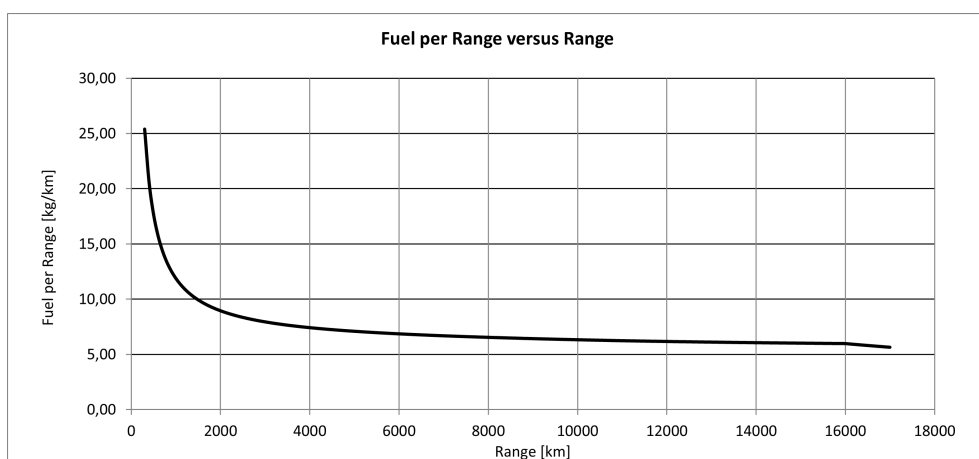


Figura 2.20: Consumo por km vs rango en A350-900 Fuente: [35]

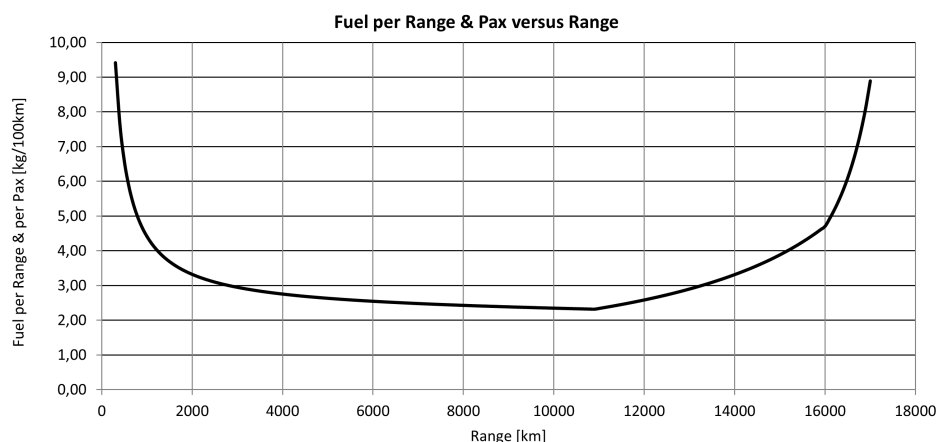


Figura 2.21: Consumo por pasajero y 100 km del A350-900. Fuente: [35]

Se puede comprobar que el consumo por km de vuelo disminuye a medida que aumenta el rango. Sin embargo, el consumo por pasajero tiene naturaleza parábólica y su mínimo coincide con el rango del punto “A” del diagrama P-R.

El consumo de una aeronave durante toda su vida útil variará enormemente dependiendo de la longitud de sus recorridos habituales, y variarán aún más las emisiones de CO_2 que produzca. A falta de datos de fabricantes o aerolíneas de distancias de vuelo habituales para su flota, se ha optado por utilizar unas distancias típicas procedentes de datos operacionales recogidos por el Departamento de Transportes de Estados Unidos, en función de las categorías de aeronave definidas por ese mismo organismo en el manual de *Aviation Environmental Design Tool (AEDT)*. Toda esta información está sintetizada dentro de la documentación de *GREET* [36].

También se asume un porcentaje de ocupación de asientos del 83% según *IATA* [37] que aumenta el consumo por pasajero de todos los aviones. Las tendencias indican, sin embargo, que el porcentaje de ocupación de asientos aumentará progresivamente con el paso de los años.

Una vez obtenido el consumo de combustible por kilómetro recorrido se multiplica por la velocidad de crucero habitual de la aeronave, dando como resultado el consumo de combustible en kg/h. Este cambio de unidades se debe a que se quiere obtener el impacto ambiental total de todo el ciclo de vida de cada avión, con unidades expresadas en kg.

Actualmente se sitúa la esperanza de vida de un avión de pasajeros comercial en 25-35 años, ya que se estima que cada aeronave tiene un número de ciclos de presurización determinados en los que opera de forma segura y es improbable que sus componentes estructurales presenten fatiga. Con el mantenimiento adecuado y programas específicos de extensión de la esperanza de vida, el número de ciclos puede incluso doblarse.

El número de horas de esperanza de vida depende, por tanto, del número de ciclos de presurización límite, del número de horas de vuelo realizadas en cada ciclo y de la calidad de mantenimiento. Los aviones comerciales destinados a vuelos internacionales presentan similar límite de ciclos a aquellos destinados a vuelos domésticos, pero vuelan durante muchas más horas.

En línea con la estandarización de criterios que se hace en este análisis, se asume la misma esperanza de vida para todas las aeronaves y se sitúa el número de horas de operación en 60000 h.

Por otra parte, el volumen de contaminantes emitidos en fase de crucero no se corresponde con las emisiones durante las fases de despegue y aterrizaje. Es necesario diferenciar el consumo entre fases para después multiplicar por los factores adecuados, los cuales se obtienen también de datos experimentales recogidos en la misma documentación de *GREET* [36] e IPCC [38].

Los detalles de estos procedimientos serán descritos en el Capítulo 3 junto con los cálculos GHG-100 de la flota actual.

En el análisis de la flota futura no se tendrán en cuenta las emisiones de combustión en los SAF derivados de biomasa por indicaciones de cálculo por parte de organismos oficiales. La razón se debe a la captura previa de CO_2 por parte de la fotosíntesis de las plantas que se usan como materia prima. En el Capítulo 4 se detalla este tema con más profundidad.

Capítulo 3

Análisis de ciclo de vida de la flota actual

En este capítulo se procede a exponer los resultados del análisis de ciclo de vida de la flota actual de aeronaves comerciales en la Unión Europea, siguiendo la metodología y criterios anteriormente expuestos.

3.1. Listado y análisis de la flota

En las siguientes tablas 3.1 y 3.2 se listan los modelos de aeronave agrupadas por fabricante que forman parte de este análisis de ciclo de vida. Junto a cada modelo se encuentra el número de aeronaves contabilizadas y su capacidad típica de pasajeros.

Como se pudo comprobar anteriormente en el gráfico de rueda de la Figura 2.18, las aeronaves pertenecientes a AIRBUS y BOEING representan el 91,25% de toda la flota comercial activa en la UE, por lo que se puede considerar que el análisis de ciclo de vida de los modelos de ambos fabricantes es suficientemente representativo de la flota completa.

Todos los modelos de aeronave analizados de AIRBUS y BOEING cuentan con propulsión por turbofán, que es capaz de alcanzar altas velocidades y consigue su mayor eficiencia en trayectos largos.

Previo al ACV, en esta sección se hace un análisis de la flota atendiendo a recorridos habituales, capacidad de pasajeros y consumo de combustible.

AIRBUS		
Modelo	Nº de aviones activos	Nº de pasajeros
Airbus A220-100	3	120
Airbus A220-300	102	140
Airbus A318	6	132
Airbus A319-100	194	156
Airbus A320-200	594	180
Airbus A320 Neo	169	180
Airbus A321-100	23	185
Airbus A321-200	169	185
Airbus A321 Neo	162	185
Airbus A330-200	100	247
Airbus A330-300	56	300
Airbus A330-900	50	310
Airbus A340-300	17	335
Airbus A340-600	10	384
Airbus A350-900	107	325
Airbus A350-1000	5	366
Airbus A380	6	555

Cuadro 3.1: Listado de aeronaves activas de AIRBUS en la UE

BOEING		
Modelo	Nº de aviones activos	Nº de pasajeros
Boeing 737-700	23	148
Boeing 737-800	508	184
Boeing 737-900	7	189
Boeing 737-MAX 8	159	189
Boeing 737-MAX 9	2	220
Boeing 747-400	11	400
Boeing 747-800	19	515
Boeing 757-300	9	279
Boeing 767-300	4	290
Boeing 777-200	39	375
Boeing 777-300	62	451
Boeing 787-8	26	359
Boeing 787-9	57	406
Boeing 787-10	10	440

Cuadro 3.2: Listado de aeronaves activas de BOEING en la UE

Estos datos han sido condensados en el siguiente gráfico 3.1, en el que se puede ver cómo los modelos Airbus A320-200 y Boeing 737-800 constituyen la

mayor parte de la flota actual. Además, se observa un liderazgo en las aeronaves de fuselaje estrecho, en consonancia con la prevalencia de vuelos de corto rango.

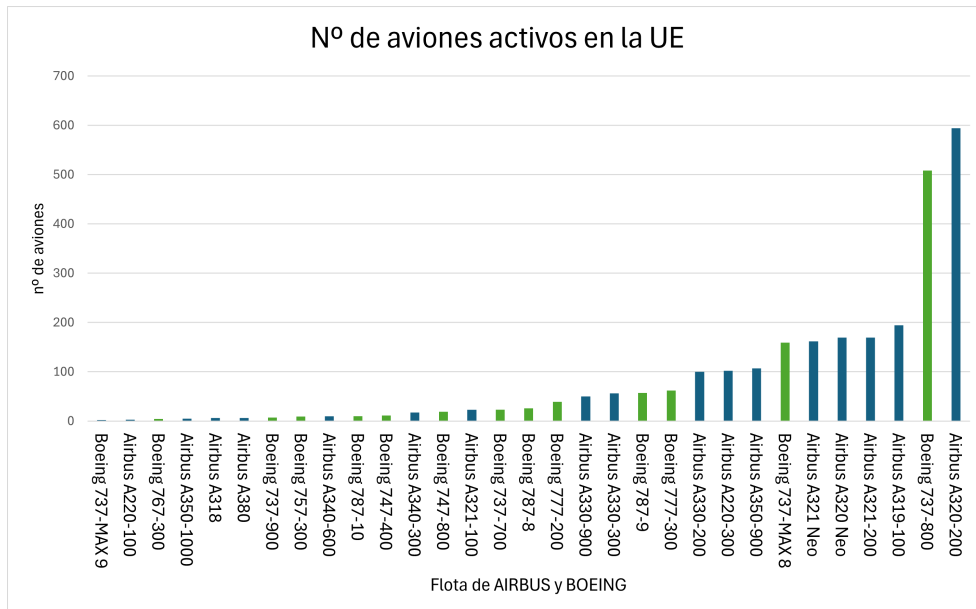


Figura 3.1: Nº de aviones comerciales activos en la UE.
Comparación entre modelos de aeronaves.

A continuación se calculan los consumos típicos de cada aeronave que, como se comentó anteriormente, son muy dependientes del rango y la carga de pago. Se ha optado por clasificar la nave según la capacidad y tamaño de su fuselaje en una de estas categorías:

- **Single Aisle (SA):** para aeronaves de fuselaje estrecho. Distancia de operación típica de 1300 km.
- **Small Twin Aisle (STA):** para aeronaves de tamaño mediano, fuselaje ancho y bimotoras. Distancia de operación típica de 2800 km.
- **Large Twin Aisle (LTA):** para aeronaves de gran tamaño, fuselaje ancho y bimotoras. Distancia de operación típica de 7100 km.
- **Large Quad (LQ):** para aeronaves de gran tamaño, fuselaje ancho y cuatrimotoras. Distancia de operación típica de 7500 km.

Las distancias típicas de operación provienen de la documentación de GREET [36] (Ver Figura 3.2) y son medias calculadas en base a operaciones reales en Estados Unidos. Ante la falta de registros de operaciones por modelo de aeronave en la UE se han usado estos rangos para el cálculo de consumo de combustible, ya que no son un dato crítico y sólo son necesarios para unificar los resultados acorde al tamaño de la aeronave.

TABLE 5 2009 U.S. Origin Only AEDT Aircraft Types and Operational Performance Data from the Volpe National Transportation Systems Center

Aircraft Type	Aircraft Class	Aircraft Operations	Average Payload (kg/operation)	Average Trip Great Circle Distance (km/operation)	As-Operated Aircraft Average Trip Petroleum Jet Fuel Consumption (kg/operation)	Aircraft LTO Cycle Average Petroleum Jet Fuel Consumption (kg/operation)
Passenger Aircraft	Single Aisle (SA)	3,838,461	18,230	1,366	4,986	565
	Small Twin Aisle (STA)	131,481	30,389	2,804	14,590	982
	Large Twin Aisle (LTA)	120,266	57,999	7,132	59,468	1,731
	Large Quad (LQ)	46,721	82,210	7,520	91,642	2,484
	Regional Jet (RJ)	3,382,535	7,017	755	1,728	257
	Business Jet (BJ)	95,238	1,581	1,177	1,730	273

Figura 3.2: Categorización de aeronaves y rangos típicos. Fuente: GREET [36]

El cálculo de consumo de combustible se ejecuta tal y como se describió en la sección de *Metodología 2.7: Inventario de fase de operación* para cada modelo de aeronave con su distancia típica de operación.

En las Tablas 3.3 y 3.4 se recogen los consumos de Jet Fuel en razón de consumo por kilómetro (kg/km), consumo por operación (kg/op) y consumo por pasajero (L/100km-pax), considerando la tasa de ocupación de cada avión de pasajeros en un 83% y la densidad del combustible Jet A1 en 0,804 kg/L.

La columna correspondiente a “% de vuelo en LTO” se refiere al porcentaje de combustible destinado al despegue y al aterrizaje o *Landing and Take-Off Cycle*, el cual se tendrá en cuenta posteriormente para el cálculo de GHG-100 en la sección del análisis *Tank-to-Wake*. Durante LTO, las emisiones derivadas de la combustión son ligeramente mayores y debe tenerse en cuenta durante el análisis. El porcentaje de combustible destinado a LTO será mayor cuanto más corto sea el trayecto.

Para el cálculo de estos consumos se han omitido las particularidades que pueda tener cada aeronave con el objetivo de reducir el consumo o emisiones, por lo que los resultados podrían no ser exactos. Sin embargo, el rango típico de valores de consumo por pasajero en aeronaves comerciales actuales se sitúa entre los 2-3 L/100km-pax, el cual coincide con los consumos medios calculados.

AIRBUS						
Modelo	Tipo	Rango típico [km]	Consumo [kg/km]	Consumo [kg/op]	Consumo [L/(pax-100km)]	% vuelo en LTO
A220-100	SA	1300	3,08	4004	3,83	40,26
A220-300	SA	1300	3,42	4446	3,64	40,10
A318	SA	1300	1,91	2483	2,21	67,59
A319-100	SA	1300	2,46	3198	2,35	56,82
A320-200	SA	1300	3,94	5122	3,27	38,17
A320 Neo	SA	1300	3,46	4498	2,87	44,24
A321-100	SA	1300	4	5200	3,23	42,42
A321-200	SA	1300	4,91	6383	3,97	36,36
A321 Neo	SA	1300	4,35	5655	3,51	41,27
A330-200	STA	2800	7,86	22008	4,75	25,36
A330-300	STA	2800	6,73	18844	3,36	28,42
A330-900	STA	2800	8,42	23576	4,05	25,48
A340-300	LQ	7500	7,9	59250	3,52	11,62
A340-600	LQ	7500	10,99	82425	4,29	11,60
A350-900	LTA	7100	6,68	47428	3,08	14,79
A350-1000	LTA	7100	7,96	56516	3,26	14,35
A380	LQ	7500	15,82	118650	4,27	11,91

Cuadro 3.3: Consumos típicos de la flota AIRBUS

BOEING						
Modelo	Tipo	Rango típico [km]	Consumo [kg/km]	Consumo [kg/op]	Consumo [L/(pax-100km)]	% vuelo en LTO
B737-700	SA	1300	2,02	2626	2,04	63,41
B737-800	SA	1300	2,85	3705	2,31	51,73
B737-900	SA	1300	3,49	4537	2,76	43,74
B737-MAX 8	SA	1300	2,43	3159	1,93	62,40
B737-MAX 9	SA	1300	2,77	3601	1,89	57,19
B747-400	LQ	7500	11,5	86250	4,30	11,27
B747-800	LQ	7500	13,17	98775	3,83	11,76
B757-300	SA	1300	6,48	8424	3,47	36,56
B767-300	STA	2800	6,21	17388	3,21	24,43
B777-200	LTA	7100	5,46	38766	2,45	16,86
B777-300	LTA	7100	5,04	35784	1,75	20,96
B787-8	STA	2800	7,42	20776	3,10	25,69
B787-9	STA	2800	8,42	23576	3,11	25,55
B787-10	STA	2800	8,46	23688	2,87	26,82

Cuadro 3.4: Consumos típicos de la flota BOEING

Los consumos estimados en las tablas anteriores se corresponden con el consumo hipotético de cada modelo de aeronave recorriendo el rango típico que se le ha asociado, incluyendo todas las fases de vuelo.

Una vez más, se condensan los datos de consumo en los siguientes gráficos comparativos. Se puede observar en la comparativa de consumo por operación de la Figura 3.3 la relación directa entre el tamaño de la aeronave y su consumo, motivado principalmente tener mayores distancias típicas de vuelo.

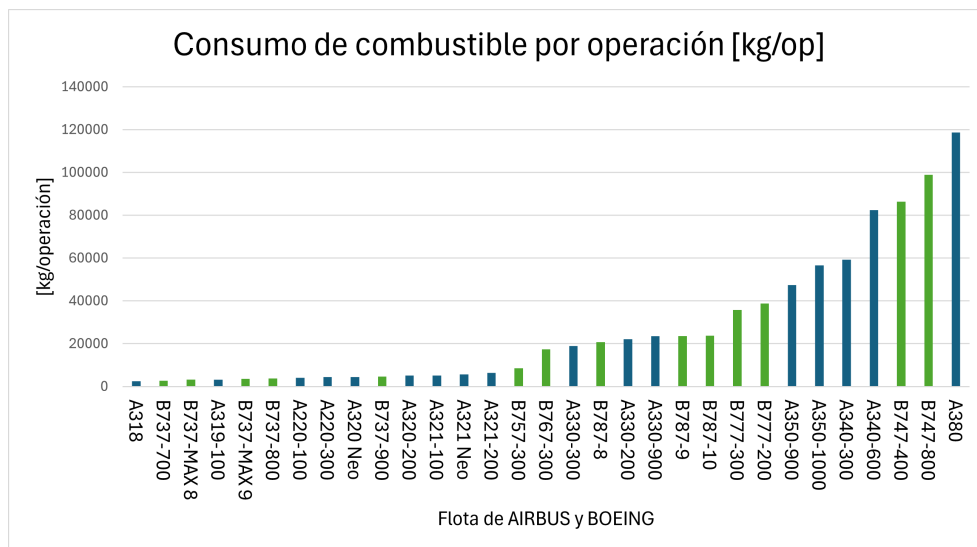


Figura 3.3: Consumo de combustible por operación típica. Comparación entre modelos de aeronaves.

Resultados similares aparecen en la Figura 3.4 con el consumo por kilómetro recorrido. En este caso, los aviones de más tamaño consumen más combustible porque presentan un peso mayor de la estructura y llevan más carga de pago.

Es en la Figura 3.5 de consumo por pasajero donde cambia la tendencia: no existe un orden aparente de aeronaves según su categoría por tener en cuenta tanto el número de pasajeros como la distancia recorrida. A mayor número de pasajeros mayor consumo total, pero también menor consumo unitario generado por el desplazamiento de cada pasajero. Centrando la vista en el fabricante, en general se observa por la distribución de colores que BOEING tiene menor consumo por pasajero que AIRBUS.

