

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de las Tecnologías
Industriales

IMPACTO DE LA AVIACIÓN SOBRE EL MEDIO AMBIENTE

Autor: Francisco Aguilera Reina

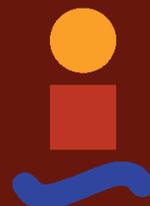
Tutor: Francisco Lucas García

Dep. de Ingeniería Gráfica

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015







Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

IMPACTO DE LA AVIACIÓN SOBRE EL MEDIO AMBIENTE

Autor:

Francisco Aguilera Reina

Tutor:

Francisco Lucas García
Profesor Asociado

Dep. de Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015





Trabajo Fin de Grado: Impacto de la aviación sobre el medio ambiente.

Autor: Francisco Aguilera Reina

Tutor: Francisco Lucas García

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2015

El Secretario del Tribunal



A mi familia, en especial a mis padres

A mis profesores y compañeros, que me han acompañado durante esta experiencia



ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
LISTA DE ACRÓNIMOS.....	xi
1. RESUMEN	1
2. EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES	2
2.1. ¿QUÉ GASES EMITEN LOS AVIONES?.....	3
2.2. CAMBIO CLIMÁTICO Y EFECTO INVERNADERO	4
2.3. ¿QUÉ MEDIDAS SE HAN TOMADO CONTRA EL CAMBIO CLIMÁTICO?.....	6
2.4. IMPACTO CLIMÁTICO DE LOS GASES EMITIDOS	9
2.4.1. CO ₂	10
2.4.2. Vapor de agua	14
2.4.3. Metano (CH ₄).....	15
2.4.4. Óxidos Nitrosos (NO _x).....	16
2.4.5. CO.....	17
2.4.6. Óxidos sulfúricos, Aerosoles de sulfato y hollín.....	18
2.5. IMPACTO DE LA AVIACIÓN SUPERSÓNICA.....	18
2.6. LA IMPORTANCIA DE EMITIR LOS GASES EN ALTURA	18
2.7. COMO REDUCIR LAS EMISIONES.....	19
2.7.1. Aproximación con descenso continuo	19
2.7.2. Aumento de la capacidad del factor de carga	23
2.7.3. Mantenimiento.....	23
2.7.4. Reducción de la velocidad.....	25
2.7.5. Cielo único europeo	25
2.7.6. Sistemas de derechos de emisiones (ETS)	27
2.7.7. Biocombustibles	27
2.7.8. “Geared Turbofan” (GTF)	33
2.7.9. Open Rotor	34
2.7.10. Reducir el peso de los aviones	40
2.7.11. Uso de placas solares en los aviones.....	44
2.7.12. Motores de hidrógeno	47
2.7.13. Pilas de combustible	49



3. CONTAMINACIÓN ACÚSTICA.....	50
3.1. INTRODUCCIÓN	50
3.1.1. El acuerdo entre la OACI y CAEP de 02/2013	51
3.2. CERTIFICACIÓN	51
3.3. FUENTES DEL RUIDO	52
3.4. FORMAS DE REDUCIR EL RUIDO	56
3.4.1. Aterrizaje en descenso continuo (CDA)	56
3.4.2. Reducción del empuje para disminuir el nivel de ruido:	56
3.4.3. Reducir el ruido de los gases de escape:	57
3.4.4. Envolvente del motor	57
3.4.5. Tasas por ruido:.....	58
3.4.6. Otras medidas de menor impacto	58
4. PROBLEMA DE ACTUALIDAD.....	59
4.1. EL VIRUS DEL ÉBOLA EN LA AVIACIÓN COMERCIAL	59
5. BIBLIOGRAFÍA	63



ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 ¿Qué gases emiten los aviones?.....	2
Fig. 2 Gases emitidos por los aviones a la atmósfera.	3
Fig. 3 Diagrama equilibrio radiactivo global y efecto invernadero.	5
Fig. 4 Cambios de la fuerza radiante entre 1750 y 2005 estimados por IPPC.....	10
Fig. 5 Emisiones de CO2 en España.	11
Fig. 6 Procedencia del CO2.....	11
Fig. 7 Contenido atmosférico de CO2.	12
Fig. 8 Concentración de dióxido de carbono atmosférico anual.....	13
Fig. 9 Flujo de carbono hacia la atmósfera.	13
Fig. 10 Gramos de CO2 emitidos por persona por km.	14
Fig. 11 Estelas de condensación formadas por el vapor de agua.	14
Fig. 12 Contenido atmosférico de Metano.	15
Fig. 14 Contenido atmosférico de NOx.	16
Fig. 13 Procedencia del Oxido Nitroso.	16
Fig. 15 Aproximación convencional y en descenso continuo.....	19
Fig. 16 Comparativa de consumo en el aeropuerto de Newark el 14/08/2005.	21
Fig. 17 Ahorro medio al usar el CDA en diferentes aviones.....	21
Fig. 18 Tiempo ahorrado por vuelo.....	22
Fig. 19 Consumo específico del motor VS horas de servicio.....	24
Fig. 20 Ahorro de combustible al disminuir el número de Mach en diversos modelos de A-340.	25
Fig. 21 Crecimiento anual del tráfico aéreo.	26
Fig. 22 Proceso de refinamiento de combustibles fósiles y de biocombustibles.....	28
Fig. 23 Proceso de refinado de Biocombustible.....	29
Fig. 24 Esquema de funcionamiento de una planta de producción de biocombustibles a través de energía solar y alimentación por CO2.	30
Fig. 25 Áreas del mundo de producción de biocombustibles de segunda generación.....	32
Fig. 26 Turbina y ventilación separadas.	33
Fig. 27 Porcentaje de eficiencia en función del número de Mach.	34
Fig. 28 Sección de un open rotor.	35
Fig. 29 Flujo de Gases en un open rotor.	35
Fig. 30 Esquema que representa los distintos orígenes en la producción de ruido.	37
Fig. 31 Caja de reducción DPGB y su eficiencia.....	38
Fig. 32 Empuje producido y consumo a diferentes alturas.....	38
Fig. 33 Materiales del Boeing 787.	40
Fig. 34 Materiales en los distintos aviones de Airbus.	40
Fig. 35 Evolución de los materiales compuestos en aviones Airbus.	42
Fig. 36 Representación de un nanotubo de carbono.....	43
Fig. 37 Avión eléctrico.	45
Fig. 38 Avión eléctrico.	46
Fig. 39 Turbina de Hidrógeno.....	47



Fig. 40 Comparación entre el A-2 y el A-380.....	48
Fig. 41 Esquema de funcionamiento de una pila de combustible.	49
Fig. 42 Energía sonora de la salida de gases de escape de un turborreactor.	53
Fig. 43 Nivel de ruido de:.....	54
Fig. 44 Diagrama de directividad de un avión turbopropulsado.....	55
Fig. 45 Forma de detectar personas con posibles problemas médicos.	61
Fig. 46 Airbus A310 medicalizado y con todas las medidas de seguridad pertinentes.....	62



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados del Cielo Único Europeo (desde Aeropuerto Madrid).	26
Tabla 2. Comparación de consumo específico.....	39
Tabla 3. Propiedades Nanotubos	43



LISTA DE ACRÓNIMOS

ATC	-	Control de Tráfico Aéreo
CAEP	-	Comité de Protección Medioambiental de la Aviación
CDA	-	Aproximación con descenso continuo
dB	-	Decibelios
DPGB	-	Caja de reducción planetaria diferencial
EIA	-	Administración de Información Energética
EASA	-	Agencia Europea de Seguridad Aérea
ETS	-	Sistema de Derechos de Emisiones
FAA	-	Federal Aviation Administration
FOD	-	Foreign Object Damage
GE	-	General Electric
GEI	-	Gases de efecto invernadero
GTF	-	Turbofan con caja de reducción
IATA	-	Asociación Internacional de Transporte Aéreo
IPCC	-	Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático
ITC	-	Iniciativa Técnica Conjunta
LAPCAT	-	Long-Term Advanced Propulsion Concepts and Technologies
NASA	-	National Aeronautics and Space Administration
NNC	-	No Certificado por Ruido
OACI	-	Organización de Aviación Civil Internacional
OMS	-	Organización Mundial de la Salud
OR	-	Open Rotor
P&W	-	Pratt & Whitney
PECC	-	Programa Europeo del Cambio Climático
UE	-	Unión Europea





1. RESUMEN

El agujero formado en la Antártida y descubierto en el año 1985, alertó a la comunidad internacional de la problemática medioambiental existente, planteando la necesidad de que los países desarrollados, en vía de desarrollo y las organizaciones medioambientales aúnen esfuerzos y conocimientos, trabajando conjuntamente en mitigar el cambio climático y la minimización de sus impactos.

Tradicionalmente el sector de la aviación ha sufrido la carencia de especialistas en temas medioambientales debido a que ha concentrado sus esfuerzos en temas de seguridad operacional y física. Ahora, los aspectos de seguridad operacional y de medio ambiente se encuentran en mayor medida interrelacionados, y esto obliga a que los profesionales de este sector deban tener un mayor conocimiento de la regulación y de los efectos medioambientales.