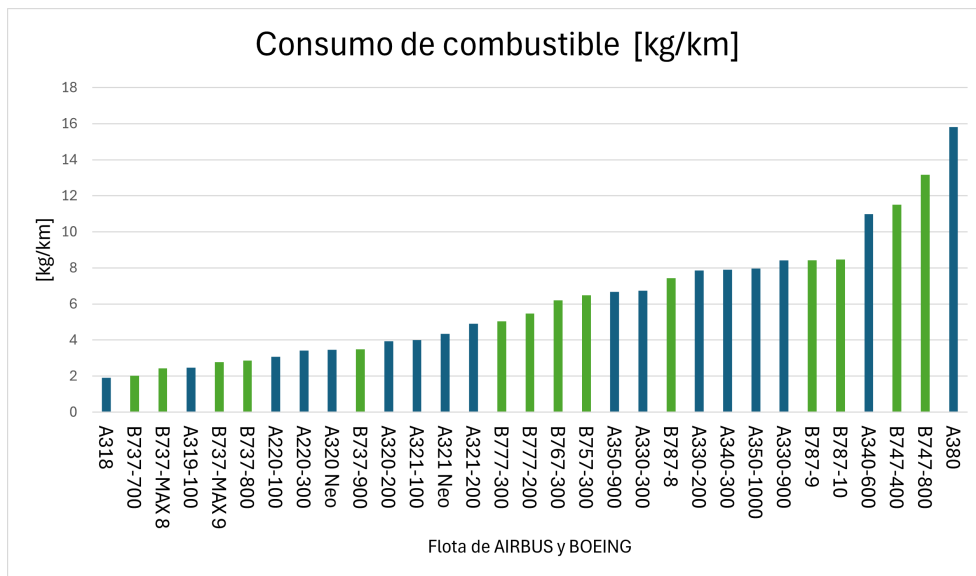


Figura 3.4: Consumo de combustible por kilómetro recorrido. Comparación entre modelos de aeronaves.

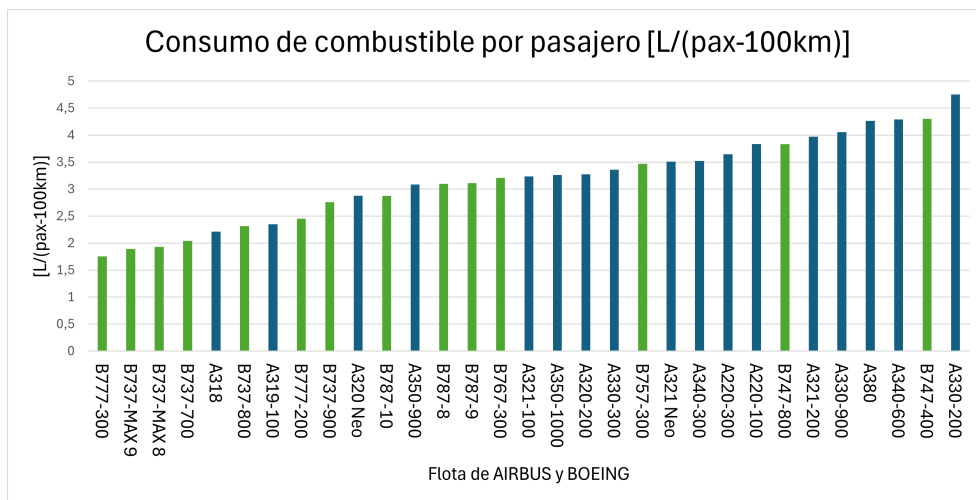


Figura 3.5: Consumo de combustible por pasajero. Comparación entre modelos de aeronaves.

Por último y a modo de resumen, se compara la relación de consumo y peso para todos los modelos de aeronave. En la Figura 3.6 se puede ver la situación de cada avión en términos de consumo en kg/km y su peso operacional en vacío OEW.

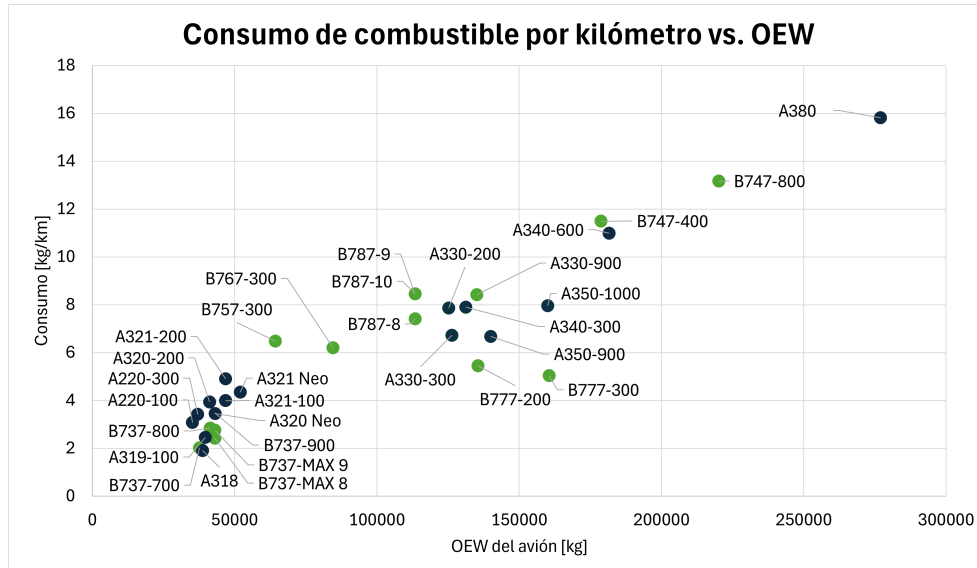


Figura 3.6: Consumo en kg/km frente a OEW por aeronave.

La distribución anterior muestra una clara relación directa entre el peso base de la aeronave y su consumo por km. Se puede apreciar cómo los aviones de fuselaje estrecho tienen los consumos más pequeños y muy similares entre ellos.

3.2. Análisis Cradle-to-Gate

A continuación se presentan y discuten los resultados de la fase del análisis *cradle-to-gate*, que comprende todo el proceso de producción de la aeronave “hasta las puertas de la fábrica”. Tal y como se describe en la metodología del ACV, se sigue el enfoque del desglose de materiales o *Bill of Materials (BoM)*.

En las tablas 3.5 y 3.6 se muestran los porcentajes aproximados de cada material con los que cuenta la estructura básica de los distintos modelos de aeronave. Estos datos se han obtenido de fuentes variadas procedentes principalmente de publicidad y seminarios de los propios fabricantes. No ha sido

posible encontrar los desgloses completos de todos los modelos, por lo que algunos porcentajes son aproximaciones informadas.

Desglose de materiales en% - AIRBUS						
Modelo	Aluminio	Acero	Titanio	Nickel	CFRP	GFRP
A220	24,0%	1,0%	8,0%	4,0%	36,8%	9,2%
A320	72,0%	9,0%	6,0%	3,0%	8,0%	2,0%
A330	58,3%	19,2%	7,7%	2,8%	9,2%	1,0%
A340	58,3%	19,2%	7,7%	2,8%	9,6%	2,4%
A350	19,0%	6,0%	14,0%	4,0%	42,4%	10,6%
A380	61,0%	5,0%	5,0%	4,0%	17,6%	4,4%

Cuadro 3.5: Desglose de materiales en aeronaves de AIRBUS.

Fuentes: [18], [39], [40], [41], [42], [43].

Desglose de materiales en% - BOEING						
Modelo	Aluminio	Acero	Titanio	Nickel	CFRP	GFRP
B737	70,0%	6,0%	9,0%	4,0%	6,0%	2,0%
B747	81,0%	13,0%	4,0%	1,0%	1,0%	0,0%
B757	80,0%	14,0%	2,0%	1,0%	2,4%	0,6%
B767	80,0%	14,0%	2,0%	1,0%	2,4%	0,6%
B777	70,0%	11,0%	7,0%	1,0%	8,8%	2,2%
B787	20,0%	10,0%	15,0%	5,0%	40,0%	10,0%

Cuadro 3.6: Desglose de materiales en aeronaves de BOEING.

Fuentes: [40], [44], [45], [46].

Las emisiones GHG-100 por kg de material utilizado son determinadas por *GREET* y dependen del proceso de fabricación seguido. Para este análisis se eligen los procesos más comunes dentro del sector aeronáutico, teniendo en cuenta los requisitos de aeronavegabilidad y fiabilidad extra con los que deben contar las diferentes piezas del avión. Además, se incluyen los porcentajes por defecto de materia prima reciclada con el objetivo de simular la reducción de emisiones generada durante el reciclado en la fase EoL.

En la siguiente tabla 3.7 se muestra el nombre completo del proceso de producción elegido dentro del software junto a las emisiones GHG-100 unitarias en kg.

Material	Emisiones GHG-100 por kg de material - Escenario 2024						
	Aluminio	Acero	Titanio	Nickel	CFRP	GFRP	Jet Fuel
Material GREET 2023	Mix: Average Wrought Aluminum	Mix: Average Steel	Titanium Forged Metal Production (Virgin)	Mix: Average Nickel	Final CFRP Product for High Pressure Vessels: Combined	Mix: GFRP Production Mix	Conventional Jet Fuel from Crude Oil
GHG-100 material [kg CO₂eq./kg]	15,5	2,3	53,3	12,2	16,6	4,4	0,488

Cuadro 3.7: Emisiones GHG-100 por kg de material según GREET 2023 [kg CO₂ eq./kg]

Con las emisiones unitarias por material y el desglose porcentual de los materiales que conforman la estructura, es posible calcular las emisiones totales a partir del peso total de la aeronave.

Para determinar el peso estructural de la aeronave, también conocido como *Manufacturer's Empty Weight (MEW)*, se parte del peso en vacío u *Operational Empty Weight (OEW)* y se sustrae el peso de fluidos, equipos de emergencia, asientos, personal de tripulación y cualquier otro equipo desmontable.

Esta información se encuentra dentro del documento *Weight and Balance Manual (WBM)* y sólo se ha podido encontrar este manual para el Airbus A320-200 [47], por lo que se ha calculado el porcentaje del peso de la estructura sobre el peso total del avión y se ha aplicado para el resto de modelos. Además, el propio documento incluye unas mediciones reales de sistemas no desmontables incluidos en el peso MEW pero que no forman parte de la estructura del avión (particiones, compartimentos, instrumentos, equipos electrónicos, radares...) y se ha sustraído su peso manualmente. En la siguiente Tabla 3.8 se muestran los cálculos efectuados:

DESGLOSE DE PESOS: WBM A320-200		
EQUIPO	PESO [kg]	% DEL PESO TOTAL
OEW	43497	100%
Unusable fuel	- 65	
Oil for engines and APU	- 63	
Water for galleys and toilets	- 200	
Fluids for toilets	- 10	
Aircraft documents and toolkits	- 22	
Passenger seats and life jackets	- 2527	
Galley structure and fixed equipment	- 530	
Catering and removable equipment	- 834	
Emergency equipment	- 285	
Crew	- 650	
MEW	38311	88%
Otros sistemas	- 1259	
MEW estructural	37052	85%

Cuadro 3.8: Cálculo de la contribución del peso estructural a partir del WBM

Las emisiones derivadas de la producción de cada modelo de aeronave se calculan, por lo tanto, sobre un 85% del peso OEW. Los resultados totales por kg de GHG-100 se muestran en las tablas 3.9 y 3.10.

Emisiones GHG-100 por material de producción - AIRBUS [kg GHG-100]

Modelo	OEW [kg]	MEW [kg]	Aluminio	Acero	Titanio	Nickel	CFRP	GFRP	TOTAL EMISIONES [kg CO ₂ eq.]
A220-100	35221	29938	111369	689	127655	14610	182884	12119	449325
A220-300	37081	31519	117250	725	134396	15381	192542	12759	473054
A318	38818	32995	368228	6830	105519	12076	43818	2904	539374
A319-100	39725	33766	376831	6990	107984	12358	44842	2971	551977
A320-200	41244	35057	391241	7257	112114	12831	46556	3085	573083
A320 Neo	43144	36672	409264	7591	117278	13422	48701	3227	599484
A321-100	46856	39828	444476	8244	127369	14577	52891	3505	651062
A321-200	46856	39828	444476	8244	127369	14577	52891	3505	651062
A321 Neo	52000	44200	493272	9149	141352	16177	58698	3890	722537
A330-200	125206	106425	961710	46997	436779	36355	162532	4683	1649057
A330-300	126352	107399	970513	47427	440777	36688	164020	4726	1664151
A330-900	135093	114829	1037653	50709	471270	39226	175367	5052	1779276
A340-300	131215	111533	1007866	49253	457742	38100	177739	11778	1742476
A340-600	181606	154365	1394920	68168	633530	52731	245996	16301	2411646
A350-900	140000	119000	350455	16422	887978	58072	837570	55502	2205998
A350-1000	160000	136000	400520	18768	1014832	66368	957222	63430	2521141
A380	277000	235450	2226180	27077	627474	114900	687891	45583	3729104

Cuadro 3.9: GHG-100 por material de producción de aeronaves AIRBUS.

El gráfico 3.7 permite ver cómo el aluminio es el material que más emisiones genera, consecuencia de ser el material principal en la mayoría de modelos.

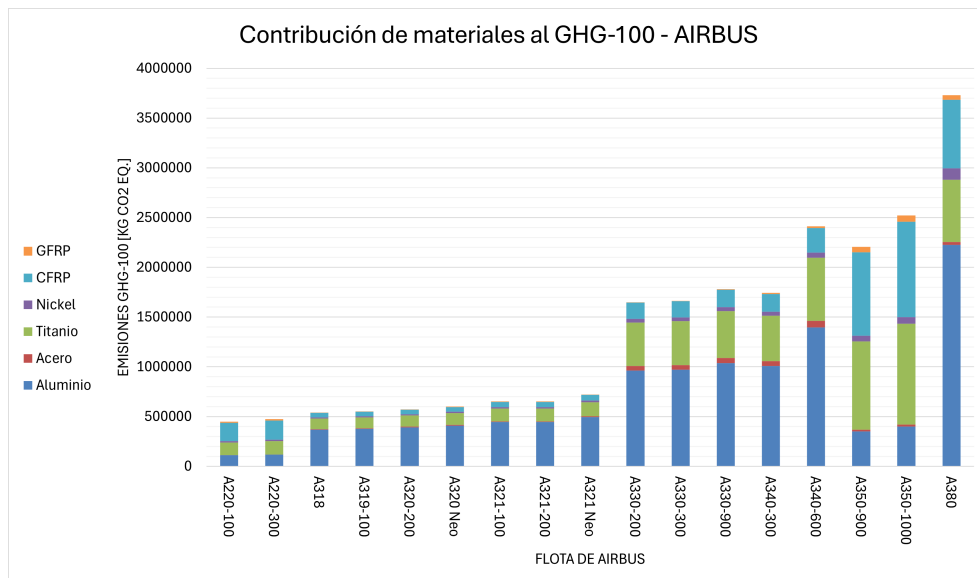


Figura 3.7: Contribución de los materiales de cada aeronave a las emisiones GHG-100 - AIRBUS.

Emisiones GHG-100 por material de producción - BOEING [kg GHG-100]

Modelo	OEW [kg]	MEW [kg]	Aluminio	Acero	Titanio	Nickel	CFRP	GFRP	TOTAL EMISIONES [kg CO ₂ eq.]
B737-700	37648	32000,8	347209	4416	153508	15616	31873	2816	555438
B737-800	41413	35201,1	381931	4858	168859	17178	35060	3098	610985
B737-900	42901	36465,9	395654	5032	174927	17795	36320	3209	632938
B737-MAX8	43091	36627,4	397407	5055	175701	17874	36481	3223	635741
B737-MAX9	43091	36627,4	397407	5055	175701	17874	36481	3223	635741
B747-400	178756	151942,6	1907639	45431	323942	18537	25222	0	2320771
B747-800	220128	187108,8	2349151	55946	398916	22827	31060	0	2857900
B757-300	64340	54689,0	678144	17610	58298	6672	21788	1444	783956
B767-300	84541	71859,9	891062	23139	76603	8767	28629	1897	1030097
B777-200	135550	115217,5	1250110	29150	429876	14057	168310	11153	1902656
B777-300	160530	136450,5	1480488	34522	509097	16647	199327	13208	2253289
B787-8	113398	96388,3	298804	22169	770624	58797	640018	42411	1832824
B787-9	113398	96388,3	298804	22169	770624	58797	640018	42411	1832824
B787-10	113398	96388,3	298804	22169	770624	58797	640018	42411	1832824

Cuadro 3.10: GHG-100 por material de producción de aeronaves BOEING.

Observando el gráfico 3.8 se llega a la misma conclusión: el aluminio es el material que genera más emisiones, seguido del titanio y del CFRP. Esta tendencia cambiará en la nueva generación de aeronaves por el aumento previsto del uso de materiales compuestos como CFRP, debido a sus propiedades mecánicas y bajo peso.

En aviones más modernos como el Boeing 787 o el Airbus A350 ya se puede ver esta nueva tendencia.

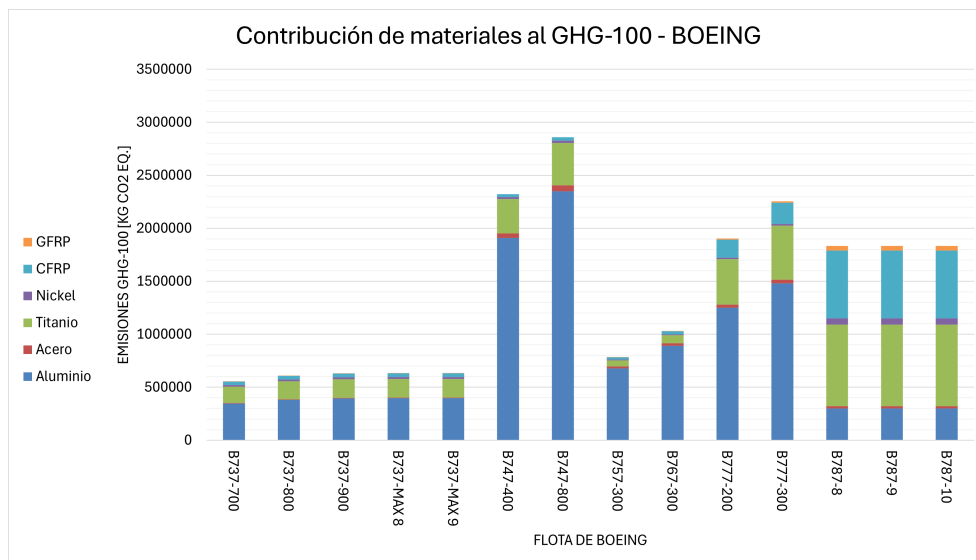


Figura 3.8: Contribución de los materiales de cada aeronave a las emisiones GHG-100 - BOEING.

Por último y a modo de resumen, se presenta la comparativa entre las emisiones en kg de $CO_2eq.$ de esta fase *Cradle-to-Gate* y el peso OEW de cada aeronave.

En la figura 3.9 resulta evidente la relación entre el peso del avión y las emisiones causadas durante esta fase: a más material, mayor es su impacto ambiental. La similitud entre las emisiones unitarias del aluminio y el CFRP provoca una diferencia escasa o nula entre los aviones más modernos (con mayor contenido en CFRP) y los más antiguos.

Aunque no sea visible en los gráficos, la fabricación de aeronaves con mayor contenido en CFRP tiene un impacto ambiental negativo por la dificultad que supone actualmente su reutilización o reciclado, al contrario que el aluminio.

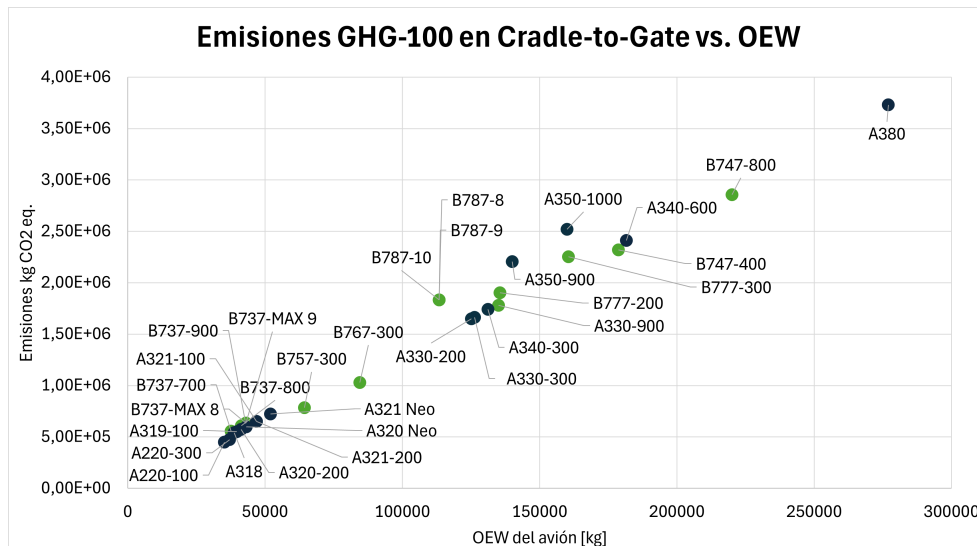


Figura 3.9: Emisiones GHG-100 en fase *Cradle-to-Gate* según el OEW de la aeronave.

3.3. Análisis Well-to-Wake

En esta sección se analiza la fase de operación de la aeronave, cuyas emisiones provienen de la combustión (fase *Tank-to-Wake*) y de la producción de ese mismo combustible (fase *Well-to-Tank*).

Previo al cálculo de emisiones, se debe calcular el combustible total que puede consumir una aeronave a lo largo de toda su vida útil. Como ya se comentó en la metodología, se sitúa el límite de todas las aeronaves en 60000 horas de vuelo (Flight Hours, FH) para dar uniformidad a los resultados.

El consumo en kg/h se ha obtenido multiplicando el consumo en kg/km por la velocidad de crucero típica de cada modelo, que está entre los 800-900 km/h para todas las aeronaves. Una vez más, se distingue el consumo de las fases LTO respecto del consumo en crucero a partir del porcentaje LTO calculado en el análisis de la flota.

En las tablas 3.11 y 3.12 se puede ver como el consumo de combustible total es del orden de 10^8 kg para 60000 horas de vuelo: sabiendo que cada kg de combustible emite unos 3,16 kg de CO_2 y la cantidad de aeronaves activas basta para entender la importancia del desarrollo de combustibles de aviación más sostenibles.

Consumo de combustible en 60000 horas de vuelo (60000 FH) - AIRBUS

Modelo	Consumo [kg/km]	Consumo [kg/h]	Consumo 60000 FH [kg]	Consumo 60000 FH LTO [kg]	Consumo 60000 FH crucero [kg]
A220-100	3,08	2553,32	153199200	61685556	91513644
A220-300	3,42	2835,18	170110800	68220125	101890675
A318	1,91	1581,48	94888800	64139927	30748873
A319-100	2,46	2039,34	122360400	69521215	52839185
A320-200	3,94	3262,32	195739200	74711077	121028123
A320 Neo	3,46	2906,40	174384000	77150769	97233231
A321-100	4,00	3332,00	199920000	84801737	115118263
A321-200	4,91	4090,03	245401800	89230031	156171769
A321 Neo	4,35	3623,55	217413000	89735773	127677227
A330-200	7,86	6846,06	410763600	104179039	306584561
A330-300	6,73	5861,83	351709800	99960413	251749387
A330-900	8,42	7367,50	442050000	112655142	329394858
A340-300	7,90	6880,90	412854000	47974190	364879810
A340-600	10,99	9726,15	583569000	67720900	515848100
A350-900	6,68	6032,04	361922400	53537056	308385344
A350-1000	7,96	7187,88	431272800	61901390	369371410
A380	15,82	14285,46	857127600	102071856	755055744

Cuadro 3.11: Consumo total de la fase de operación (60000 FH) - AIRBUS.

Consumo de combustible en 60000 horas de vuelo (60000 FH) - BOEING

Modelo	Consumo [kg/km]	Consumo [kg/h]	Consumo 60000 FH [kg]	Consumo 60000 FH LTO [kg]	Consumo 60000 FH crucero [kg]
B737-700	2,02	1695,14	101708504	64494290	37214214
B737-800	2,85	1695,14	101708504	52613534	49094970
B737-900	3,49	2928,73	175724099	76864772	98859327
B737-MAX 8	2,43	2039,21	122352310	76349082	46003228
B737-MAX 9	2,77	2324,53	139471563	79758849	59712714
B747-400	11,50	10383,51	623010798	70209083	552801715
B747-800	13,17	11891,38	713482801	83904324	629578477
B757-300	6,48	5506,71	330402862	120795820	209607042
B767-300	6,21	5277,27	316636076	77353023	239283053
B777-200	5,46	4871,91	292314754	49276777	243037977
B777-300	5,04	4497,15	269829004	56557089	213271915
B787-8	7,42	6699,62	401977402	103271079	298706323
B787-9	8,42	7602,54	456152254	116535247	339617007
B787-10	8,46	7638,65	458319248	122910867	335408381

Cuadro 3.12: Consumo total de la fase de operación (60000 FH) - BOEING.

Análisis Well-to-Tank

Partiendo de las emisiones unitarias de la producción de 1 kg de combustible de aviación convencional recogido en la Tabla 3.7, se calculan en las tablas 3.13 y 3.14 las emisiones GHG-100 derivadas de la producción de combustible por operación típica y tras las 60000 FH de vida útil.

Emisiones GHG-100 derivadas de la producción de combustible - AIRBUS					
Modelo	Consumo por operación [kg/op]	EMISIONES PRODUCCIÓN DE JET FUEL POR OPERACIÓN [kg CO₂eq./op]		EMISIONES TOTALES PRODUCCIÓN DE JET FUEL [kg CO₂eq.]	
				Consumo 60000 FH [kg]	
A220-100	4004		1955	153199200	74793381
A220-300	4446		2171	170110800	83049794
A318	2483		1212	94888800	46325661
A319-100	3198		1561	122360400	59737571
A320-200	5122		2501	195739200	95561835
A320 Neo	4498		2196	174384000	85136013
A321-100	5200		2539	199920000	97602943
A321-200	6383		3116	245401800	119807613
A321 Neo	5655		2761	217413000	106143201
A330-200	22008		10745	410763600	200538897
A330-300	18844		9200	351709800	171708241
A330-900	23576		11510	442050000	215813231
A340-300	59250		28926	412854000	201559451
A340-600	82425		40241	583569000	284904221
A350-900	47428		23155	361922400	176694135
A350-1000	56516		27592	431272800	210551694
A380	118650		57926	857127600	418458266

Cuadro 3.13: Emisiones derivadas de producción de combustible - AIRBUS.

Emisiones GHG-100 derivadas de producción de combustible - BOEING					
Modelo	Consumo por operación [kg/op]	EMISIONES PRODUCCIÓN DE JET FUEL POR OPERACIÓN [kg CO₂eq./op]		EMISIONES TOTALES PRODUCCIÓN DE JET FUEL [kg CO₂eq.]	
				Consumo 60000 FH [kg]	
B737-700	2626		1282	101708504	49655109
B737-800	3705		1809	101708504	49655109
B737-900	4537		2215	175724099	85790263
B737-MAX 8	3159		1542	122352310	59733621
B737-MAX 9	3601		1758	139471563	68091412
B747-400	86250		42108	623010798	304160102
B747-800	98775		48223	713482801	348329438
B757-300	8424		4113	330402862	161305981
B767-300	17388		8489	316636076	154584899
B777-200	38766		18926	292314754	142710986
B777-300	35784		17470	269829004	131733218
B787-8	20776		10143	401977402	196249387
B787-9	23576		11510	456152254	222698092
B787-10	23688		11565	458319248	223756040

Cuadro 3.14: Emisiones derivadas de producción de combustible - BOEING.

Análisis Tank-to-Wake

Por último, se procede a calcular las emisiones derivadas de la combustión en kg de GHG-100 por operación típica y tras las 60000 FH de operación.

Para ello, se obtienen las emisiones por contaminante y operación típica durante LTO de la misma documentación de GREET [36] de la que se obtuvieron las distancias típicas en la Figura 3.2. Las emisiones en crucero provienen de IPCC [38]. Estos valores se recalculan en la Tabla 3.15 para obtener emisiones por kg de combustible y se multiplican por los factores GWP correspondientes.

Aircraft Class	SA	STA	LTA	LQ
CH ₄ (g)	46	79	140	402
N ₂ O (g)	90	156	275	789
CO ₂ (kg)	1,775	3,088	5,444	7,824

Figura 3.10: Emisiones por operación típica en LTO. Fuente: GREET [36]

Emisiones por kg de Jet Fuel consumido

	LTO	Crucero
CH ₄ [kg]	0,0001	0,0000
N ₂ O [kg]	0,0002	0,0001
CO ₂ [kg]	3,1452	3,1500
TOTAL GHG-100 [kg]	3,2007	3,1765

Cuadro 3.15: Emisiones por contaminante y kg de combustible: LTO y crucero.

Las tablas 3.16 y 3.17 muestran los resultados GHG-100 derivados de la combustión en los escenarios planteados: puede comprobarse como las emisiones de operación oscilan entre las 10-300 toneladas, dependiendo de la longitud del viaje.

Por otra parte, asumiendo 60000 FH con el escenario actual estático, sólo las emisiones GHG-100 derivadas de la combustión durante la vida útil de una aeronave comercial tienen un orden de magnitud de $10^8 - 10^9$ kg.

Emisiones GHG-100 por operación y 60000 FH - AIRBUS				
Modelo	TOTAL EMISIONES por operación [kg CO ₂ eq./op]	GHG-100 60000 FH LTO [kg]	GHG-100 60000 FH crucero [kg]	TOTAL EMISIONES 60000 FH [kg CO ₂ eq.]
A220-100	12758	197438010	290693089	488131099
A220-300	14166	218353317	323655728	542009045
A318	7928	205293757	97673794	302967551
A319-100	10202	222517738	167843670	390361407
A320-200	16317	239129016	384445833	623574849
A320 Neo	14336	246937780	308861358	555799138
A321-100	16571	271426365	365673161	637099526
A321-200	20332	285600080	496079623	781679703
A321 Neo	18020	287218815	405566712	692785528
A330-200	70044	333447623	973865859	1307313482
A330-300	59988	319944997	799681926	1119626923
A330-900	75035	360577230	1046322767	1406899997
A340-300	188374	153551805	1159040718	1312592523
A340-600	262055	216755437	1638591490	1855346927
A350-900	150825	171356968	979586044	1150943012
A350-1000	179720	198128834	1173308283	1371437117
A380	377234	326703126	2398434572	2725137698

Cuadro 3.16: Emisiones GHG-100 por operación y en 60000 FH - AIRBUS.

Emisiones GHG-100 por operación y 60000 FH - AIRBUS				
Modelo	TOTAL EMISIONES por operación [kg CO ₂ eq./op]	GHG-100 60000 FH LTO [kg]	GHG-100 60000 FH crucero [kg]	TOTAL EMISIONES 60000 FH [kg CO ₂ eq.]
B737-700	8382	206427972	118210952	324638924
B737-800	11815	168401035	155950172	324351208
B737-900	14460	246022386	314026652	560049038
B737-MAX 8	10082	244371805	146129255	390501060
B737-MAX 9	11488	255285505	189677437	444962942
B747-400	274209	224719407	1755974648	1980694055
B747-800	314040	268553998	1999856032	2268410030
B757-300	26833	386633238	665816769	1052450007
B767-300	55336	247585139	760082617	1007667756
B777-200	123298	157721019	772010135	929731154
B777-300	113850	181023237	677458238	858481476
B787-8	66124	330541500	948840635	1279382135
B787-9	75035	372996350	1078793421	1451789771
B787-10	75399	393402905	1065424721	1458827626

Cuadro 3.17: Emisiones GHG-100 por operación y en 60000 FH - BOEING.

Para terminar, en la Figura 3.11 se muestra la relación entre las emisiones totales de operación o *Well-to-Wake* en función de los pesos OEW por modelo de aeronave.

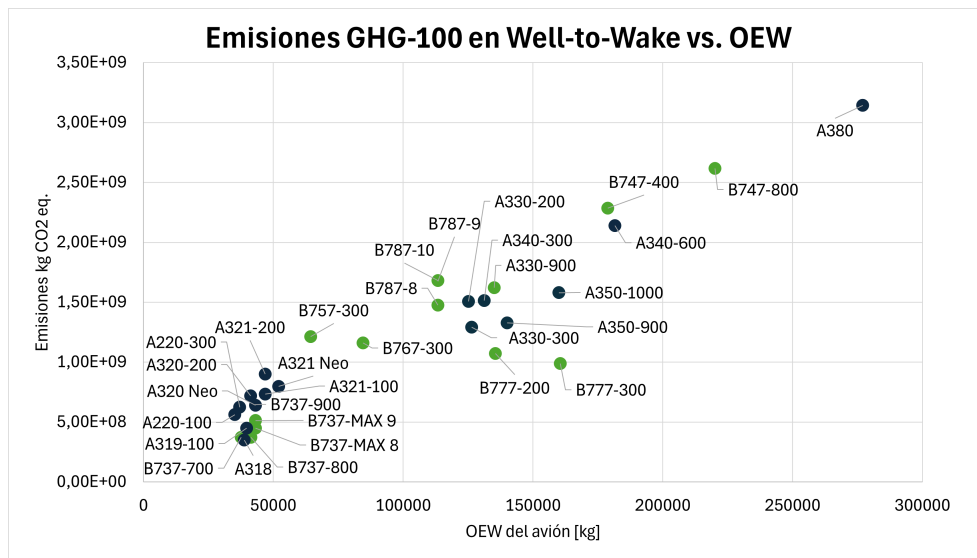


Figura 3.11: Emisiones Well-to-Wake por OEW y modelo de aeronave.

En este gráfico se vuelve a dar la relación directa de consumo-emisiones, sumado a la tendencia de aviones más pesados a consumir más combustible por kilómetro.

3.4. Análisis Cradle-to-Grave

Para finalizar sólo queda sumar las emisiones de las tres fases para obtener los resultados del ACV propuesto.

Los resultados de las tablas 3.12 y 3.13 son acompañados por los gráficos de barras apiladas 3.12 y 3.13 de la siguiente página, donde se ve de forma más clara la contribución de cada fase. Se puede observar cómo la fabricación de la propia aeronave tiene una importancia ínfima en comparación con las emisiones causadas durante la fase de operación.

RESULTADOS ACV: EMISIONES GHG-100 (CRADLE-TO-GRAVE) - AIRBUS				
Modelo	Total emisiones Cradle-To-Gate [kg CO₂eq.]	Total emisiones Well-To-Tank [kg CO₂eq.]	Total emisiones Tank-To-Wake [kg CO₂eq.]	TOTAL EMISIONES CRADLE-TO-GRAVE [kg CO₂eq.]
A220-100	4,49E+05	7,48E+07	4,88E+08	5,63E+08
A220-300	4,73E+05	8,30E+07	5,42E+08	6,26E+08
A318	5,39E+05	4,63E+07	3,03E+08	3,50E+08
A319-100	5,52E+05	5,97E+07	3,90E+08	4,51E+08
A320-200	5,73E+05	9,56E+07	6,24E+08	7,20E+08
A320 Neo	5,99E+05	8,51E+07	5,56E+08	6,42E+08
A321-100	6,51E+05	9,76E+07	6,37E+08	7,35E+08
A321-200	6,51E+05	1,20E+08	7,82E+08	9,02E+08
A321 Neo	7,23E+05	1,06E+08	6,93E+08	8,00E+08
A330-200	1,65E+06	2,01E+08	1,31E+09	1,51E+09
A330-300	1,66E+06	1,72E+08	1,12E+09	1,29E+09
A330-900	1,78E+06	2,16E+08	1,41E+09	1,62E+09
A340-300	1,74E+06	2,02E+08	1,31E+09	1,52E+09
A340-600	2,41E+06	2,85E+08	1,86E+09	2,14E+09
A350-900	2,21E+06	1,77E+08	1,15E+09	1,33E+09
A350-1000	2,52E+06	2,11E+08	1,37E+09	1,58E+09
A380	4,04E+06	4,18E+08	2,73E+09	3,15E+09

Cuadro 3.18: Emisiones GHG-100 totales, Cradle-To-Grave - AIRBUS.

RESULTADOS ACV: EMISIONES GHG-100 (CRADLE-TO-GRAVE) - BOEING				
Modelo	Total emisiones Cradle-To-Gate [kg CO₂eq.]	Total emisiones Well-To-Tank [kg CO₂eq.]	Total emisiones Tank-To-Wake [kg CO₂eq.]	TOTAL EMISIONES CRADLE-TO-GRAVE [kg CO₂eq.]
B737-700	5,55E+05	4,97E+07	3,25E+08	3,75E+08
B737-800	6,11E+05	4,97E+07	3,24E+08	3,75E+08
B737-900	6,33E+05	8,58E+07	5,60E+08	6,46E+08
B737-MAX 8	6,36E+05	5,97E+07	3,91E+08	4,51E+08
B737-MAX 9	6,36E+05	6,81E+07	4,45E+08	5,14E+08
B747-400	2,32E+06	3,04E+08	1,98E+09	2,29E+09
B747-800	2,86E+06	3,48E+08	2,27E+09	2,62E+09
B757-300	7,84E+05	1,61E+08	1,05E+09	1,21E+09
B767-300	1,03E+06	1,55E+08	1,01E+09	1,16E+09
B777-200	1,90E+06	1,43E+08	9,30E+08	1,07E+09
B777-300	2,25E+06	1,32E+08	8,58E+08	9,92E+08
B787-8	1,83E+06	1,96E+08	1,28E+09	1,48E+09
B787-9	1,83E+06	2,23E+08	1,45E+09	1,68E+09
B787-10	1,83E+06	2,24E+08	1,46E+09	1,68E+09

Cuadro 3.19: Emisiones GHG-100 totales, Cradle-To-Grave - BOEING.

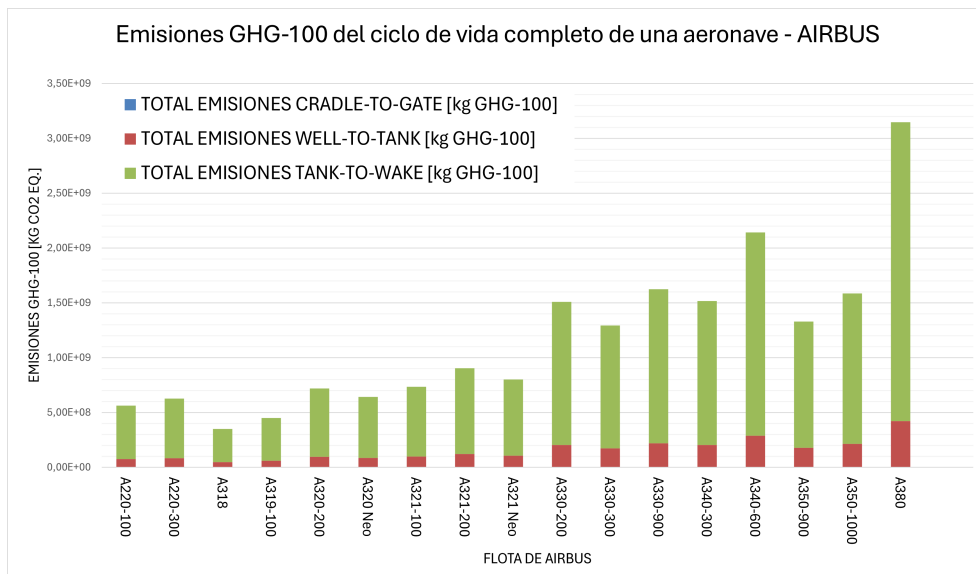


Figura 3.12: Contribución de cada fase a las emisiones GHG-100 totales - AIRBUS.

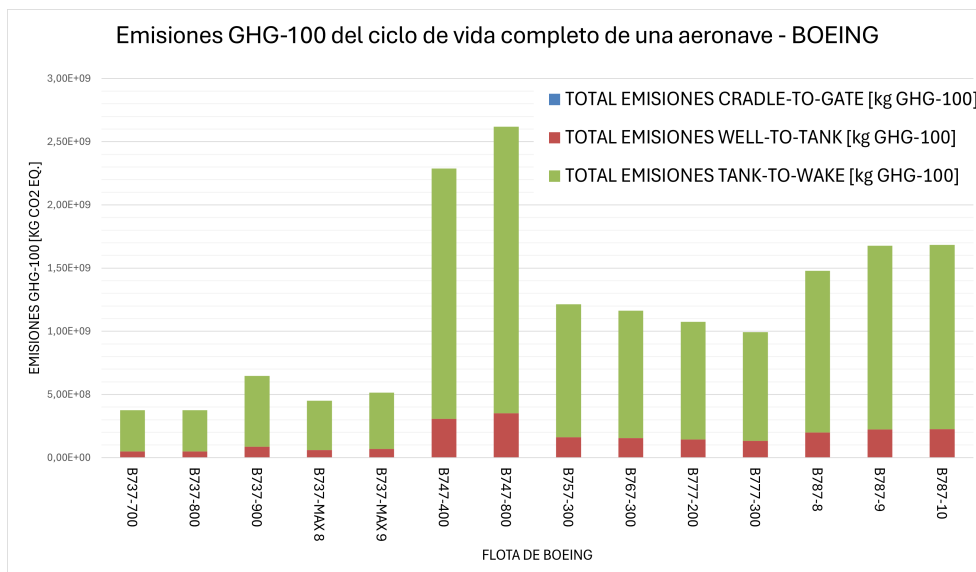


Figura 3.13: Contribución de cada fase a las emisiones GHG-100 totales - BOEING.

Y por último, en la Figura 3.14 se muestra la relación entre las emisiones totales absolutas del ciclo de vida completo *Cradle-to-Grave* en función de los pesos OEW por modelo de aeronave.