Para cumplimiento de lo anterior, todos los participantes del sector aéreo, centran sus objetivos en:

- La reducción de emisiones contaminantes.
- La optimización de energía.
- La disminución del ruido.

Todo ello, con la finalidad de lograr eficiencia energética en todos sus procesos, que además de dar cumplimiento a la normativa internacional y a las políticas ambientales del estado, les permita ahorrar costos y maximizar acciones en pro del medio ambiente.



2. EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES

Las aeronaves emiten gases y partículas directamente en la troposfera superior y en la estratósfera inferior donde tienen un efecto sobre la composición de la atmósfera. Estos gases y partículas alteran la concentración de los gases atmosféricos de efecto invernadero, que incluyen al dióxido de carbono (CO₂), al ozono (O₃) y al metano (CH₄).

La aviación comercial siempre ha sido pionera en las soluciones tecnológicas adoptadas para reducir las emisiones gracias a desarrollos y mejoras en el grupo propulsor, nuevos procedimientos, aerodinámica más eficiente, estructuras de menos peso, entre otras soluciones.

Sin embargo las emisiones procedentes del transporte aumentaron de manera significativa debido al crecimiento de la demanda.

Cada pasajero de avión produce un promedio de más de cien kilos de dióxido de carbono por cada hora de vuelo.

La aviación civil es responsable de entre un 2 y un 3 por ciento del total de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) emitidas de manera artificial a la atmósfera cada año.

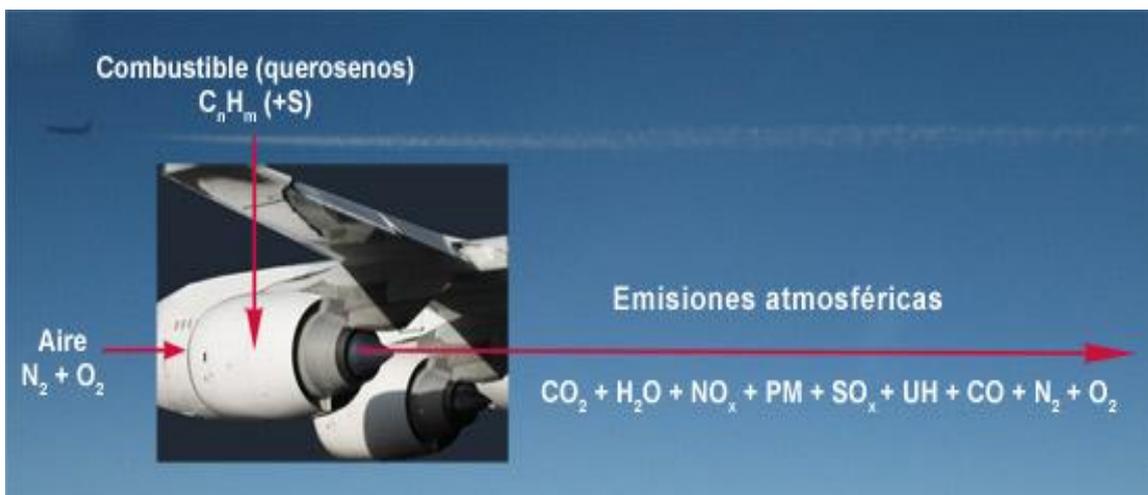


Fig. 1 ¿Qué gases emiten los aviones?.



2.1. ¿QUÉ GASES EMITEN LOS AVIONES?

Los gases de escape de los motores de las aeronaves contienen:

- Un 7% a 8% de CO₂.
- Vapor de agua.
- Un 0,5% de óxido nítrico (NO), dióxido nitrógeno (NO₂).
- Hidrocarburos sin quemar.
- Monóxido de carbono.
- Oxido sulfúrico (SO_x).
- Pequeñas cantidades de partículas de hollín (si bien en las últimas décadas la aviación ha logrado suprimir prácticamente dichas partículas).

Entre el 91,5% y el 92,5% de los escapes de los motores de aviación son de oxígeno y nitrógeno atmosféricos normales.