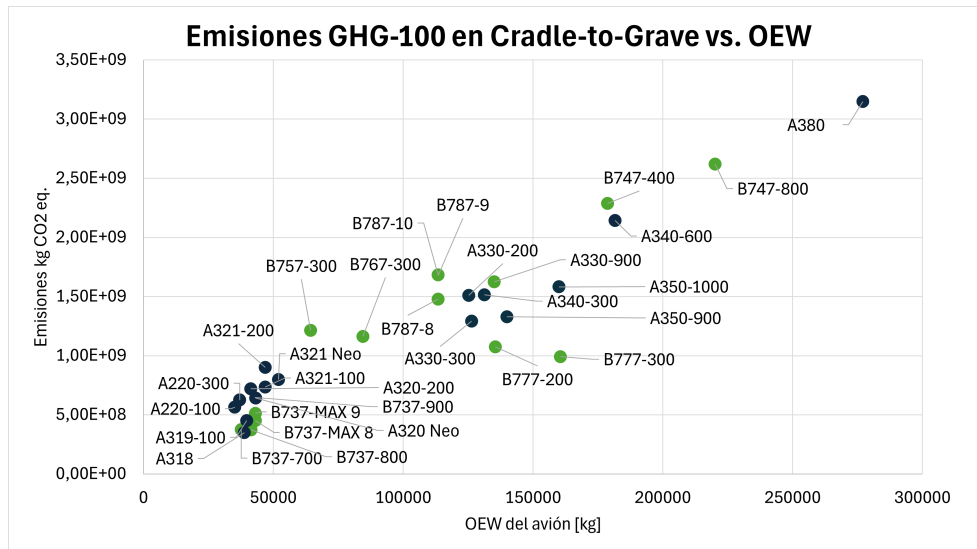


Figura 3.14: Emisiones Cradle-to-Grave por OEW y modelo de aeronave.

Como se ha podido comprobar en los gráficos de barras de la página anterior, la fase de fabricación de la aeronave es prácticamente despreciable, por lo que las emisiones totales y las asociadas a la fase *Well-to-Wake* no sufren mucha variación.

Capítulo 4

Análisis de ciclo de vida de la flota a futuro

En este capítulo se muestran los resultados del análisis de ciclo de vida para la flota a futuro en las décadas de 2030, 2040 y 2050. Primero, se exploran las vías de reducción de emisiones posibles y la normativa existente al respecto, centrándose en la producción y el uso de combustibles sostenibles y alternativos de aviación. Seguidamente, se propone el inventario de ciclo de vida en base a los avances tecnológicos pronosticados y se completa el ACV.

Para finalizar, se efectúa una comparativa entre el estado actual y las décadas de estados futuros para los mixes energéticos descritos en la metodología.

4.1. Normativa y objetivos

La reducción de la emisiones de CO_2 ha sido un tema muy debatido desde hace varias décadas y ha propiciado el desarrollo tecnológico sostenible en varias industrias, como en el sector automovilístico, a través de regulaciones e incentivos a empresas. En el sector de la aviación, en cambio, la reducción de emisiones ha sido una idea abstracta hasta el reciente desarrollo de nuevos combustibles alternativos. En los últimos años han aparecido soluciones tangibles al problema de la contaminación a través del uso de gas hidrógeno o energía eléctrica como combustible y, especialmente, a la producción de combustibles sostenibles de aviación (SAF).

La Unión Europea tiene como objetivo conseguir la neutralidad climática para el año 2050, que pasa por la descarbonización de la industria en su conjunto (Net-Zero Industry Act [48]). Algunas de las estrategias más respaldadas por la UE son el uso de fuentes de energía limpias, la inclusión de pilas y electrolizadores de hidrógeno, la producción de bio-combustibles o combusti-

bles sintéticos sostenibles o la captura, almacenamiento y reutilización del CO_2 atmosférico (procesos CCS/CCU).

Ha sido este mismo año 2024 cuando se ha aprobado la primera regulación a nivel europeo que controla y ofrece directrices claras sobre la sostenibilidad del transporte aéreo. Esta norma es el *Reglamento (UE) 2023/2405 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de octubre de 2023, relativo a la garantía de unas condiciones de competencia equitativas para un transporte aéreo sostenible (ReFuelEU Aviation)* [49]. Las afirmaciones más relevantes de esta regulación son las siguientes:

- El desarrollo de SAF no debe acarrear un incremento de costes demasiado alto para no desestabilizar la economía dentro de la Unión Europea.
- El desarrollo de SAF no debe afectar negativamente a la industria agrícola o ganadera. No se considera combustible sostenible a aquellos que requieran ocupar tierra extra fértil o partan de alimentos de consumo humano (máximo permitido: 3% del total de SAF producido).
- Se regula la práctica del “Fuel Tankering” o cargar el tanque de combustible más de la cuenta en aeropuertos con precios inferiores: esto genera más emisiones de GHG por km de vuelo y desde ahora se debe presentar un desglose de los repostajes efectuados por aerolínea y avión. Además, el 90% del combustible repostado debe provenir de dentro de la UE.
- Se introduce el concepto de etiqueta ecológica para los aviones en función de las emisiones de operación por pasajero. Las emisiones derivadas del SAF se calculan en base a la metodología de CORSIA [50].
- Y la más relevante, a partir de 2025 se obliga a las aerolíneas a incorporar un porcentaje determinado de SAF en sus operaciones (Ver Tabla 4.1):

AÑO	% mínimo de SAF	% de SAF sintético
2025	2%	-
2030	6%	1,2%
2032	6%	2%
2035	20%	5%
2040	34%	10%
2045	42%	15%
2050	70%	35%

Cuadro 4.1: Porcentaje mínimo de SAF por año. *Fuente: ReFuelEU [49]*

Estos porcentajes se pueden sustituir por el uso de otros combustibles como el hidrógeno o la electricidad.

4.2. Combustibles sostenibles

Sustainable Aviation Fuels (SAF)

Según la definición de *ReFuelEU* [49], un combustible SAF es un combustible destinado a la aviación líquido, de inyección directa y totalmente compatibles con los combustibles convencionales y los motores de aeronaves existentes.

Por esta misma definición no se consideran como SAF la propulsión por H_2 ni la propulsión eléctrica, a pesar de ser más sostenibles que los combustibles convencionales. En estos últimos años se ha desviado el foco de atención del hidrógeno en favor del SAF por ser la solución más viable a corto plazo, ya que varias empresas de producción de combustible han incorporado los SAF en su producción. IATA estima que los SAF podrían reducir hasta un 65% de las emisiones necesarias para adquirir la neutralidad climática en 2050 para el sector de la aviación (Figura 4.1).

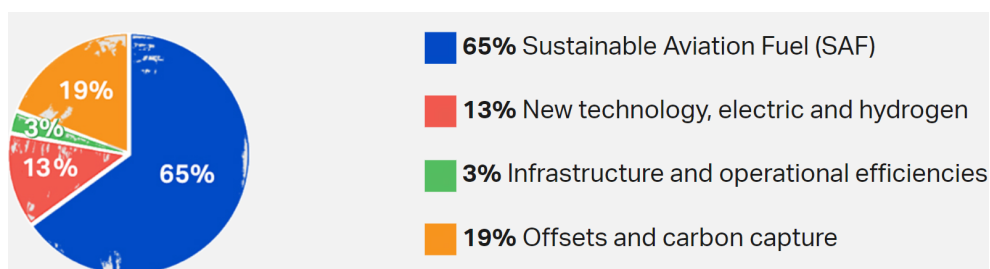


Figura 4.1: Contribuciones a la neutralidad climática 2050. Fuente: IATA[51]

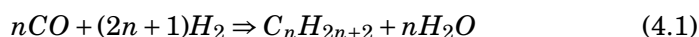
La reducción de impacto ambiental no proviene de la fase de operación de la aeronave, ya que los productos de combustión son idénticos a los convencionales. Es en la fase de producción donde se reduce el impacto según el proceso y las materias primas que sean empleadas.

CORSIA cuenta con un manual [50] en el que se explica la metodología a seguir para calcular el impacto GHG-100 de los SAF reconocidos por este mismo organismo, aplicando unos factores de ajuste considerando una serie de criterios adicionales: por ejemplo, se aplican factores positivos si el proceso de producción utiliza desechos no reutilizables, aumenta la eficiencia de procesos industriales ya existentes o convierte suelo no fértil en terreno útil; mientras que se aplican factores negativos si el proceso requiere de tierra fértil, genera emisiones adicionales o compite con la producción de alimentos.

En otro documento complementario de CORSIA [52], se listan los valores típicos de CO_2 equivalente que emiten los distintos procesos de producción de SAF.

Existe una gran variedad de métodos para producir SAF y un mayor número aún de materias primas válidas. Dependiendo de su composición, pueden mezclarse con Jet Fuel en proporciones entre el 10% y el 50%. A continuación se describen algunos de ellos [53] [54]:

- **Fischer-Tropsch (FT) Synthetic Paraffinic Kerosene (SPK):** este proceso es capaz de producir combustibles sintéticos a partir de carbón o gas natural. Recientemente ha sido adaptado para usar residuos orgánicos (biomasa, residuos de madera o cultivos...) como materia prima, previa conversión a un gas de síntesis. La reacción química principal de producción de parafinas (queroseno) es la siguiente,



que tiene reacciones secundarias indeseadas como la producción de CH_4 , alcoholes o deposición de carbono sólido. El FT-SPK tiene un máximo de mezcla con combustible convencional del 50%.

- **Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA):** este método es el más utilizado actualmente para producir SAF por su similitud con la producción de biodiesel. Utiliza productos con alto contenido en aceites y grasas (algas, aceite de camelina, grasa animal...) y los refina por hidroprocesamiento. Las reacciones químicas simplificadas en HEFA son las siguientes:

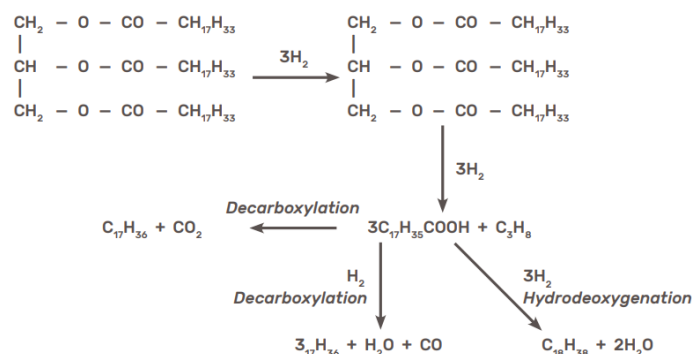


Figura 4.2: Reacción de hidroprocesamiento en HEFA. Fuente: CBSCI [55]

Como se puede ver en la Figura 4.2, tras la primera reacción se añaden otros procesos que eliminan el oxígeno de la mezcla. Esto puede hacerse a través de hidrodeseoxigenación (HDO), cuya reacción devuelve agua como producto pero utiliza gran cantidad de H_2 ; o puede hacerse a través de decarboxilación (CDO), que usa menos hidrógeno pero devuelve CO_2 como producto.

Los SAF producidos por HEFA pueden mezclarse en una proporción máxima de 50%, ya que no contiene hidrocarburos aromáticos necesarios para dotar de lubricación al combustible [55]. La mayor desventaja de HEFA son sus costes de producción y que sus materias primas son limitadas.

- **Alcohol to Jet SPK (ATJ):** este método toma alcoholes orgánicos como etanol ($CH_3 - CH_2 - OH$) o butanol ($H_3C - (CH_2)_3 - OH$) y los procesa y desoxigena hasta conseguir SAF. Puede partir de cualquier biomasa que contenga celulosa y tiene una tasa máxima de mezcla del 50%. Actualmente es más caro que HEFA y aún necesita desarrollarse para que sea comercialmente viable, pero produce combustible de alta calidad.
- **Catalytic Hydrothermolysis Jet (CHJ):** es un proceso químico que utiliza altas temperaturas, agua a presión y un catalizador para romper los compuestos orgánicos en componentes más simples. Se puede usar cualquier tipo de desecho orgánico o biomasa con contenido en aceite o grasas. No necesita energía externa ni hidrógeno para completar el proceso, pero aún se encuentra en una etapa temprana de desarrollo. Su tasa máxima de mezcla es 50%.

Combustibles sintéticos

Los combustibles de aviación sintéticos, también conocidos como *e-fuels* o *Power-to-Liquid (PtL)*, entran dentro de la categoría SAF pero no parten de biomasa, sino de la combinación de H_2 obtenido de fuentes renovables con CO_2 capturado directamente de la atmósfera mediante el proceso de *Direct Air Capture (DAC)* [56].

Los combustibles sintéticos tienen un alto grado de sostenibilidad por el intercambio entre CO_2 emitido y CO_2 capturado, pero se encuentran aún en desarrollo por la falta de producción de energía renovable (solar, eólica...) a gran escala. Al igual que el resto de SAF, su tasa máxima de mezcla llega al 50% y no es necesario cambiar ninguna configuración o sistema de los motores aeronáuticos.

Uno de los métodos menos contaminantes para conseguir combustibles sintéticos es el *Reverse Water Gas Shift Reaction (RWGS)* [57], en el que el CO_2 capturado se hidrogena para obtener CO como producto mediante la siguiente reacción:



El producto residual en ese caso es el agua, por lo que no se generan emisiones de efecto invernadero durante el proceso.

El CO obtenido de la reacción luego puede transformarse en hidrocarburos mediante los procesos que se aplican al resto de SAF (Figura 4.3).

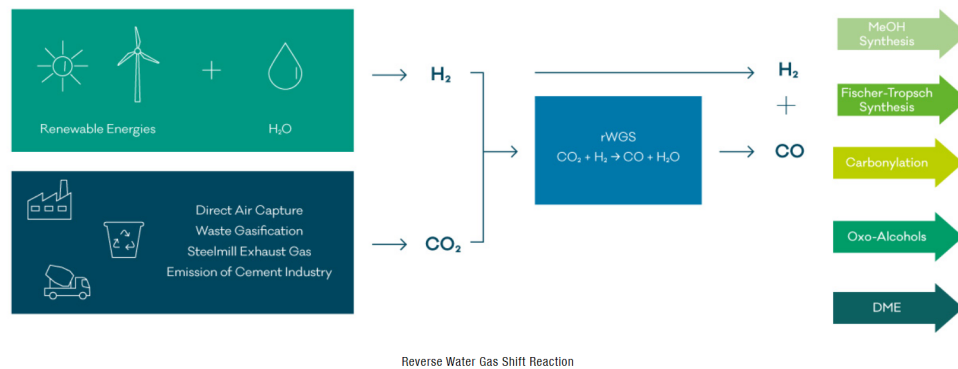


Figura 4.3: Proceso Reverse Water Gas Shift Reaction (RWGS). Fuente: hte [57]

Hidrógeno

La producción y el uso de hidrógeno como combustible es una meta a largo plazo fijada por todos los sectores relacionados con el transporte. El hidrógeno puede ser empleado en estado gaseoso o en estado líquido (LH_2), sin embargo, para almacenar tal volumen de gas en un vehículo aéreo se necesitaría un peso extra que resultaría inviable.

Es por ello que programas como el proyecto de propulsión por hidrógeno *ZEROe* de AIRBUS [58] apuestan por criogenizar el H_2 hasta los $-253^\circ C$ y almacenarlo en estado líquido en tanques preparados para ello.

Actualmente existen dos métodos principales para propulsar una aeronave por hidrógeno:

- **Combustión de H_2 :** utiliza turbinas de gas modificadas con inyectores preparados para introducir hidrógeno y funciona de forma idéntica a la combustión convencional. La eficiencia de este proceso es elevada porque la temperatura de autoinflamación del H_2 es mayor y, por tanto, su relación de compresión [59].
- **Pilas de combustible de H_2 :** mediante la reacción de H_2 con O_2 dentro de una celda electroquímica se puede obtener electricidad que impulse motores aeronáuticos eléctricos o híbridos. Ambos procesos generan H_2O como único residuo, pero la configuración de una aeronave propulsada eléctricamente sería muy distinta a la que conocemos hoy en día [58]. Según IATA [60], las pilas de combustible podrían propulsar aviones en

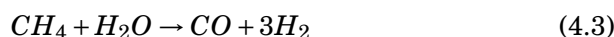
recorridos cortos, mientras que la combustión de H_2 tendría el potencial de ser usada en recorridos más largos y con más carga de pago.

Una de las dificultades de utilizar LH_2 para propulsar grandes aeronaves comerciales es que el hidrógeno ocupa 4 veces más espacio que el queroseno incluso en estado líquido, lo que supondría una reconfiguración total de la estructura de un avión preparado para ello. Por el contrario, el LH_2 contiene 2,5 veces más energía que el queroseno, por lo que se requeriría menores cantidades de combustible para realizar las mismas misiones.

En cuanto a las emisiones del hidrógeno, su uso no emitiría CO_2 ni sulfuros o PM y un 90% menos de NO_x , pero aumentaría por 2,6 veces el volumen de H_2O como producto, que tiene la capacidad de causar un efecto invernadero mucho mayor al del dióxido de carbono. Por el tiempo menor de permanencia en la atmósfera del agua (hasta 1 año) en comparación con la del CO_2 (hasta 100 años) se considera que el cambio a hidrógeno seguiría siendo positivo para el medioambiente [60].

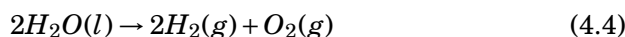
El hidrógeno puede obtenerse de distintas fuentes y por distintos métodos, lo que afecta al grado de sostenibilidad del propio H_2 . Según su fuente, el hidrógeno puede clasificarse de 3 formas [61]:

- **Hidrógeno gris:** se genera a partir de gas natural (CH_4) por el proceso de *Steam Methane Reforming (SMR)*, definido por la siguiente reacción:



A parte de usar un recurso no renovable como el gas natural, la reacción de SMR produce tanto CO como CO_2 , por lo que no se considera un hidrógeno sostenible.

- **Hidrógeno azul:** utiliza también el método SMR, pero los contaminantes basados en carbono son capturados y almacenados bajo el suelo mediante CCS. Este proceso es capaz de capturar un 80-90% del CO_2 por lo que se considera un hidrógeno de bajas emisiones.
- **Hidrógeno verde:** parte de fuentes de energía renovables y utiliza el proceso de electrólisis para obtener H_2 a partir de la descomposición atómica del agua.



Es el hidrógeno más limpio, pero también el menos producido en la actualidad.

4.3. Otras medidas de reducción de impacto ambiental

La reducción del impacto ambiental del sector aeronáutico no tiene por qué necesariamente venir del uso de combustibles alternativos. A continuación se listan una serie de recursos que pueden reducir el volumen de emisiones en menor o mayor medida:

Eficiencia de rutas y factor de ocupación

La manera más rápida de reducir emisiones es volar menos, pero eso es algo que naturalmente no se puede tener en cuenta por motivos económicos desde el punto de vista de aerolíneas y aeropuertos. En su lugar se propone aumentar el factor de ocupación de los aviones (el número de asientos ocupados por pasajeros) al máximo posible para cada vuelo, reduciendo el número de emisiones y llevando al mismo número de clientes a su destino. Una manera de conseguirlo es adaptar el tamaño del avión a la demanda, algo que es difícil de pronosticar. El factor de ocupación está aumentando progresivamente con el paso del tiempo, y algunas aerolíneas *low-cost* ya cuentan con un factor muy superior al 90%.

Por otra parte, adaptar el tipo de avión a la ruta no sólo reduciría emisiones sino costes derivados del consumo de combustible. En capítulos anteriores ya se ha visto como todas las aeronaves tienen un mínimo de consumo para un rango concreto con una carga de pago determinada.

Tecnología aplicada a materiales y geometrías

El consumo de un avión viene altamente ligado a su peso, por lo que apostar por materiales livianos pero resistentes como la fibra de carbono puede afectar al impacto ambiental neto. Además, el reciclaje de materiales de aeronaves en su fase EoL y el uso de estos en nuevas partes del avión disminuye las emisiones generadas durante la producción. El desarrollo de nuevas geometrías de motores, alas, etc. o la inclusión de pequeñas modificaciones a los aviones también puede afectar mucho a la eficiencia total del vehículo. Es importante que los fabricantes dediquen tiempo al desarrollo de nuevas tecnologías.

Uso de distintivo ambiental o “Eco-Label”

Por último, resultaría interesante que los datos de emisiones fueran de conocimiento público para que el cliente pueda tomar decisiones en base a la importancia que le pueda dar al impacto ambiental de su vuelo. El uso de distintivos ambientales podría incentivar a las empresas a buscar nuevas medidas de sostenibilidad.

4.4. Impacto ambiental de la flota futura

A continuación, en esta sección se mostrarán los resultados del análisis del ciclo de vida de la flota comercial en la UE a futuro. Los escenarios planteados son aquellos descritos en la metodología: años 2030, 2040, 2050 con y sin desarrollo significativo en las medidas de sostenibilidad (*Significant Improvements (SI)* y *No Improvements (NI)* respectivamente).

Hipótesis iniciales

El cambio más significativo en términos de impacto ambiental es la introducción de los SAF al mundo aeronáutico, ya que se considera una idea factible y con posibilidades de implantación a corto plazo. Los SAF tienen una composición química muy similar a los combustibles convencionales y, por tanto, generan las mismas emisiones durante su combustión.

Es en la fase de su producción donde se esperan cambios significativos en el número de emisiones, por lo que este ACV se enfoca en el análisis *Well-to-Tank* y se generan las hipótesis a continuación:

- El porcentaje de SAF utilizado en cada año se corresponde con los mínimos impuestos por la regulación *ReFuelEU*.
- Se propone cumplir el porcentaje obligatorio de SAF con un combustible procesado por el método HEFA a partir de aceite de camelina.
- Además, se propone cumplir el porcentaje obligatorio de combustibles sintéticos con un proceso RWGS complementado con el método de FT a partir de DAC + H_2 verde.
- No se contabilizan las emisiones de fabricación de la propia aeronave por ser varios órdenes de magnitud más bajos.
- En el año 2050 se introduce un caso adicional en el que los SAF son sustituidos completamente por propulsión por hidrógeno en estado líquido (LH_2).

Los porcentajes de producción y uso de cada combustible se resumen en la Tabla 4.2:

% DE PRODUCCIÓN DE TIPO DE COMBUSTIBLE POR DÉCADA			
Combustible	Biomasa	Sintético	Jet A/Jet A-1
Proceso GREET 2023	Camelina Oil-based Renewable Jet Fuel	FT Fuel Production with RWGS	Conventional Jet Fuel from Crude Oil
2030	4,8%	1,2%	94,0%
2040	24%	10%	66%
2050	35%	35%	30%

Cuadro 4.2: Porcentajes de producción de tipo de combustible por década

Como observación: anteriormente se han descrito los procesos más habituales de producción de SAF y ninguno de ellos puede superar una tasa de mezcla con combustible convencional de 50:50. Esto significa que, para 2050, los motores aeronáuticos sufrirán modificaciones y deberán ser capaces de soportar una tasa de mezcla de SAF superior al 70:30; la sostenibilidad está condicionada por el desarrollo tecnológico.

Para el cálculo de emisiones se usan estos porcentajes sobre los consumos de combustible por operación [kg/op] obtenidos ya en análisis de la flota actual del Capítulo 3 (Ver Tablas 3.3 y 3.4), y se multiplican por las emisiones GHG-100 unitarias de cada combustible según el software *GREET 2023* para cada escenario, recogidos en la siguiente Tabla 4.3:

EMISIONES UNITARIAS POR KG DE COMBUSTIBLE [kg CO ₂ eq/kg fuel]			
Escenario	Camelina Oil-based Renewable Jet Fuel	FT Fuel Production with RWGS	Conventional Jet Fuel from Crude Oil
2030 NI	2,175	-3,078	0,474
2030 SI	2,156	-3,082	0,455
2040 NI	2,167	-3,080	0,466
2040 SI	2,151	-3,084	0,449
2050 NI	2,159	-3,082	0,458
2050 SI	2,145	-3,085	0,443

Cuadro 4.3: Emisiones unitarias por 1 kg de combustible para cada escenario.

Se puede ver como las emisiones GHG-100 en el SAF sintético son negativas, debido al proceso de captura de CO₂ atmosférico.

Escenario 2030

Las emisiones generadas para cada tipo de combustible por modelo de aeronave y operación se muestran en las tablas 4.4 y 4.5, calculados para el escenario positivo (SI) y el escenario neutro (NI) de este año.

Modelo	EMISIONES GHG-100 DERIVADAS DE PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE POR OPERACIÓN							
	AÑO 2030 (AIRBUS) [kg CO ₂ eq/op]							
	Aceite de camelina 2030 NI	Aceite de camelina 2030 SI	FT fuel RWGS 2030 NI	FT fuel RWGS 2030 SI	Jet Fuel 2030 NI	Jet Fuel 2030 SI	TOTAL GHG-100 2030 NI	TOTAL GHG-100 2030 SI
A220-100	418,0	414,4	-147,9	-148,1	1783,1	1711,5	2053,2	1977,8
A220-300	464,2	460,1	-164,2	-164,4	1979,9	1900,5	2279,9	2196,1
A318	259,2	257,0	-91,7	-91,8	1105,7	1061,4	1273,3	1226,5
A319-100	333,9	331,0	-118,1	-118,3	1424,1	1367,0	1639,9	1579,7
A320-200	534,7	530,1	-189,2	-189,4	2281,0	2189,4	2626,5	2530,1
A320 Neo	469,6	465,5	-166,1	-166,4	2003,1	1922,7	2306,5	2221,8
A321-100	542,9	538,1	-192,1	-192,3	2315,7	2222,8	2666,5	2568,6
A321-200	666,4	660,6	-235,8	-236,1	2842,5	2728,4	3273,1	3152,9
A321 Neo	590,4	585,2	-208,9	-209,1	2518,3	2417,3	2899,8	2793,3
A330-200	2297,6	2277,6	-812,9	-813,9	9800,7	9407,4	11285,5	10871,1
A330-300	1967,3	1950,1	-696,0	-696,9	8391,7	8055,0	9663,0	9308,2
A330-900	2461,3	2439,8	-870,8	-871,9	10499,0	10077,7	12089,5	11645,6
A340-300	6185,7	6131,7	-2188,5	-2191,3	26385,5	25326,7	30382,7	29267,1
A340-600	8605,2	8530,0	-3044,4	-3048,4	36705,9	35233,0	42266,6	40714,6
A350-900	4951,5	4908,2	-1751,8	-1754,1	21120,9	20273,4	24320,6	23427,5
A350-1000	5900,3	5848,7	-2087,5	-2090,2	25168,0	24158,1	28980,8	27916,6
A380	12387,1	12278,9	-4382,5	-4388,2	52837,8	50717,6	60842,4	58608,3

Cuadro 4.4: Emisiones por producción de combustible.
Escenario 2030 (AIRBUS).

Por otro lado, los gráficos de barras apiladas de las figuras 4.4 y 4.5 permiten visualizar la contribución individual de la fabricación de cada combustible al cómputo global de emisiones.

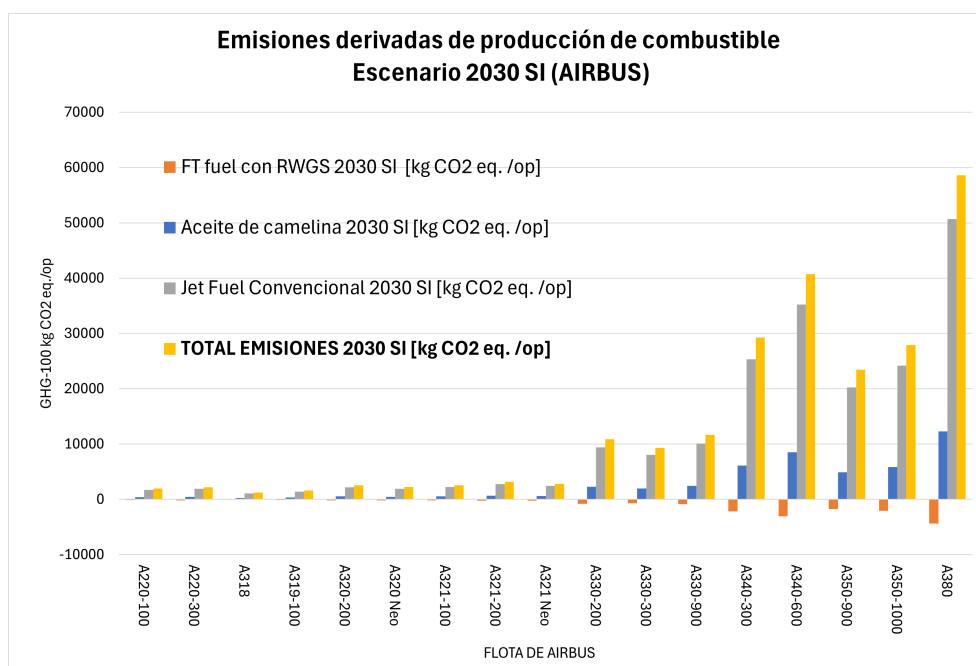


Figura 4.4: Contribución de emisiones GHG-100 por producción de combustible. Escenario 2030 SI (AIRBUS).

**EMISIONES GHG-100 DERIVADAS DE PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE POR OPERACIÓN
AÑO 2030 (BOEING) [kg CO₂eq./op]**

Modelo	Aceite de camelina 2030 NI	Aceite de camelina 2030 SI	FT fuel RWGS 2030 NI	FT fuel RWGS 2030 SI	Jet Fuel 2030 NI	Jet Fuel 2030 SI	TOTAL GHG-100 2030 NI	TOTAL GHG-100 2030 SI
B737-700	274,2	271,8	-97,0	-97,1	1169,4	1122,5	1346,6	1297,1
B737-800	386,8	383,4	-136,8	-137,0	1649,9	1583,7	1899,9	1830,1
B737-900	473,7	469,5	-167,6	-167,8	2020,4	1939,4	2326,5	2241,1
B737-MAX 8	329,8	326,9	-116,7	-116,8	1406,8	1350,3	1619,9	1560,4
B737-MAX 9	375,9	372,7	-133,0	-133,2	1603,6	1539,3	1846,6	1778,7
B747-400	9004,5	8925,8	-3185,7	-3189,9	38409,3	36868,0	44228,1	42604,0
B747-800	10312,1	10222,0	-3648,4	-3653,1	43987,0	42221,9	50650,7	48790,9
B757-300	879,5	871,8	-311,1	-311,6	3751,4	3600,9	4319,7	4161,1
B767-300	1815,3	1799,4	-642,2	-643,1	7743,3	7432,6	8916,4	8589,0
B777-200	4047,2	4011,8	-1431,9	-1433,7	17263,5	16570,7	19878,8	19148,8
B777-300	3735,8	3703,2	-1321,7	-1323,4	15935,5	15296,1	18349,6	17675,9
B787-8	2169,0	2150,1	-767,4	-768,4	9252,1	8880,8	10653,7	10262,5
B787-9	2461,3	2439,8	-870,8	-871,9	10499,0	10077,7	12089,5	11645,6
B787-10	2473,0	2451,4	-874,9	-876,1	10548,9	10125,6	12146,9	11700,9

Cuadro 4.5: Emisiones por producción de combustible. Escenario 2030 (BOEING).

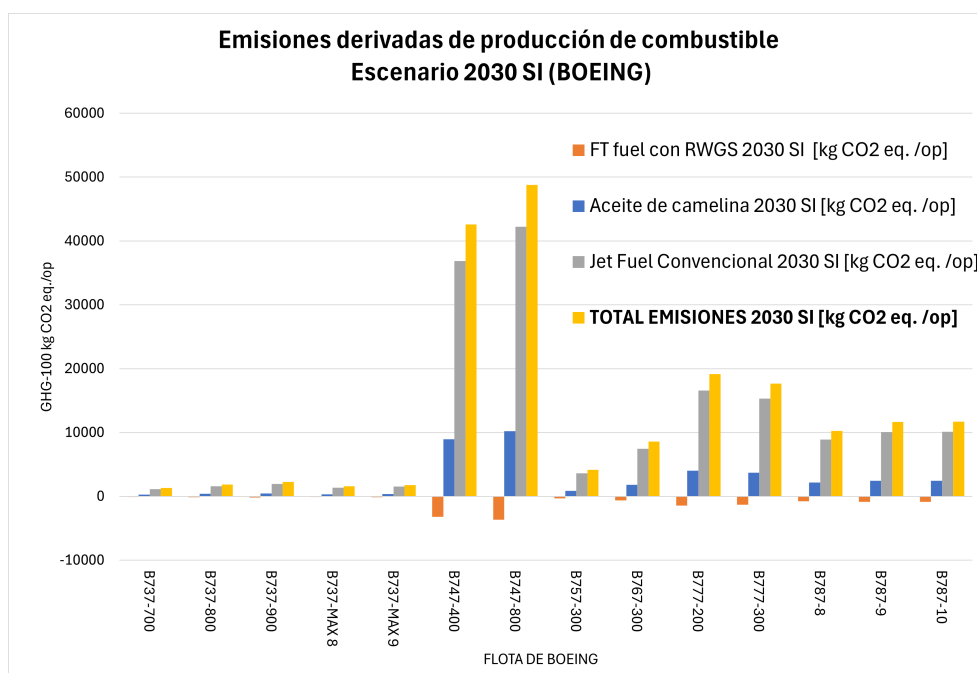


Figura 4.5: Contribución de emisiones GHG-100 por producción de combustible. Escenario 2030 SI (BOEING).

Se deduce a partir del gráfico que el combustible convencional genera el mayor número de emisiones, lo cual es razonable por ser un 94% del total del jet fuel empleado. Sin embargo, se observa también cómo el SAF de biomasa (aceite de camelina) que sólo forma un 4,8% del total ya genera unas emisiones de producción nada despreciables: el motivo es que la producción de este SAF genera 4,6 veces más GHG-100 que el combustible fósil.

Escenario 2040

Las emisiones generadas para cada tipo de combustible por modelo de aeronave y operación se muestran en las tablas 4.6 y 4.7, calculados para el escenario positivo (SI) y el escenario neutro (NI) de este año.

Modelo	EMISIONES GHG-100 DERIVADAS DE PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE POR OPERACIÓN							
	AÑO 2040 (AIRBUS) [kg CO ₂ eq/op]							
	Aceite de camelina 2040 NI	Aceite de camelina 2040 SI	FT fuel RWGS 2040 NI	FT fuel RWGS 2040 SI	Jet Fuel 2040 NI	Jet Fuel 2040 SI	TOTAL GHG-100 2040 NI	TOTAL GHG-100 2040 SI
A220-100	2082,4	2067,0	-1233,2	-1234,8	1230,5	1186,6	2079,7	2018,8
A220-300	2312,3	2295,2	-1369,4	-1371,1	1366,4	1317,6	2309,3	2241,7
A318	1291,4	1281,8	-764,8	-765,8	763,1	735,9	1289,7	1251,9
A319-100	1663,2	1650,9	-985,0	-986,3	982,8	947,8	1661,1	1612,4
A320-200	2663,8	2644,2	-1577,6	-1579,6	1574,1	1518,0	2660,4	2582,5
A320 Neo	2339,3	2322,0	-1385,4	-1387,2	1382,4	1333,0	2336,3	2267,9
A321-100	2704,4	2684,4	-1601,6	-1603,7	1598,1	1541,1	2700,9	2621,8
A321-200	3319,7	3295,2	-1966,0	-1968,5	1961,7	1891,7	3315,4	3218,3
A321 Neo	2941,1	2919,3	-1741,7	-1744,0	1737,9	1675,9	2937,3	2851,2
A330-200	11445,9	11361,4	-6778,5	-6787,3	6763,7	6522,3	11431,2	11096,4
A330-300	9800,4	9728,0	-5804,0	-5811,5	5791,3	5584,6	9787,7	9501,1
A330-900	12261,4	12170,9	-7261,4	-7270,8	7245,6	6987,0	12245,6	11887,0
A340-300	30814,7	30587,2	-18249,0	-18272,7	18209,2	17559,3	30775,0	29873,8
A340-600	42867,6	42551,1	-25386,9	-25419,9	25331,6	24427,5	42812,3	41558,7
A350-900	24666,4	24484,2	-14607,8	-14626,8	14576,0	14055,8	24634,5	23913,2
A350-1000	29392,8	29175,8	-17406,9	-17429,5	17369,0	16749,1	29354,9	28495,4
A380	61707,5	61251,9	-36544,2	-36591,7	36464,6	35163,1	61627,9	59823,3

Cuadro 4.6: Emisiones por producción de combustible.
Escenario 2040 (AIRBUS).

Por otro lado, los gráficos de barras apiladas de las figuras 4.6 y 4.7 permiten visualizar la contribución individual de la fabricación de cada combustible al cómputo global de emisiones.

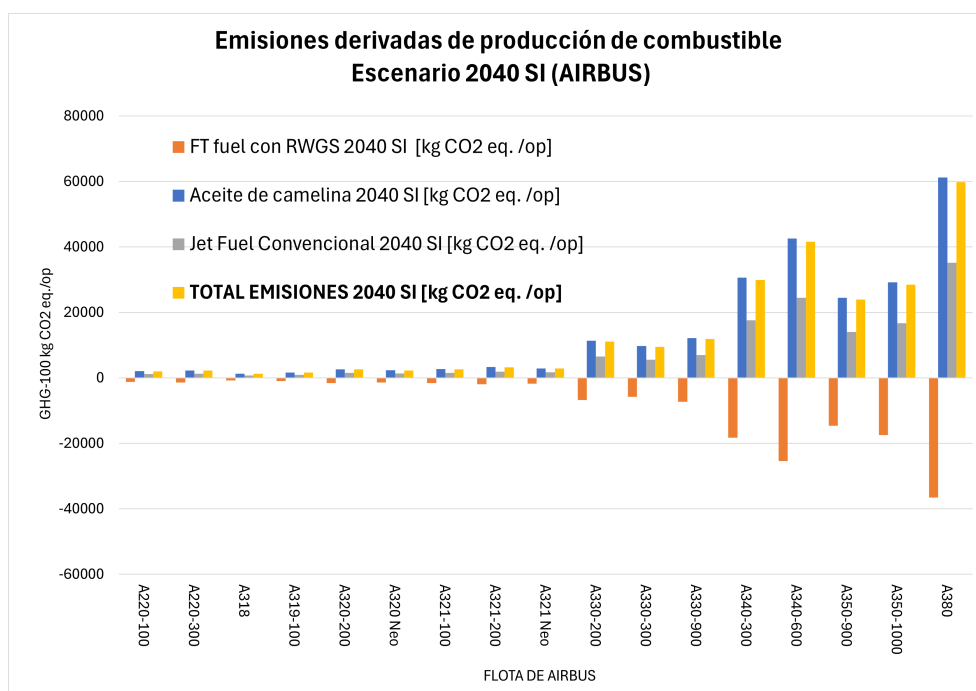


Figura 4.6: Contribución de emisiones GHG-100 por producción de combustible. Escenario 2040 SI (AIRBUS).

**EMISIONES GHG-100 DERIVADAS DE PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE POR OPERACIÓN
AÑO 2040 (BOEING) [kg CO₂eq./op]**

Modelo	Aceite de camelina 2040 NI	Aceite de camelina 2040 SI	FT fuel RWGS 2040 NI	FT fuel RWGS 2040 SI	Jet Fuel 2040 NI	Jet Fuel 2040 SI	TOTAL GHG-100 2040 NI	TOTAL GHG-100 2040 SI
B737-700	1365,7	1355,6	-808,8	-809,9	807,0	778,2	1364,0	1324,0
B737-800	1926,9	1912,7	-1141,1	-1142,6	1138,7	1098,0	1924,4	1868,1
B737-900	2359,6	2342,2	-1397,4	-1399,2	1394,4	1344,6	2356,6	2287,6
B737-MAX 8	1642,9	1630,8	-973,0	-974,2	970,9	936,2	1640,8	1592,8
B737-MAX 9	1872,8	1859,0	-1109,1	-1110,5	1106,7	1067,2	1870,4	1815,6
B747-400	44856,9	44525,7	-26565,0	-26599,5	26507,1	25561,0	44799,0	43487,2
B747-800	51370,9	50991,6	-30422,7	-30462,2	30356,4	29272,9	51304,6	49802,3
B757-300	4381,2	4348,8	-2594,6	-2598,0	2588,9	2496,5	4375,5	4247,4
B767-300	9043,2	8976,4	-5355,5	-5362,5	5343,8	5153,1	9031,5	8767,0
B777-200	20161,4	20012,6	-11939,9	-11955,4	11913,9	11488,7	20135,4	19545,8
B777-300	18610,5	18473,1	-11021,5	-11035,8	10997,5	10604,9	18586,5	18042,3
B787-8	10805,2	10725,4	-6399,0	-6407,3	6385,1	6157,2	10791,2	10475,3
B787-9	12261,4	12170,9	-7261,4	-7270,8	7245,6	6987,0	12245,6	11887,0
B787-10	12319,7	12228,7	-7295,9	-7305,4	7280,0	7020,2	12303,8	11943,5

Cuadro 4.7: Emisiones por producción de combustible. Escenario 2040 (BOEING).