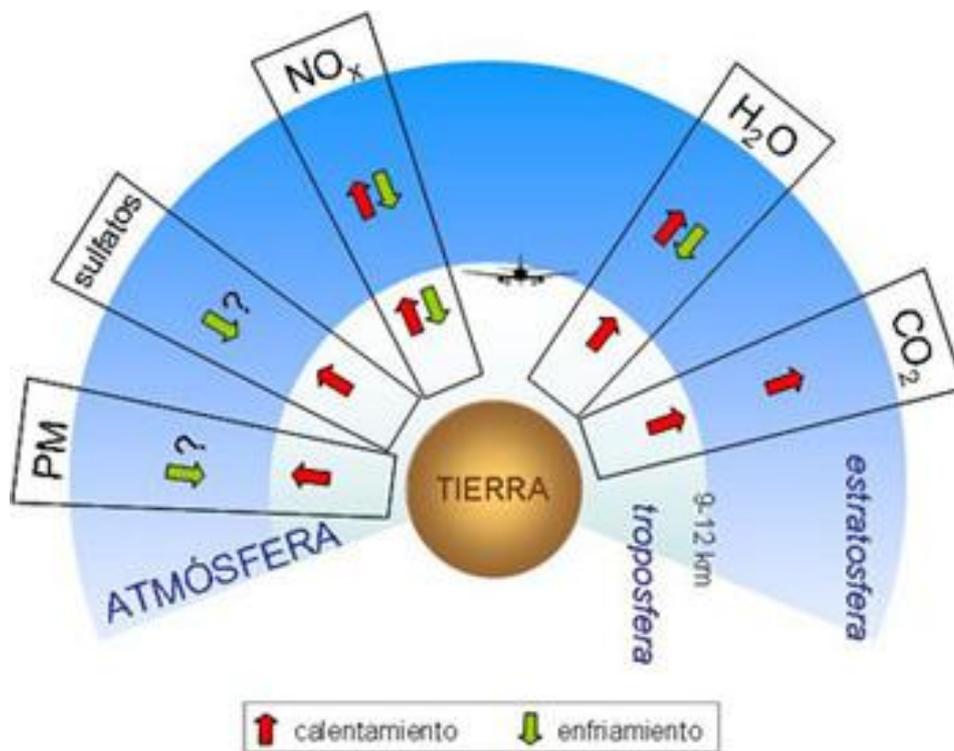


Fig. 2 Gases emitidos por los aviones a la atmósfera.



2.2. CAMBIO CLIMÁTICO Y EFECTO INVERNADERO

Podríamos destacar toda una serie de claras evidencias del cambio climático, como son:

- La temperatura superficial media de la Tierra aumentó unos 0,6°C ($\pm 0.2^\circ\text{C}$) durante el Siglo XX.
- Las temperaturas han aumentado durante los cuatro últimos decenios en los 8 kilómetros inferiores de la atmósfera.
- La extensión de la capa de nieve y del hielo terrestre y marino ha disminuido.
- El nivel medio del mar en todo el mundo ha subido y la temperatura de los océanos ha aumentado.
- Cambios observados en la variabilidad del clima y en los episodios meteorológicos y climáticos extremos.

Los agentes responsables del cambio climáticos, son por una parte los aumentos en las concentraciones atmosféricas de gases de Efecto Invernadero (GEI) y de aerosoles, y por otra las variaciones en la actividad solar.

El **Efecto Invernadero** es un fenómeno por el cual ciertos gases retienen parte de la energía emitida por el suelo tras haber sido calentado por la radiación solar. Se produce, por lo tanto, un efecto de calentamiento similar al que ocurre en un invernadero. Con una elevación de la temperatura.

El efecto invernadero es un fenómeno natural, causado por la presencia de gases en la atmósfera, principalmente CO₂, vapor de agua y metano. Estos gases retienen parte de la energía calorífica que se recibe del sol, manteniendo la temperatura dentro de límites que han permitido el desarrollo de la vida como la conocemos.

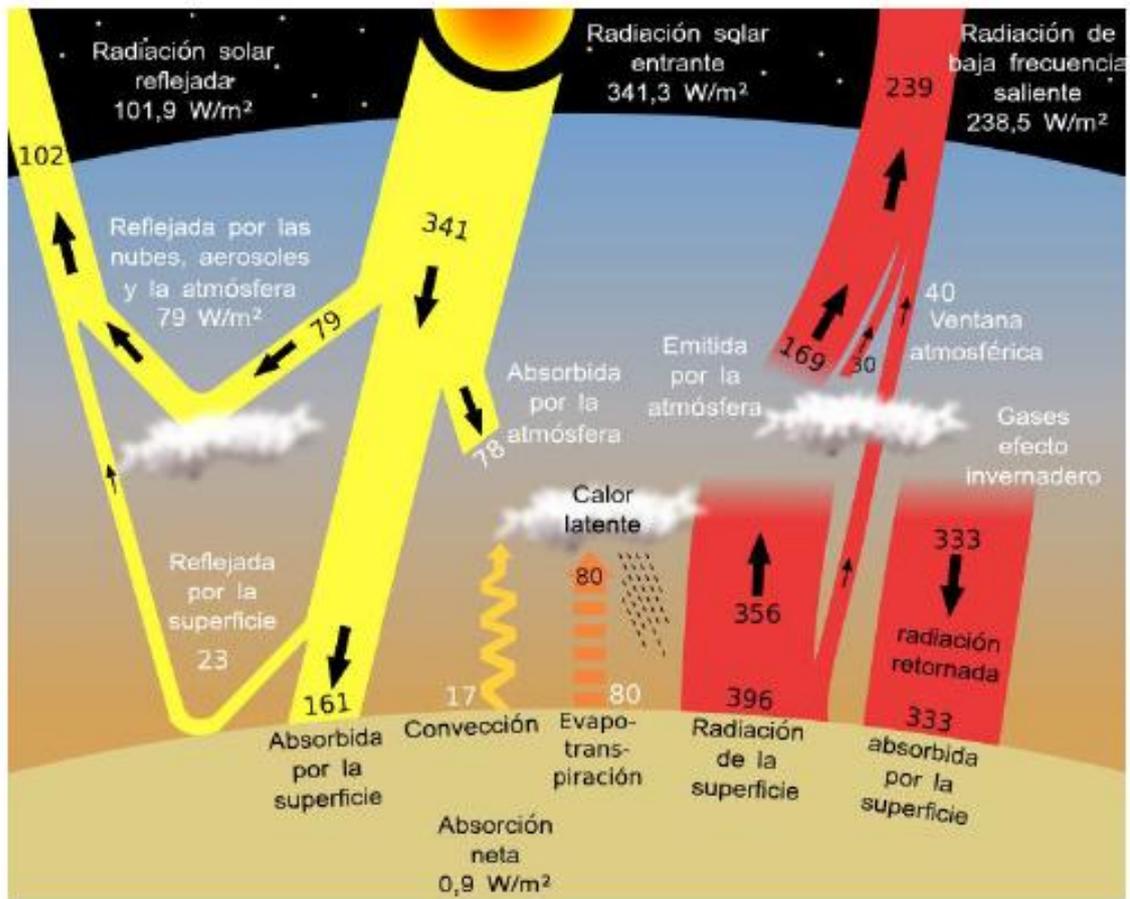


Fig. 3 Diagrama equilibrio radiativo global y efecto invernadero.

El efecto invernadero es realmente beneficioso para la Tierra. Es sólo cuando los procesos humanos aumentan su velocidad que se producen los problemas. Uno de los problemas principales es el repetido calentamiento global.

Como consecuencia, la superficie de la tierra experimenta un calentamiento de -18°C a 15°C , o sea un aumento de 33°C . A éste se le denomina **Efecto Invernadero natural**.

Sin embargo la actividad humana tiende a aumentar extraordinariamente las concentraciones de estos gases en la atmósfera, multiplicando el Efecto Invernadero hasta cotas que conducen al calentamiento global del planeta y el peligroso cambio climático; es el denominado **Efecto Invernadero antropogénico**.



2.3. ¿QUÉ MEDIDAS SE HAN TOMADO CONTRA EL CAMBIO CLIMÁTICO?

MEDIDAS GLOBALES

1992- Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Se aprobó el documento “Agenda 21”, con la finalidad de abordar el problema de las emisiones de Efecto Invernadero a la atmósfera.

10 de Diciembre de 1997, en el seno de la **III Conferencia de las Partes** fue aprobado el Protocolo de Kyoto, los países industrializados se comprometen por primera vez a reducir las emisiones de gases de Efecto Invernadero. El Protocolo es firmado por la UE y por España en abril de 1998, por Rusia en marzo de 1999 y por EEUU en noviembre de 1999. Ahora bien para su entrada en vigor, el propio protocolo señala la necesidad de su ratificación por al menos 55 países, cuyas emisiones iguallen al 55% de las emisiones de CO2 producidas en el año 1990.

Junio de 1998, en el **Consejo de Ministros de Medio Ambiente de la UE,** celebrado en Luxemburgo, se alcanza el acuerdo de reparto de cargas entre los Estados miembros de la UE.

Noviembre de 1998, IV Conferencia de las Partes o Cumbre de Buenos Aires, no se logra alcanzar ningún progreso.

Octubre de 1999, V Conferencia de las Partes, celebrada en **Bonn,** se aprecia una voluntad común de avanzar en el proceso de ratificación y puesta en vigor del Convenio, fijando como objetivo político la entrada en vigor del Protocolo de Kyoto en el año 2002.

Noviembre de 2000, VI Conferencia de las Partes, en La Haya, no se consiguió la ratificación del Protocolo debido a las posiciones enfrentadas de la UE y EE.UU.