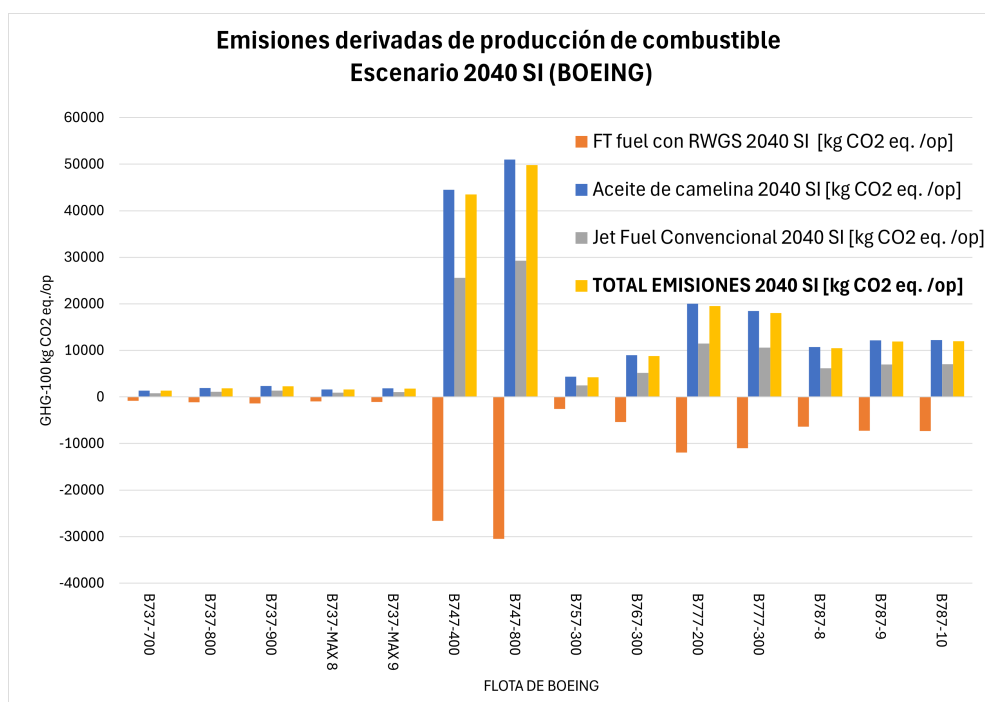


Figura 4.7: Contribución de emisiones GHG-100 por producción de combustible. Escenario 2040 SI (BOEING).

De los gráficos se deduce que las emisiones de producción de SAF a partir de biomasa serán las mayoritarias para 2040 y los combustibles fósiles pasarán a un segundo plano, pero los combustibles sintéticos serán un punto clave para reducir las emisiones totales.

Escenario 2050

Las emisiones generadas para cada tipo de combustible por modelo de aeronave y operación se muestran en las tablas 4.8 y 4.9, calculados para el escenario positivo (SI) y el escenario neutro (NI) de este año.

Modelo	EMISIONES GHG-100 DERIVADAS DE PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE POR OPERACIÓN							
	AÑO 2050 (AIRBUS) [kg CO ₂ eq/op]							
	Aceite de camelina 2050 NI	Aceite de camelina 2050 SI	FT fuel RWGS 2050 NI	FT fuel RWGS 2050 SI	Jet Fuel 2050 NI	Jet Fuel 2050 SI	TOTAL GHG-100 2050 NI	TOTAL GHG-100 2050 SI
A220-100	3025,6	3006,0	-4319,1	-4323,3	549,7	532,6	-743,8	-784,8
A220-300	3359,6	3337,8	-4795,9	-4800,6	610,3	591,3	-825,9	-871,4
A318	1876,3	1864,1	-2678,4	-2681,0	340,9	330,3	-461,3	-486,7
A319-100	2416,6	2400,9	-3449,7	-3453,0	439,0	425,3	-594,1	-626,8
A320-200	3870,4	3845,3	-5525,1	-5530,5	703,1	681,3	-951,5	-1003,9
A320 Neo	3398,9	3376,9	-4852,0	-4856,7	617,5	598,3	-835,6	-881,6
A321-100	3929,4	3903,9	-5609,2	-5614,7	713,9	691,6	-966,0	-1019,2
A321-200	4823,3	4792,0	-6885,3	-6892,0	876,3	849,0	-1185,8	-1251,0
A321 Neo	4273,2	4245,5	-6100,0	-6106,0	776,3	752,1	-1050,5	-1108,4
A330-200	16630,3	16522,5	-23740,0	-23763,1	3021,3	2927,2	-4088,4	-4313,5
A330-300	14239,5	14147,1	-20327,0	-20346,8	2586,9	2506,3	-3500,6	-3693,3
A330-900	17815,2	17699,7	-25431,4	-25456,2	3236,5	3135,7	-4379,7	-4620,8
A340-300	44772,3	44481,9	-63913,0	-63975,2	8133,8	7880,5	-11006,9	-11612,7
A340-600	62284,5	61880,6	-88911,8	-88998,4	11315,3	10962,9	-15312,1	-16154,9
A350-900	35839,0	35606,6	-51160,6	-51210,4	6510,9	6308,2	-8810,7	-9295,7
A350-1000	42706,3	42429,4	-60963,8	-61023,2	7758,5	7516,9	-10499,0	-11076,9
A380	89657,9	89076,5	-127987,8	-128112,3	16288,3	15781,0	-22041,6	-23254,8

Cuadro 4.8: Emisiones por producción de combustible.
Escenario 2050 (AIRBUS).

Por otro lado, los gráficos de barras apiladas de las figuras 4.8 y 4.9 permiten visualizar la contribución individual de la fabricación de cada combustible al cómputo global de emisiones.

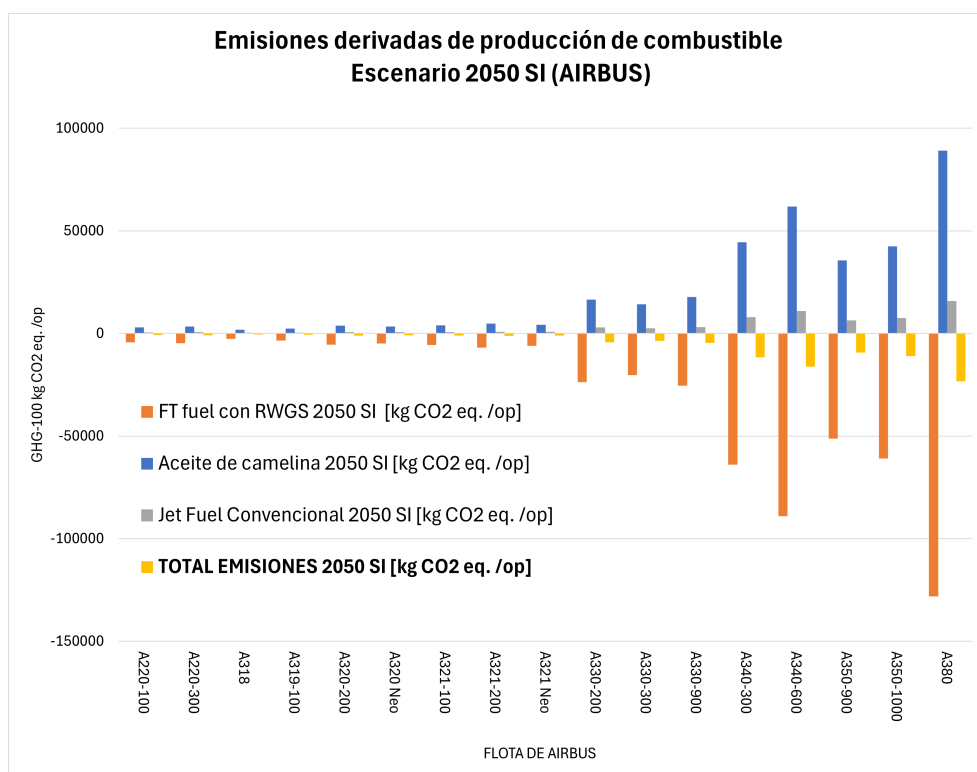


Figura 4.8: Contribución de emisiones GHG-100 por producción de combustible. Escenario 2050 SI (AIRBUS).

**EMISIONES GHG-100 DERIVADAS DE PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE POR OPERACIÓN
AÑO 2050 (BOEING) [kg CO₂eq./op]**

Modelo	Aceite de camelina 2050 NI	Aceite de camelina 2050 SI	FT fuel RWGS 2050 NI	FT fuel RWGS 2050 SI	Jet Fuel 2050 NI	Jet Fuel 2050 SI	TOTAL GHG-100 2050 NI	TOTAL GHG-100 2050 SI
B737-700	1984,3	1971,5	-2832,7	-2835,4	360,5	349,3	-487,8	-514,7
B737-800	2799,7	2781,5	-3996,6	-4000,5	508,6	492,8	-688,3	-726,2
B737-900	3428,4	3406,2	-4894,1	-4898,8	622,8	603,4	-842,8	-889,2
B737-MAX 8	2387,1	2371,6	-3407,6	-3410,9	433,7	420,2	-586,8	-619,1
B737-MAX 9	2721,1	2703,5	-3884,4	-3888,2	494,3	479,0	-669,0	-705,8
B747-400	65174,8	64752,2	-93037,9	-93128,4	11840,4	11471,7	-16022,7	-16904,6
B747-800	74639,3	74155,3	-106548,6	-106652,3	13559,8	13137,6	-18349,4	-19359,4
B757-300	6365,6	6324,3	-9087,0	-9095,8	1156,4	1120,4	-1564,9	-1651,1
B767-300	13139,2	13054,0	-18756,4	-18774,7	2387,0	2312,7	-3230,2	-3408,0
B777-200	29293,5	29103,6	-41816,9	-41857,6	5321,8	5156,1	-7201,6	-7597,9
B777-300	27040,2	26864,8	-38600,2	-38637,8	4912,4	4759,5	-6647,6	-7013,5
B787-8	15699,4	15597,6	-22411,1	-22432,9	2852,1	2763,3	-3859,6	-4072,0
B787-9	17815,2	17699,7	-25431,4	-25456,2	3236,5	3135,7	-4379,7	-4620,8
B787-10	17899,8	17783,8	-25552,2	-25577,1	3251,9	3150,6	-4400,5	-4642,7

Cuadro 4.9: Emisiones por producción de combustible. Escenario 2050 (BOEING).

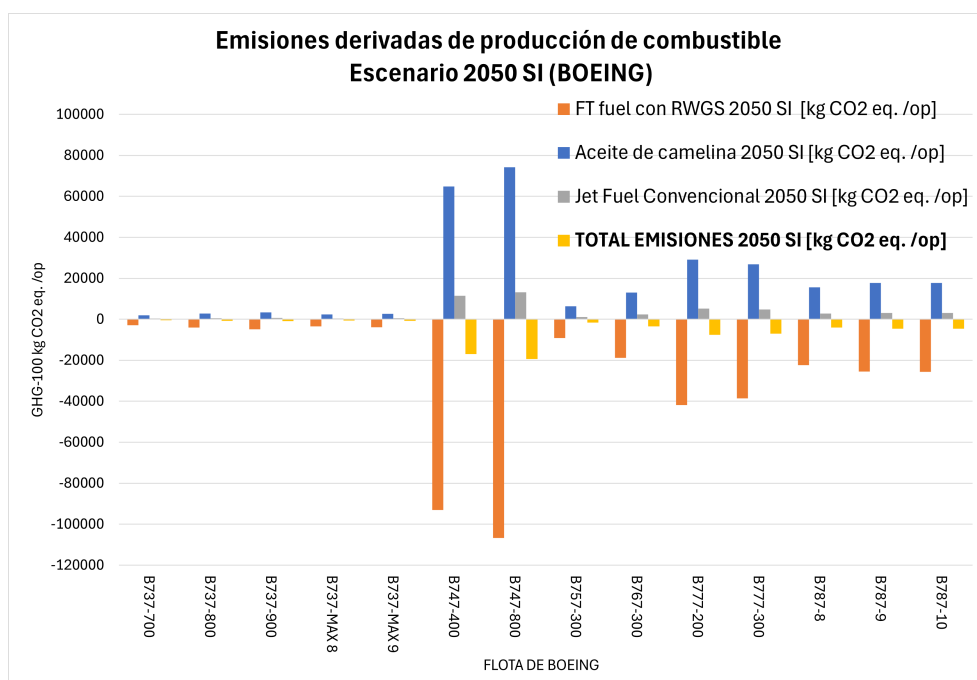


Figura 4.9: Contribución de emisiones GHG-100 por producción de combustible. Escenario 2050 SI (BOEING).

Observando los gráficos vemos cómo los combustibles sintéticos han conseguido compensar las emisiones de producción del resto de combustibles sólo con un 35% de uso sobre el total.

Escenario 2050 SI con propulsión por hidrógeno

Por último, se plantea un escenario adicional en el que el hidrógeno líquido como propulsor de aeronaves comerciales es una opción viable. En este caso, se sustituye el porcentaje mínimo de SAFs (70%) por el H_2 , quedando sólo este combustible junto con el jet fuel convencional. Las propiedades del hidrógeno frente al combustible convencional se recogen en la siguiente tabla:

	Jet A-1	LH ₂
LHV [MJ/kg]	42,8	120
Densidad [kg/m ³]	804	70,8
Energía volumétrica [MJ/m ³]	34411	8496

Cuadro 4.10: Propiedades del hidrógeno y el Jet A-1.

Y las emisiones unitarias consideradas están recogidas en otra tabla a continuación, junto con las proporciones de combustible que anteriormente se asignaron a los SAF:

	Central Plants: L.H ₂ production from PEM Electrolysis - Solar (or Wind)	Conventional Jet Fuel from Crude Oil
Proporciones 2050	70%	30%
GHG-100 [kg/kg]	0,993	0,44335

Cuadro 4.11: Emisiones por kg de combustible. Escenario 2050 con H_2 .

Para calcular el peso de H_2 correspondiente al peso de queroseno necesario para una misión se usa la siguiente equivalencia:

$$M_{LH_2}[kg] = M_{jetfuel}[kg] \cdot \frac{LHV_{jetfuel}[MJ/kg]}{LHV_{LH_2}[MJ/kg]} \quad (4.5)$$

Haciendo esta ecuación se obtienen que hacen falta 0,36 kg de H_2 por cada 1 kg de combustible. El H_2 tiene un poder calorífico mucho mayor al jet fuel y, por tanto, hacen falta menos kilogramos de hidrógeno para propulsar la misma aeronave.

Por otra parte, la densidad del hidrógeno es mucho menor y es necesario un mayor volumen del tanque de combustible, comprobándose a través de los siguientes cálculos que ocupa 4 veces o más el volumen de queroseno:

$$M_{jetfuel}[kg] \cdot \rho_{jetfuel}[kg/m^3] = 1[kg]/804[kg/m^3] = 0,001243781[m^3] \quad (4.6)$$

$$M_{LH_2}[kg] \cdot \rho_{LH_2}[kg/m^3] = 0,36[kg]/70,8[kg/m^3] = 0,0050847[m^3] \quad (4.7)$$

Si se intentase meter la mayor cantidad posible de LH_2 en el volumen de tanque de queroseno, cabrían sólomente 0,088 kg. Multiplicando esta masa de combustible por su poder calorífico se obtiene que ese tanque de H_2 sólo aportaría 10,57 MJ, 1/4 del aporte de 1 kg de queroseno. Para un mismo volumen de tanque en las operaciones de apartados anteriores, el hidrógeno sólo podría suplir un 25% de la energía necesaria para alcanzar el destino, por lo que se comprueba que sería obligatorio modificar la distribución de la aeronave si se quiere que sea propulsada de este modo.

El escenario de esta sección es meramente hipotético por las dificultades de alojar grandes volúmenes de hidrógeno líquido: primero de todo, los tanques deben tener propiedades aislantes para conservar el LH_2 en estado criogénico y deben estar preparados para soportar grandes cambios de presión, lo que repercute en un aumento del espesor del tanque y en la adición de sistemas adicionales para mantener las condiciones necesarias. Esto combinado con la necesidad de alojar los grandes tanques dentro del fuselaje en vez de las alas, descompensa el balance de masas en el avión y elimina espacio dedicado a pasajeros o cargo.

Partiendo de los diseños actuales de aeronaves, introducir tanques de hidrógeno supondría una reducción del número de asientos y menor autonomía, además de suponer una enorme inversión inicial para equipar a los aeropuertos de puntos de suministro. Este escenario ha sido planteado para observar la efectividad del hidrógeno como propulsor sin ahondar en requisitos técnicos.

Las emisiones generadas para cada tipo de combustible por modelo de aeronave y operación se muestran en las tablas 4.12 y 4.13, calculados para el escenario positivo (SI). A estos cálculos les acompaña el volumen del tanque necesario para cumplir estos porcentajes: se puede comprobar como los volúmenes del tanque en las aeronaves de fuselaje estrecho son valores razonables y realistas, mientras que en aviones más grandes se necesita un volumen demasiado grande como para poder introducir un tanque de criogenización de ese tamaño; de ese motivo viene la limitación de rango de la propulsión por H_2 .

Finalmente, en las figuras 4.10 y 4.11 se muestran las emisiones por producción de combustible y tipo en este escenario.

**EMISIONES GHG-100 DERIVADAS DE PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE
POR OPERACIÓN AÑO 2050 con hidrógeno líquido (AIRBUS) [kg CO₂eq./op]**

Modelo	Hidrógeno líquido 2050 SI	Jet Fuel Convencional 2050 SI	TOTAL GHG-100 2050 SI	Volumen mínimo tanque H ₂ [m ³]
A220-100	1001,9	532,6	1534,5	14,3
A220-300	1112,5	591,3	1703,9	15,8
A318	621,3	330,3	951,6	8,8
A319-100	800,3	425,3	1225,6	11,4
A320-200	1281,7	681,3	1963,0	18,2
A320 Neo	1125,6	598,3	1723,8	16,0
A321-100	1301,2	691,6	1992,9	18,5
A321-200	1597,3	849,0	2446,2	22,7
A321 Neo	1415,1	752,1	2167,2	20,1
A330-200	5507,2	2927,2	8434,4	78,3
A330-300	4715,4	2506,3	7221,8	67,1
A330-900	5899,6	3135,7	9035,3	83,9
A340-300	14826,5	7880,5	22707,0	210,9
A340-600	20625,7	10962,9	31588,6	293,4
A350-900	11868,2	6308,2	18176,4	168,8
A350-1000	14142,3	7516,9	21659,2	201,2
A380	29690,5	15781,0	45471,5	422,3

Cuadro 4.12: Emisiones por producción de combustible.
Escenario 2050 con hidrógeno (AIRBUS).

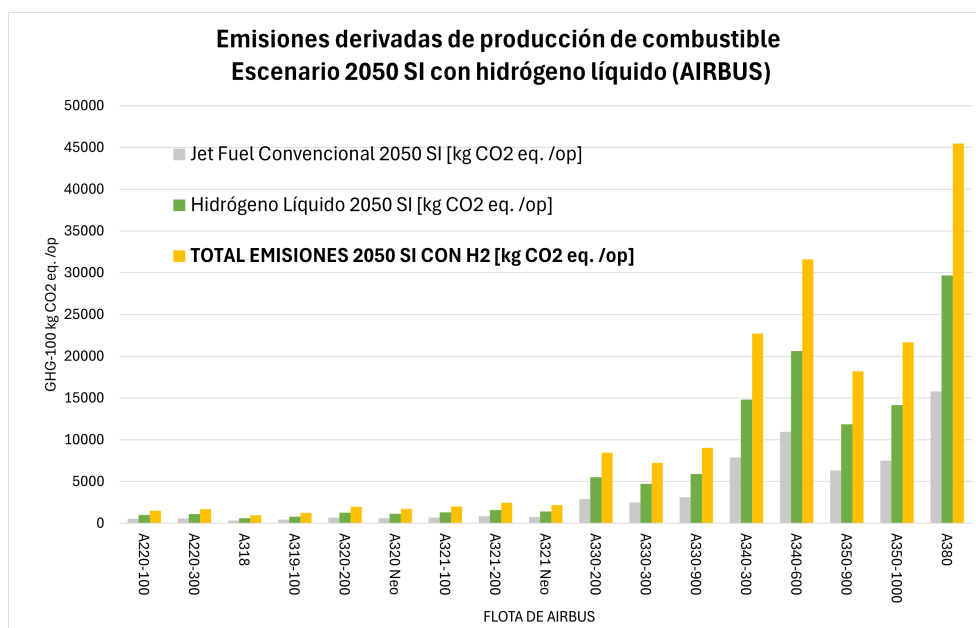


Figura 4.10: Contribución de emisiones GHG-100 por producción de combustible. Escenario 2050 SI con H₂ (AIRBUS).

**EMISIONES GHG-100 DERIVADAS DE PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE
POR OPERACIÓN AÑO 2050 con hidrógeno líquido (BOEING) [kg CO₂eq./op]**

Modelo	Hidrógeno líquido 2050 SI	Jet Fuel Convencional 2050 SI	TOTAL GHG-100 2050 SI	Volumen mínimo tanque H ₂ [m ³]
B737-700	657,1	349,3	1006,4	9,3
B737-800	927,1	492,8	1419,9	13,2
B737-900	1135,3	603,4	1738,8	16,1
B737-MAX 8	790,5	420,2	1210,7	11,2
B737-MAX 9	901,1	479,0	1380,1	12,8
B747-400	21582,9	11471,7	33054,5	307,0
B747-800	24717,1	13137,6	37854,6	351,6
B757-300	2108,0	1120,4	3228,4	30,0
B767-300	4351,1	2312,7	6663,8	61,9
B777-200	9700,6	5156,1	14856,7	138,0
B777-300	8954,4	4759,5	13713,9	127,4
B787-8	5198,9	2763,3	7962,2	73,9
B787-9	5899,6	3135,7	9035,3	83,9
B787-10	5927,6	3150,6	9078,2	84,3

Cuadro 4.13: Emisiones por producción de combustible.
Escenario 2050 con hidrógeno (BOEING).