Enero de 2001, en el **Tercer Informe del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC),** se confirma mediante pruebas la influencia de la actividad humana en el clima terrestre, así como los efectos del cambio climático en distintas zonas terrestres. El IPCC ha elaborado tres informes de evaluación publicados en 1990, 1995 y 2001. Marzo de 2001, la nueva presidencia de los EE.UU. decide retirarse del Protocolo de Kyoto.

Julio de 2001, Segunda Parte de la VI Conferencia de las Partes de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, en Bonn, se conseguía salvar el Protocolo gracias al compromiso de ratificación por parte de Japón y otros Estados.

Noviembre de 2001, VII Conferencia de las Partes, celebrada en Marrakech. Con UE, Japón y Rusia podía alcanzarse el mínimo exigido, para que el acuerdo internacional entrara en vigor en el año 2002.

Octubre de 2002, VIII Conferencia de las Partes del Convenio Marco, en Nueva Delhi, en él EE.UU. declara con rotundidad que no ratificará Kyoto, aduciendo que las medidas acordadas para sus reducciones de emisiones harían disminuir su crecimiento industrial un 35%.



Diciembre de 2003, IX Conferencia de las Partes, en Milán, 120 países apoyan Kyoto y lo ratifican (UE, Japón, Canadá, etc.), ahora la posición de Rusia es clave tras la retirada de EE.UU. Septiembre de 2004, el gobierno Ruso, ratifica Kyoto, ahora el protocolo ha de ser ratificado por el Parlamento Ruso. La X Conferencia de las Partes de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, en Buenos Aires, entre los días 6 y 17 de diciembre de 2004, es clave para ver si para esas fechas Rusia ratificará el Protocolo, de hacerlo éste entraría automáticamente en vigor.

INICIATIVAS COMUNITARIAS

La UE ha promovido la entrada en vigor del Protocolo de Kyoto, instando a nivel mundial su urgente ratificación por los distintos Estados.

9 de Marzo de 2002, la UE acuerda por unanimidad ratificar el Protocolo, en la reunión del **Consejo de Ministros de Medio Ambiente** celebrada en Bruselas. Mucho antes, en **octubre de 1999**, se anuncia la elaboración del **Programa Europeo del Cambio Climático (PECC)**, en el que se concreta la estrategia comunitaria sobre el cambio climático. Uno de los pilares básicos de esta estrategia es un plan de intercambio interno de emisiones dentro de la UE, recogido en el **“Libro Verde sobre comercio de los derechos de emisión de gases de Efecto Invernadero en la Unión Europea”**.

Octubre de 2003, la UE aprueba la **Directiva 2003/87/CE**, por la que se establece un régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de Efecto Invernadero en la Comunidad.

Cada país ha tenido la obligación de elaborar un **Plan de Asignación**, el cual debía ser remitido a la Comisión Europea antes del 31 de Marzo. En septiembre de 2003 todos los países lo han presentado a excepción de Grecia. Del mismo modo, la UE pone en marcha toda una serie de actuaciones en diferentes ámbitos cuyo objetivo es igualmente el reducir emisiones, entre ellas destacamos: **Programa ALTENER**, de fomento de las energías renovables, o el **Plan de Acción para mejorar la eficiencia energética**.

El día **1 de Enero del 2012**, la **Unión europea** crea el **sistema de derechos de emisión de dióxido de carbono o ETS**.

«Clean Sky», vigente hasta el 31 de diciembre de 2017. La iniciativa tecnológica conjunta (ITC) «Cielo Limpio» pretende crear una asociación de investigación público-privada a escala europea en el ámbito aeronáutico para desarrollar las tecnologías necesarias para un sistema aéreo limpio, innovador y competitivo.



Tiene los siguientes objetivos principales:

- Acelerar el desarrollo de tecnologías adaptadas a una generación de transportes aéreos más limpios;
- Conseguir una coordinación eficaz de la investigación aeronáutica a escala europea;
- Permitir la creación de un sistema de transporte aéreo innovador y competitivo;
- Mejorar la generación de conocimientos, así como la explotación de los resultados de la investigación.

Cuantitativamente, «Clean Sky» pretende reducir, para 2020, las emisiones de CO₂ en un 50 %, las de NO_x en un 80 % y el ruido en un 50 %.

ESTRATEGIA ESPAÑOLA

El Consejo de Ministros del 1 de febrero del 2002, remite a las Cortes el Protocolo de Kyoto. El Ministro Español de Medio Ambiente, presidió el acto de depósito del correspondiente instrumento de **ratificación de Protocolo de Kyoto en Nueva York, el 31 de mayo del 2002**.