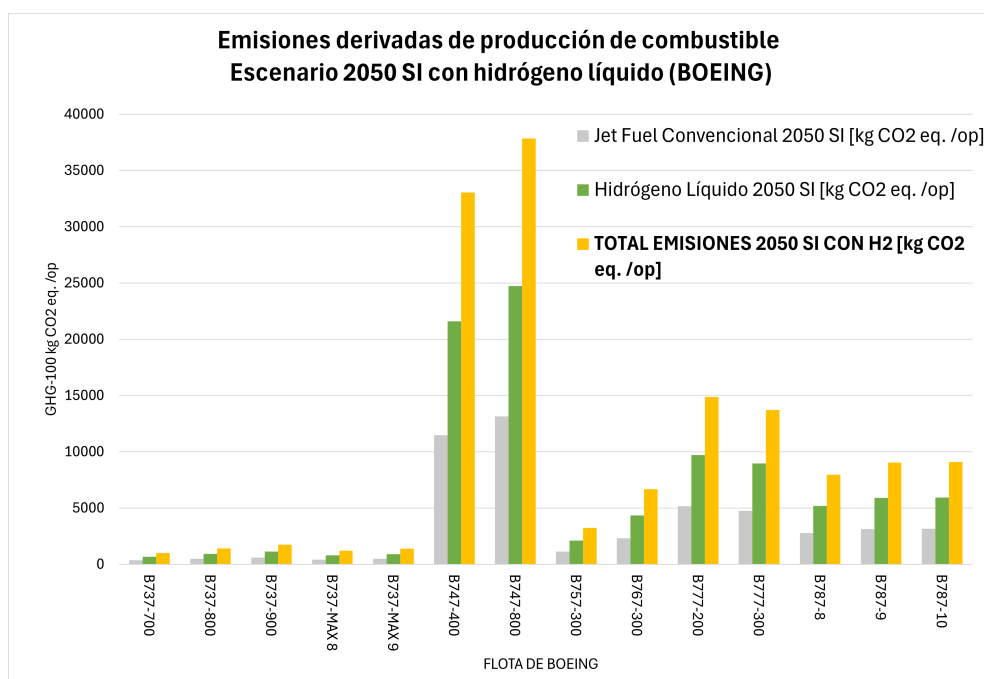


Figura 4.11: Contribución de emisiones GHG-100 por producción de combustible. Escenario 2050 SI con H₂ (BOEING).

El misterio de los SAF

Ya vistos todos los escenarios de producción de SAF, si se pone atención a las emisiones del aceite de camelina (SAF de biomasa) la primera pregunta que surge es: *¿Cómo son los SAF sostenibles si emiten más gases de efecto invernadero al fabricarse que los combustibles convencionales?*

Cabe recordar que los SAF emiten exactamente el mismo número de contaminantes que el queroseno durante su combustión. Con esta afirmación y los cálculos en cada escenario resulta imposible afirmar que los SAF reduzcan el impacto ambiental, a pesar de que muchos organismos oficiales afirman que tienen el potencial de hacerlo en un 80%.

La razón es simple: se considera que los SAF procedentes de biomasa están obteniendo CO_2 de las plantas, que en su momento captaron CO_2 atmosférico. Al contrario que en el refinamiento de crudo, ese CO_2 ya existía previamente y ha sido reciclado. Las emisiones creadas durante la combustión de este tipo de SAFs no se van a contar por este mismo razonamiento [62] [63].

De forma resumida, los SAF de biomasa son sostenibles porque se considera que todas sus emisiones de CO_2 durante la fase de operación se pueden considerar nulas al provenir de plantas que absorben carbono. Esta hipótesis no tiene en cuenta ni la capacidad de absorción de un determinado cultivo de biomasa para combustible, ni la cantidad de materia prima necesaria para que se cumpla este balance. La única suposición es que el volumen de biomasa es suficiente para revertir las emisiones de combustión.

Para ilustrar la diferencia, se calcula la diferencia de emisiones totales por operación en el escenario 2050, restando y manteniendo el criterio de los SAF arriba mencionado.

Como muestra la Figura 4.12, la diferencia entre contabilizar o no las emisiones de operación de los SAF basados en biomasa modifica las emisiones totales en un 37%.

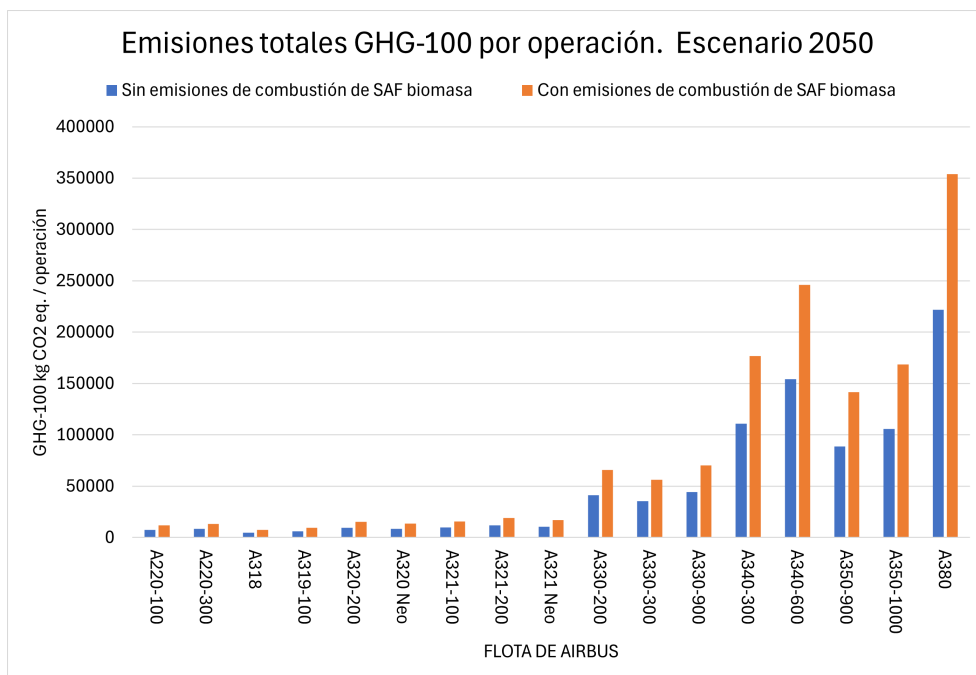


Figura 4.12: Emisiones totales en 2050 con y sin el criterio de contabilizar emisiones SAF.

A pesar de que resulta un poco drástico eliminar por completo las emisiones de combustión, es lógico que se reduzcan en parte las emisiones de CO_2 durante la fotosíntesis, especialmente si la biomasa parte de un cultivo plantado intencionadamente. Lo correcto sería incluir las emisiones de combustión y restar del cómputo total el dióxido de carbono absorbido, pero como aún no se cuenta con este tipo de datos, se opta en las comparaciones de la sección siguiente por seguir el criterio impuesto por los organismos oficiales y no se contarán las emisiones del SAF biomásico.

Comparativa entre flota actual y futura

Para finalizar este capítulo, se compara en la Figura 4.13 las emisiones GHG-100 totales para un Airbus A320-200 en todos los escenarios con SI. El objetivo de esta comparación es comprobar si las medidas de sostenibilidad correspondientes al uso de combustibles alternativos tienen suficiente calado en el impacto ambiental.

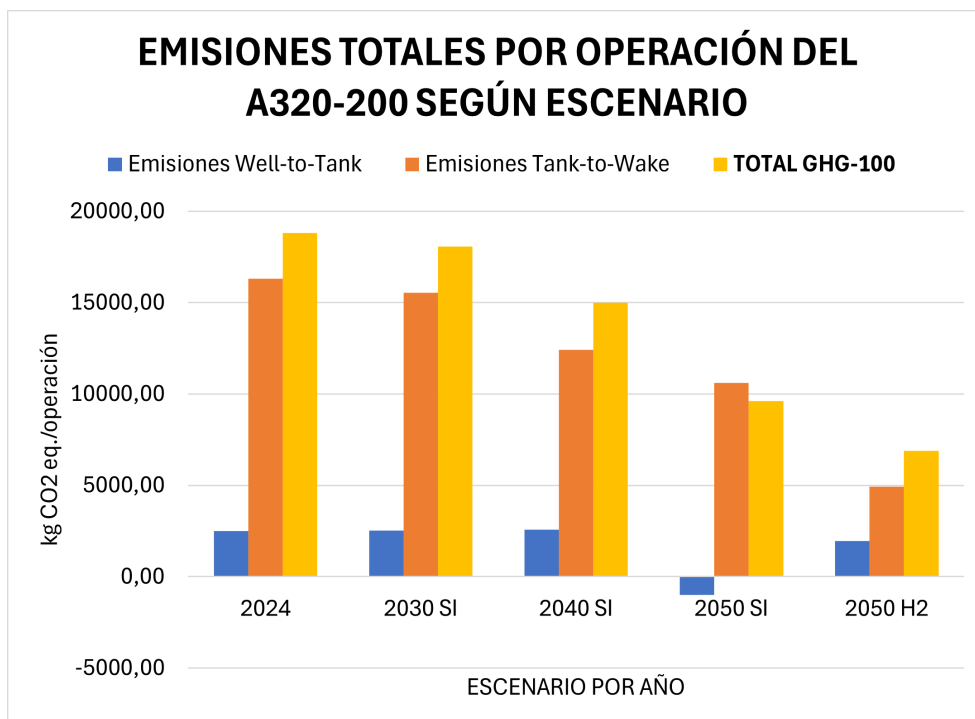


Figura 4.13: Emisiones totales de un A320-200 por operación para cada escenario.

Tras observar el gráfico se puede concluir que, en efecto, el uso de combustibles SAF es efectivo a la hora de reducir emisiones: el combustible sintético con captura de dióxido de carbono atmosférico ayuda a mitigar el CO_2 emitido durante la producción, especialmente en 2050, donde las emisiones Well-to-Tank son negativas.

En el escenario con propulsión por hidrógeno, las emisiones de producción aumentan pero las de combustión se anulan completamente en ese porcentaje del 70% destinado a uso de H_2 . Se demuestra que el hidrógeno líquido es viable como combustible sostenible, aunque suponga cambios e inversiones significativas.

En la Tabla 4.14 se muestra el porcentaje de variación de emisiones GHG-100 entre el estado actual y cada escenario futuro presentado. Se puede ver cómo las emisiones de producción de combustible se mantienen invariantes (e incluso aumentan) en 2030 y en 2040, y luego experimentan un descenso muy significativo en 2050. Con el escenario de hidrógeno se reducen también, pero no en la magnitud en la que lo hace en 2050 gracias a los SAF sintéticos.

% DE VARIACIÓN RESPECTO DE 2024	Emisiones Well-to-Tank	Emisiones Tank-to-Wake	TOTAL GHG-100
2030 SI	1%	-5%	-4%
2040 SI	3%	-24%	-20%
2050 SI	-140%	-35%	-49%
2050 H2	-22%	-70%	-63%

Figura 4.14: Porcentajes de variación de emisiones respecto al estado actual.

Las emisiones de operación/combustión experimentan una reducción gradual por década, en los mismos porcentajes que se han propuesto de uso de SAF basado en aceite de camelina por el criterio expuesto en la sección anterior. De la misma manera, en el escenario con hidrógeno se descuentan esas emisiones de operación. La variación del total de emisiones es una combinación de los otros dos porcentajes, también pronosticando un cambio gradual con el avance de los años.

Cabe recordar que las cantidades por tipo de combustible asumidas en cada escenario son los porcentajes mínimos de SAF establecidos por la nueva regulación europea, y por ello los resultados de emisiones GHG-100 obtenidos se corresponden con el caso más “pesimista”. De la tabla anterior se deduce que:

- La reducción máxima de emisiones aplicando los SAF según la normativa establecida será del 50% aproximadamente para 2050.
- En un caso muy optimista, si el hidrógeno líquido fuera responsable del 70% de la combustión en todos los vuelos, la reducción máxima de emisiones superaría el 60% respecto de los valores actuales.

Ambas opciones dan resultados muy positivos en la acción contra el cambio climático, pero no son suficientes para alcanzar los objetivos de neutralidad climática en 2050 promovidos por la Unión Europea. Las emisiones de operación son un orden de magnitud mayor a las emisiones de producción, por lo que nunca se neutralizará el impacto ambiental a no ser que se incida directamente en la etapa de combustión. La vía más efectiva será la introducción de hidrógeno, pero también la más ardua y costosa; por el momento, la vía más rápida y factible será escalar la producción de combustible SAF de biomasa vegetal para incidir en la absorción de CO_2 natural y sin costes añadidos.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

5.1. Conclusiones

El presente proyecto ha ayudado a comprender las fases típicas por las que pasa una aeronave comercial durante todo su ciclo de vida y cómo cada una de éstas juegan un papel muy importante en el impacto ambiental y el fenómeno del efecto invernadero.

A continuación, se comprueba el cumplimiento de los objetivos secundarios definidos al inicio del proyecto:

- **Objetivo nº1 - Estructurar y delimitar la metodología seguida del análisis de ciclo de vida de acuerdo a los estándares.**

Este análisis cumple con las características básicas de un ACV según los estándares *ISO 14040* e *ISO 14044* y se describen todos los parámetros participantes en la sección dedicada a la metodología.

- **Objetivo nº2 - Analizar y comparar las características de consumo de cada modelo de aeronave incluido en la flota actual.**

Se ha analizado el consumo de combustible promedio de toda la flota de aeronaves AIRBUS y BOEING en base a una distancia de recorrido asignada por tamaño del avión y a partir de sus diagramas P-R se obtuvo el consumo por kilómetro (kg/km), el consumo por operación (kg/op) y el consumo por pasajero (L/pax-100km). El consumo por kilómetro se ve reducido a medida que aumenta el rango, mientras que el consumo por pasajero se manifiesta como una curva de bañera cuyo mínimo es coincidente con el punto A en el diagrama P-R.

Tras los cálculos se reordenaron los modelos de aeronave en función de sus consumos y se obtienen varias conclusiones: primero, que existe una relación directa entre el tamaño de la aeronave y su consumo, motivado por el mayor peso del avión y por ser mayor la distancia de vuelo asignada. En línea con lo anterior, el A380 y el B747 son los aviones de más tamaño actualmente y presentan los consumos más elevados, recorriendo distancias típicas de 7500 km. Por el contrario, el consumo por pasajero no tiene relación directa con el tamaño ni la capacidad de la aeronave y se muestra una distribución no ordenada de los modelos. En este punto se determina también que los aviones tienen un consumo que ronda los 2-4 L/pax-100km.

■ **Objetivo nº3 - Llevar a cabo un análisis de ciclo de vida para contabilizar las emisiones de la flota actual.**

Para llevar a cabo el análisis se ha dividido el ciclo de vida de la aeronave en tres fases diferenciadas, comenzando por averiguar las emisiones derivadas de la fabricación de la propia aeronave (*Cradle-to-Gate*) mediante un desglose de materiales. De este apartado se puede concluir que las aeronaves están compuestas por aluminio o CFRP en su mayoría, con acero, titanio, nickel y GFRP como materiales secundarios. Tras analizar la contribución de cada material al impacto ambiental total, se concluye que el aluminio es el de más importancia en las aeronaves operativas actualmente y se prevé que en las nuevas generaciones lo sea el CFRP.

En las fases de producción y de uso de combustible (*Well-to-Wake* en conjunto) se calcularon las emisiones por operación típica y las emisiones tras 60000 FH, simbolizando la vida útil de la aeronave. Para la producción de combustible se utilizó el consumo de cada avión junto con las emisiones unitarias del proceso de fabricación, mientras que para su combustión se asoció el consumo a las emisiones experimentales en fase LTO y en crucero de la literatura. El resultado de este análisis se expresó en una distribución de puntos que relaciona las emisiones de esta fase con el peso operacional en vacío OEW de cada modelo, concluyendo la relación directa de consumo-emisiones y la tendencia de aviones más pesados a consumir más combustible por kilómetro.

Por último, se midió la contribución total de cada fase a las emisiones netas *Cradle-to-Grave*: se concluye que las emisiones de fabricación de la propia aeronave son del orden de $10^5 - 10^6 kgCO_2eq.$ y constituyen menos de un 1% del total, que las emisiones de producción de combustible son del orden de $10^7 - 10^8 kgCO_2eq.$ y constituyen un 13% del total de GHG-100 y que las emisiones derivadas de la combustión son del orden de $10^8 - 10^9 kgCO_2eq.$ y constituyen un 86% del total de emisiones durante el ciclo de vida completo.

- **Objetivo nº4 - Llevar a cabo una comparación entre el impacto ambiental de la flota actual y la futura en 2050 considerando los nuevos combustibles propuestos en el sector aeronáutico.**

Para este último objetivo se han definido unos escenarios de uso por porcentaje de combustibles aeronáuticos alternativos en los años 2030, 2040 y 2050 según recientes regulaciones, es decir, los mínimos impuestos por la Unión Europea. Los combustibles se dividen en 3 categorías: Jet Fuel convencional, SAF a partir de biomasa y SAF sintético. Adicionalmente, se crea un escenario hipotético extra en 2050 en el que el uso de hidrógeno líquido como combustible está ampliamente extendido.

Los resultados se centran en un primer momento en la producción de combustible, ya que las emisiones de combustión son idénticas para el queroseno y los SAF. Se concluye para los escenarios futuros que la introducción de los SAF biomásicos aumentan las emisiones de producción, mientras que los SAF sintéticos las disminuyen por el proceso de captura de CO_2 ; en el escenario 2050, el balance de emisiones es negativo por el uso de los SAF sintéticos en grandes proporciones (un 35%). Al introducir el escenario del hidrógeno vuelven a aumentar las emisiones de producción, pero resulta ventajoso por la reducción de contaminantes durante la combustión.

Al comparar las emisiones actuales con las futuras se determinó en un primer momento que el uso de SAF aumenta las emisiones en vez de disminuirlas, lo que es algo extraño procedente de un combustible teóricamente sostenible. Es ahí donde se explica el método oficial del cómputo de emisiones, en el que se obvian las emisiones de combustión en SAF biomásicos por la captura previa de CO_2 que ocurre durante la fotosíntesis. A la vista de que es necesario tener en cuenta al menos la absorción de una parte del CO_2 se siguen las indicaciones y ya aparecen resultados que avalan la sostenibilidad de los SAF. Se determina que la diferencia entre contabilizar estas emisiones o no supone una variación del 37% de las emisiones totales.

Una última comparación con este criterio demuestra la reducción gradual del impacto ambiental total en la aviación gracias al uso de SAF. Con el LH_2 , la reducción es aún mayor pero en ningún momento se llega al objetivo de la neutralidad climática en 2050.

Como conclusiones principales, se puede afirmar que el impacto de una aeronave en su entorno viene definido por la fase de operación casi en su totalidad, especialmente durante la combustión. El uso de SAF e hidrógeno como combustible en los porcentajes mínimos marcados por la Unión Europea influye notablemente en las emisiones totales y ayuda a mitigar el impacto causado por el aumento de demanda.

En términos de producción de combustible, los SAF sintéticos tienen la capacidad de reducir el volumen de dióxido de carbono en la atmósfera sin que suponga un cambio en la configuración de las aeronaves actuales. Por otra parte, los SAF de biomasa generan más emisiones durante su producción pero utilizan materias primas renovables e incluso aprovechan desechos orgánicos.

El hidrógeno se considera una apuesta segura a largo plazo como combustible y como medio de producción por su alto poder calorífico acompañado de bajas emisiones. El reto que supone propulsar aeronaves con H_2 significará un antes y un después en los aviones comerciales tal y como los conocemos.

5.2. Hipótesis y limitaciones del estudio

Las hipótesis que se han seguido durante estos análisis han quedado definidos en la metodología del estado actual y en las hipótesis sobre el uso de combustibles sostenibles del estado futuro. Las suposiciones han simplificado el análisis pero también pueden haber creado en mayor o menor medida unas limitaciones al estudio.