Para cumplir los compromisos adquiridos tras la firma del Protocolo, el Consejo de Ministros creó mediante **RD 177/1998, el Consejo Nacional del Clima**, éste es presidido por el Ministerio de Medio Ambiente, y tiene como función principal la elaboración, evaluación y seguimiento de la “Estrategia Española frente al Cambio Climático”

2001, el Gobierno crea la **Oficina Española del Cambio Climático**. Las líneas maestras de la acción del Gobierno, es la apuesta por la eficiencia energética y las Energías Renovables, y los instrumentos en vigor para conseguir el objetivo son: “Planificación de los sectores de Electricidad y Gas. Desarrollo de la Red de Transporte 2002-2011”, “Plan de Fomento de las Energías Renovables”, “Estrategia de Eficiencia y Ahorro Energético”.

27 de agosto de 2004, se aprueba el **RD 5/2004** por el que se regula el **régimen del comercio de derechos de emisión de GEI** cuyo objetivo es la transposición de la Directiva 2003/87/CE.

6 de septiembre se publicó el **RD 1866/2004**, en el que **se aprueba el PNA de derechos de emisión 2005-2003**.



EL OBJETIVO DE LA IATA

La IATA (International Air Transport Association) representa alrededor de 240 líneas aéreas, que suponen el 84% de tráfico aéreo regular internacional.

La IATA emitió un comunicado el 11 de junio del 2012 con el objetivo de alcanzar una solución global integral sobre las emisiones de la aviación a través de la OACI (Organización de Aviación Civil Internacional).

La industria global del transporte aéreo se ha comprometido con tres objetivos concretos para reducir su parte del 2% de las emisiones de carbono:

- Mejorar la eficiencia del consumo de combustible un 1,5% anual hasta 2020.
- Estabilizar las emisiones de CO₂ con un crecimiento neutro a partir de 2020.
- Reducir las emisiones hasta el 50% en 2050, en comparación a los niveles de 2005.

Para lograr estos ambiciosos objetivos, la industria se ha sumado a una estrategia basada en cuatro pilares: inversión en nueva tecnología, infraestructuras más eficientes, operaciones más efectivas y medidas económicas de mercado positivas.

La OACI aborda actualmente este problema desde cuatro perspectivas para lograr una medida global única para la aviación internacional:

- Un esquema global de compensación obligatorio.
- Un esquema global de compensación obligatorio con recaudación de ingresos adicional.
- Un esquema global de comercio de emisiones.
- Un esquema global de “Línea de Base y Crédito” basado en la eficiencia.

2.4. IMPACTO CLIMÁTICO DE LOS GASES EMITIDOS

El impacto climático de los gases y de las partículas creadas y emitidas debido a la aviación, es difícil de cuantificar. Esto es debido a que el dióxido de carbono es un gas de larga duración atmosférica y se combina con gran facilidad en toda la atmosfera. Como consecuencia es una actividad de gran complejidad medir los efectos que tienen las emisiones de las aeronaves sobre el cambio climático.

La **fuerza** radiante (Wm^{-2}) es una medida de la importancia de un mecanismo potencial de cambio climático. Los valores positivos de la fuerza radiante implican un calentamiento neto mientras que los negativos implican enfriamiento.

Los otros gases (NO_x, SO_x, vapor de agua) tienen una permanencia atmosférica más breve y se mantienen concentrados cerca de las rutas de vuelo, principalmente en las latitudes septentrionales medianas.



Radiative Forcing Component

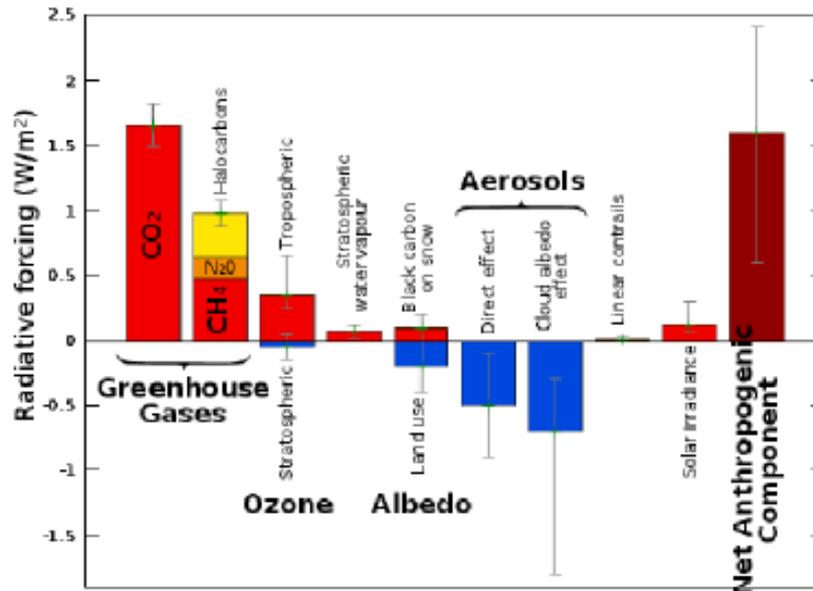


Fig. 4 Cambios de la fuerza radiante entre 1750 y 2005 estimados por IPCC.