De entre las limitaciones que hayan podido influir en los cálculos se listan las que considero a título personal que han sido las más limitantes en el estudio:

- No se ha considerado el desglose de materiales completo de la aeronave, sólo de su estructura.
- No se ha contabilizado con suficiente detalle la influencia de la gestión de residuos en la fase EoL.
- No se ha tenido en cuenta la eficiencia individual de cada motor ni las nuevas modificaciones geométricas en los aviones que permiten aumentar la eficiencia y disminuir el consumo de combustible.
- Los consumos de cada modelo de aeronave se han obtenido a partir de una distancia de vuelo típica que puede no ser realista con el escenario actual o futuro.
- El ACV no incluye la influencia del H_2O en el impacto medioambiental, a pesar de que es conocida su influencia en el calentamiento global por la formación de *contrails*.
- Y, por supuesto, no se conoce el estado futuro de la aviación.

Los resultados del análisis de ciclo de vida de la flota comercial actual obtenidos en este proyecto pueden compararse con otros análisis de ciclo de vida similares como los elaborados por S.Howe [8], J. Vasco [39], J. Verstraete [7], Z.Liu

[40] o M. Chester [64]. Como ejemplo, se puede ver la diferencia en resultados entre el análisis propio y el de J. Verstraete [7] del A320-200 en la Figura 5.1: los resultados de la fase de operación son muy similares, pero las emisiones derivadas de producción son lo suficientemente distintas como para que se tenga en cuenta el error. Esto se puede atribuir al 15% del peso OEW del avión que no se ha contabilizado en el desglose de materiales, o quizá a las muchas otras suposiciones que difieran entre su análisis y éste.

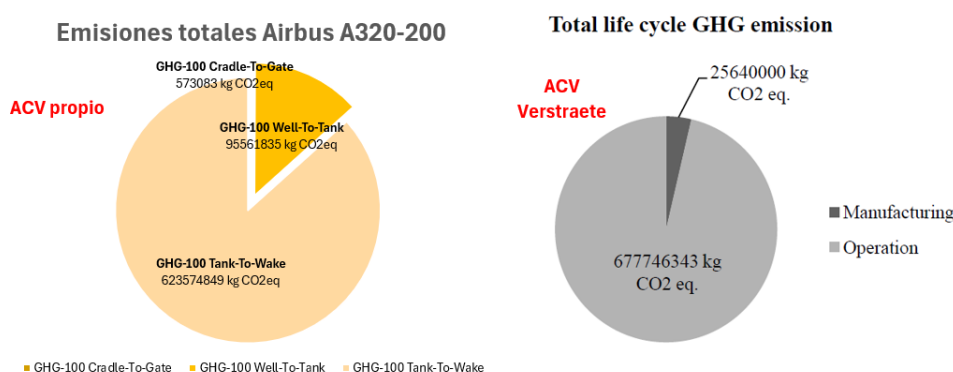


Figura 5.1: Comparativa entre ACV propio y de J. Verstraete para el A320-200.

En otros ACV como el análisis del A330-200 por parte de J. Vasco [39], el desglose de materiales mediante BoM resulta ser idéntico al presente ACV, por lo que se puede concluir que no existe una solución única a partir de los datos de dominio público de los que se dispone.

Como buena noticia, los órdenes de magnitud globales parecen casar con el resto de análisis mencionados, por lo que se afirma que los resultados de las emisiones GHG-100 para el estado actual son razonables.

5.3. Trabajos futuros

Este trabajo es perfectamente ampliable en todas sus partes y actualizable con el paso del tiempo según se vaya esclareciendo el tema de los combustibles sostenibles.

Como trabajos futuros se propone el cálculo de otras emisiones como los NO_x , el SO_2 , el H_2O o partículas PM_x con el mismo procedimiento por el que se han obtenido las emisiones de CO_2 en este ACV. La sostenibilidad de un determinado combustible no tiene por qué venir determinado exclusivamente por su GHG-100 y puede que, tras un análisis más general, se obtengan unas conclusiones distintas.

Las emisiones en la fase de combustión se han obtenido a partir de valores típicos y no tienen por qué corresponderse al 100 % con los valores reales de un turbofán en todas sus fases de vuelo: se propone como trabajo futuro modelar la combustión de motores aeronáuticos actuales y así obtener unos productos más precisos. Ampliando las categorías de impacto y creando un modelo de combustión, se puede analizar y optimizar la sostenibilidad de los motores aeronáuticos.

También sería interesante incluir en el análisis de la flota futura el impacto del aumento de demanda y del incremento de operaciones, y así contabilizar las emisiones totales a la atmósfera por parte de toda la flota con un detalle aún mayor. Para ello también es necesario un análisis económico exhaustivo y un pronóstico de los modelos de aeronave que se verán favorecidos con el escenario futuro. Con unos datos iniciales tan detallados, se podrían elaborar escenarios futuros alternativos y determinar, por década, qué distribución de combustibles llevará al objetivo de neutralidad climática esperado para 2050.

Por último, este proyecto es perfectamente escalable a un escenario global con la misma metodología, abarcando también a las aeronaves regionales con turbohélice.

Estas recomendaciones de trabajos futuros están bastante alineadas con el presente análisis de ciclo de vida y son perfectamente factibles. El trabajo futuro que, en mi opinión, sería el más interesante, se sale del entorno ACV y supone un reto mayor: se propone un análisis de las emisiones GHG-100 reales de los SAF producidos a partir de biomasa contabilizando la absorción de CO_2 verdadera de cada cultivo antes de su cosecha, comprobando si es sensato el no haber contado las emisiones de combustión por parte de este tipo de SAF en el ACV. Por ahora no parecen existir datos experimentales de la actividad fotosintética de plantas utilizadas como biocombustible.

Capítulo 6

Pliego de Condiciones

El presente Trabajo de Fin de Máster cumple con la normativa española expuesta en el *Real Decreto 486/1997*, del 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo [65] (Versión 12/05/2023).

A continuación se exponen los artículos del presente Real Decreto relacionados con este TFM:

Artículo V: Orden, Limpieza y Mantenimiento. Señalización.

El orden, la limpieza y el mantenimiento de los lugares de trabajo deberá ajustarse a lo dispuesto en el *anexo II*.

1. *Los lugares de trabajo y sus respectivos equipos e instalaciones, se limpiarán periódicamente y siempre que sea necesario para mantenerlos en todo momento en condiciones higiénicas adecuadas.*
2. *Los lugares de trabajo y, en particular, sus instalaciones, deberán ser objeto de un mantenimiento periódico, de forma que sus condiciones de funcionamiento satisfagan siempre las especificaciones del proyecto, subsanándose con rapidez las deficiencias que puedan afectar a la seguridad y salud de los trabajadores.*

Artículo VII: Condiciones ambientales

1. La exposición a las condiciones ambientales de los lugares de trabajo no deberá suponer un riesgo para la seguridad y salud de los trabajadores. A tal fin, dichas condiciones ambientales y, en particular, las condiciones termohigrométricas de los lugares de trabajo deberán ajustarse a lo establecido en el *anexo III*.

1. *La exposición a las condiciones ambientales de los lugares de trabajo no debe suponer un riesgo para la seguridad y la salud de los trabajadores.*
2. *Asimismo, y en la medida de lo posible, las condiciones ambientales de los lugares de trabajo no deben constituir una fuente de incomodidad o molestia para los trabajadores.*
3. *En los locales de trabajo cerrados, la temperatura de los locales donde se realicen trabajos sedentarios propios de oficinas o similares estará comprendida entre 17 y 27 °C.*

Artículo VIII: Iluminación

La iluminación de los lugares de trabajo deberá permitir que los trabajadores dispongan de condiciones de visibilidad adecuadas para poder circular por los mismos y desarrollar en ellos sus actividades sin riesgo para su seguridad y salud. La iluminación de los lugares de trabajo deberá cumplir, en particular, las disposiciones del anexo IV.

1. *La iluminación de cada zona o parte de un lugar de trabajo deberá adaptarse a las características de la actividad que se efectúe en ella, teniendo en cuenta:*
 - a) *Los riesgos para la seguridad y salud de los trabajadores dependientes de las condiciones de visibilidad.*
 - b) *Las exigencias visuales de las tareas desarrolladas.*
2. *Siempre que sea posible, los lugares de trabajo tendrán una iluminación natural, que deberá complementarse con una iluminación artificial cuando la primera, por sí sola, no garantice las condiciones de visibilidad adecuadas.*

Capítulo 7

Presupuesto

A continuación se expone un desglose de los costes aproximados derivados de la ejecución de este proyecto. Se tendrán en cuenta los bienes materiales y licencias, los costes del personal involucrado y los gastos de energía consumida.

El objetivo de este presupuesto es determinar los costes necesarios para replicar este análisis y no suponen necesariamente los gastos reales de este Trabajo Fin de Máster.

7.1. Cómputo de tiempo

En la Tabla 7.1 se muestra el tiempo dedicado a la investigación y recopilado de datos pre-análisis de ciclo de vida, a los propios cálculos y a la redacción del proyecto.

CÓMPUTO DE TIEMPO [h]	
Investigación	200
Cálculos	170
Redacción	150
Tutorías	10
TOTAL	530 h

Cuadro 7.1: Presupuesto: cómputo de tiempo

7.2. Cómputo de precios unitarios

Gastos materiales y licencias de software

En la Tabla 7.2 se muestra el coste del portátil utilizado y las licencias.

GASTOS MATERIALES Y LICENCIAS DE SOFTWARE [€]

Ordenador HP 15s-fq5 12th Gen Intel(R) Core(TM) i5-1235U	650
Online LaTeX Editor Overleaf	0
GREET 2023	0
LCA for Experts (GaBi)	4605,78
TOTAL	5255,78 €

Cuadro 7.2: Presupuesto: gastos materiales y licencias de software.

Gastos de personal

En la Tabla 7.3 se muestra un salario medio por hora del estudiante y el propio tutor/supervisor del proyecto.

GASTOS DE PERSONAL [€/h]

Profesor PhD Sistemas Propulsivos (30h de trabajo)	26,17
Ingeniero aeronáutico (530 h de trabajo)	14,74
TOTAL	40,91 €/h

Cuadro 7.3: Presupuesto: gastos de personal.

Gastos de energía

Por último, situando un precio medio de la electricidad en 0,1068 €/kWh se calcula el gasto del portátil usado en la Tabla 7.4.

GASTOS DE ENERGÍA [€/h]

Consumo ordenador 200W/h	0,02 €/h
TOTAL	0,02 €/h

Cuadro 7.4: Presupuesto: gastos de energía.

7.3. Cómputo total

Los gastos calculados anteriormente se multiplican al cómputo de tiempo para obtener el presupuesto total en la Tabla 7.5.

CÓMPUTO TOTAL [€]

Gastos materiales totales	5255,78
Gastos personal totales	8597,30
Gastos energía totales	11,32
TOTAL	13.864,4 €

Cuadro 7.5: Presupuesto: Cómputo total.

REFERENCIAS

1. Flightradar24. *Number of commercial flights tracked by Flightradar24, per day* jun. de 2024. <https://www.flightradar24.com/data/statistics>.
2. Flightradar24. *Flightradar24 Live Air Traffic* jun. de 2024. <https://www.flightradar24.com/25.50,0.82/2>.
3. International, A. C. *ACI World Airport Traffic Forecasts 2023–2052* 2024. <https://store.aci.aero/wp-content/uploads/2024/02/WATF-Executive-Summary.pdf>.
4. EUROCONTROL. *EUROPEAN AVIATION IN 2040 - CHALLENGES OF GROWTH* 2018. https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-07/challenges-of-growth-2018-annex1_0.pdf.
5. Agency, E. E. *La contaminación acústica sigue estando muy extendida en toda Europa, pero hay formas de bajar el volumen* ago. de 2023. <https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-de-la-aema-2020/articles/la-contaminacion-acustica-sigue-estando>.
6. Aviation, S. *QUIETER* 2024. <https://www.sustainableaviation.co.uk/quieter/>.
7. Verstraete, J. *Creating a Life-Cycle Assessment of an Aircraft* (Department of Automotive y Aeronautical Engineering - Hamburg University of Applied Sciences, 2012).
8. Howe, S. *ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT AND OPTIMISATION OF COMMERCIAL AVIATION* (Cranfield University, 2011).
9. Para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, M. *Partículas* 2024. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/particulas.html>.
10. Agency, U. S. E. P. *Overview of Greenhouse Gases* abr. de 2024. <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>.

11. Survey, B. G. *The Greenhouse Effect* 2024. <https://www.bgs.ac.uk/discovering-geology/climate-change/how-does-the-greenhouse-effect-work/#:~:text=A%20greenhouse%20gas%20is%20called,and%20eventually%20lost%20to%20space..>
12. Ritchie, H. *What share of global CO2 emissions come from aviation?* 2024. <https://ourworldindata.org/global-aviation-emissions#:~:text=Aviation%20accounts%20for%202.5%25%20of,to%20global%20warming%20to%20date.&text=Flying%20is%20one%20of%20the,of%20the%20world's%20carbon%20emissions..>
13. Unidas, N. *La Agenda para el Desarrollo Sostenible* 2023. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>.
14. Fokaides, P. A., Morsink-Georgali, P.-Z. y Kylili, A. *Environmental assessment of renewable energy conversion technologies* (Elsevier, 2022).
15. *ISO 14040:2006(es) Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia* 2006. <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>.
16. *ISO 14044:2006(es) Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Requisitos y directrices* 2006. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:es>.
17. LCA, O. C. *Life-cycle assessment for green building experts* 2024. <https://oneclicklca.com/en/resources/articles/life-cycle-assessment-for-green-building-experts>.
18. Airbus. *FAST special edition A350XWB* 2013. https://aircraft.airbus.com/sites/g/files/jlcbta126/files/2022-04/FAST_specialA350.pdf.
19. Airbus. *Be an Airbus supplier* jun. de 2021. <https://www.airbus.com/en/be-an-airbus-supplier>.
20. Lee, D. *Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation* (Atmospheric Environment, 2009).
21. EUROCONTROL. *EUROCONTROL Forecast 2024-2030* 2024. <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-forecast-2024-2030>.
22. ENVISA. *Study – Assessment of the environmental sustainability status in the Aviation Maintenance and Production Organisation (M&P) Domain* (EASA, 2022).
23. EASA. *Sostenibilidad en la fase final de la vida útil de las aeronaves* 2023. <https://www.easa.europa.eu/es/light/topics/sustainability-end-life-phase-aircraft>.
24. For Fundamental Rights, E. U. A. *Member States of the EU* 2024. <https://fra.europa.eu/en/cooperation/eu-member-states>.

25. Sphera. *LCA For Experts* 2024. <https://sphera.com/solutions/product-stewardship/life-cycle-assessment-software-and-data/lca-for-experts/>.
26. Leiden, U. *CML-IA Characterisation Factors* 2016. www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors.
27. Sáez Mallea, I. *ARCHITECTURE OPTIMIZATION OF FUEL CELL LIGHT COMMERCIAL VEHICLES IN TERMS OF PERFORMANCE AND ENVIRONMENTAL IMPACT* (Universitat Politècnica de Valencia, 2022).
28. Agency, U. S. E. P. *Understanding Global Warming Potentials* 2024. <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>.
29. IPCC. *AR5 Climate Change 2014 Synthesis Report* 2014. https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf.
30. GREET. *Life-Cycle Analysis of Alternative Aviation Fuels in GREET* (Argonne National Laboratory, 2012).
31. Aerpuertoinfo. *Lista de aerolíneas en Europa* 2023. www.aerpuertoinfo.com/info-sobre-vuelos/lista-de-aerolineas-en-europa/.
32. Airfleets. *Airfleets home* 2024. <https://www.airfleets.es/home/>.
33. Program, I. C. O. *IATA CO2 Calculator Guidelines* 2022. https://www.iata.org/contentassets/922ebc4cbcd24c4d9fd55933e7070947/icop_faq_general-for-airline-participants.pdf.
34. Burzlaff, M. *Aircraft Fuel Consumption – Estimation and Visualization* (HAW HAMBURG, 2017).
35. Scholz, D. *Update: Aircraft Fuel Consumption – Estimation and Visualization* 2021. <https://dataverse.harvard.edu/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.7910/DVN/2HMEHB>.
36. Elgowainy, A. *Life-Cycle Analysis of Alternative Aviation Fuels in GREET* (Argonne National Laboratory, 2012).
37. IATA. *Air Passenger Market Analysis* 2023. <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/air-passenger-market-analysis-december-2023/>.
38. Rypdal, K. *AIRCRAFT EMISSIONS*. 2019. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/2_5_Aircraft.pdf.
39. Vasco, J. *Life Cycle Assessment of the Airbus A330-200 Aircraft* (Universidade Técnica de Lisboa, 2010).
40. Liu, Z. *LIFE CYCLE ASSESSMENT OF COMPOSITES AND ALUMINIUM USE IN AIRCRAFT SYSTEMS* (Cranfield University, 2013).

41. Rendigs, K. H. *Airbus and Current Aircrafts Metal Technologies* (AIRBUS, 2008).
42. AIRBUS. *End-of-life Reusing, recycling, rethinking* 2022. <https://aircraft.airbus.com/en/newsroom/news/2022-11-end-of-life-reusing-recycling-rethinking>.
43. Technology, A. *Airbus A220-100 Jetliner* 2024. [https://www.aerospace-technology.com/projects/airbus-a220-100-jetliner/#:~:text=Design%20and%20construction%20of%20A220%2D100&text=The%20fuselage%20is%20made%20from,%2C%20and%20steel%20\(1%25\)..](https://www.aerospace-technology.com/projects/airbus-a220-100-jetliner/#:~:text=Design%20and%20construction%20of%20A220%2D100&text=The%20fuselage%20is%20made%20from,%2C%20and%20steel%20(1%25)..)
44. Roeseler, B. *Composite Structures – The First 100 Years* 2007. <http://ae.metu.edu.tr/~ae469/Composites%20100%20years.pdf>.
45. F. C, C. *Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials* (ELSEVIER, 2006).
46. Airliners, M. *Boeing 787 Dreamliner*. 2023. <https://www.modernairliners.com/boeing-787>.
47. AIRBUS. *A320 Weight and Balance Manual* (AIRBUS S.A.S, 1988).
48. Commission, E. *Net-Zero Industry Act* 2024. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/green-deal-industrial-plan/net-zero-industry-act_en.
49. EUR-LEX. *ReFuelEU Aviation* 2023. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32023R2405>.
50. CORSIA. *Methodology for Calculating Actual Life Cycle Emissions Values* (ICAO, 2024).
51. IATA. *Developing Sustainable Aviation Fuel (SAF)* 2023. <https://www.iata.org/en/programs/environment/sustainable-aviation-fuels/#tab-2>.
52. CORSIA. *CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels* (ICAO, 2024).
53. Of Energy, U. D. *Sustainable Aviation Fuel* 2023. <https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel>.
54. Delnegro, L. *The Journey of SAF: The Production Methods & Documentation* 2023. <https://www.ainonline.com/aviation-news/business-aviation/2023-04-01/journey-saf-production-methods-documentation>.
55. CBSCI. *HEFA Production and Feedstock Selection* 2019. <https://cbsci.ca/wp-content/uploads/CBSCI-HEFA-Production-and-Freedstock-Selection-single-page.pdf>.
56. AIRBUS. *Power-to-Liquids, explained*. 2021. <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2021-07-power-to-liquids-explained>.

57. Hte GmbH. *RWGS*. 2024. <https://www.hte-company.com/en/industries/co2sday/rwgs>.
58. AIRBUS. *ZEROe - Towards the world's first hydrogen-powered commercial aircraft*. 2024. <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2020-11-hydrogen-combustion-explained#:~:text=Combustion%2C%20or%20burning%2C%20is%20a,turbine%20engine%20to%20generate%20thrust..>
59. AIRBUS. *Hydrogen combustion, explained*. 2024. <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2020-11-hydrogen-combustion-explained#:~:text=Combustion%2C%20or%20burning%2C%20is%20a,turbine%20engine%20to%20generate%20thrust..>
60. IATA. *Liquid hydrogen as a potential lowcarbon fuel for aviation*. 2020. https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/fact_sheet7-hydrogen-fact-sheet_072020.pdf.
61. Forum, W. E. *Grey, blue, green – why are there so many colours of hydrogen?* 2021. <https://www.weforum.org/agenda/2021/07/clean-energy-green-hydrogen/>.
62. Centre, S. F. *Sustainable Aviation Fuel Greenhouse Gas Emission Accounting and Insetting Guidelines* 2021. https://smart-freight-centre-media.s3.amazonaws.com/documents/SFC_MIT_CTL_SAF_Guidelines_July_2021__1.pdf.
63. Forum, W. E. *Sustainable Aviation Fuel Certificate (SAFc) Emissions Accounting and Reporting Guidelines* 2022. https://www3.weforum.org/docs/WEF_SAFc_Accounting_Guidelines_2022.pdf.
64. Chester, M. V. *Life-cycle Environmental Inventory of Passenger Transportation in the United States* (University of California, Berkeley, 2008).
65. BOE. *RD 486/1997* 2023. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1997-8669&t=1&p=20230512>.