2.4.1. CO₂

Es el elemento que más contribuye al efecto invernadero artificial. En general, es responsable de más del 60% del efecto invernadero intensificado.

En los países industrializados, el CO₂ representa más del 80% de las emisiones de gases de efecto invernadero.

El CO₂ puede permanecer en la atmósfera entre 50 y 200 años por lo que el porcentaje de este, emitido por parte de las aeronaves es indistinguible del CO₂ emitido por parte de otras fuentes contaminantes. Los otros gases emitidos por las aeronaves tienen estancias mucho menores y se ubican en áreas cercanas a las rutas de vuelo.

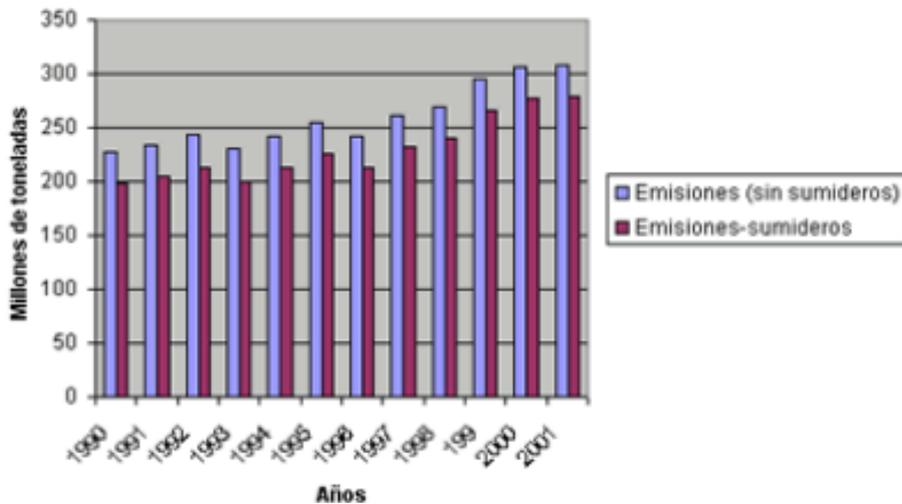


Fig. 5 Emisiones de CO₂ en España.

Las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en España entre 1990 y 2001, sin incluir los sumideros, han aumentado un 35,38%, pasando de 227 millones de toneladas en 1990 a 307,6 millones de toneladas en 2001.

¿DE DÓNDE PROVIENE EL CO₂?

- **Fuentes naturales de CO₂:** Respiración, descomposición de materia orgánica, incendios forestales naturales.
- **Fuentes antropogénicas de CO₂:** Quema de combustibles fósiles, cambios en uso de suelos (principalmente deforestación), quema de biomasa, manufactura de cemento.
- **Sumideros de CO₂:** Absorción por las aguas oceánicas, y organismos marinos y terrestres, especialmente bosques y fitoplancton.

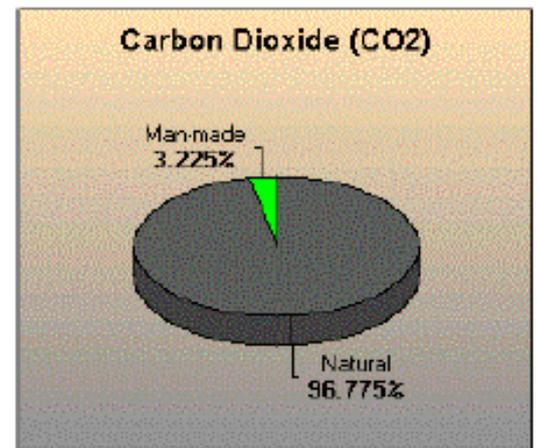


Fig. 6 Procedencia del CO₂.

El crecimiento de las emisiones de CO₂ se ha acelerado en un 2,19% por año en el periodo 1971-1990 y en un 2,29% por año en el periodo 1990-2007.

Además las emisiones de CO₂ de origen fósil se han incrementado en 3,9t al año por habitante en 1971 y en 4,4t al año por habitante en 2007.

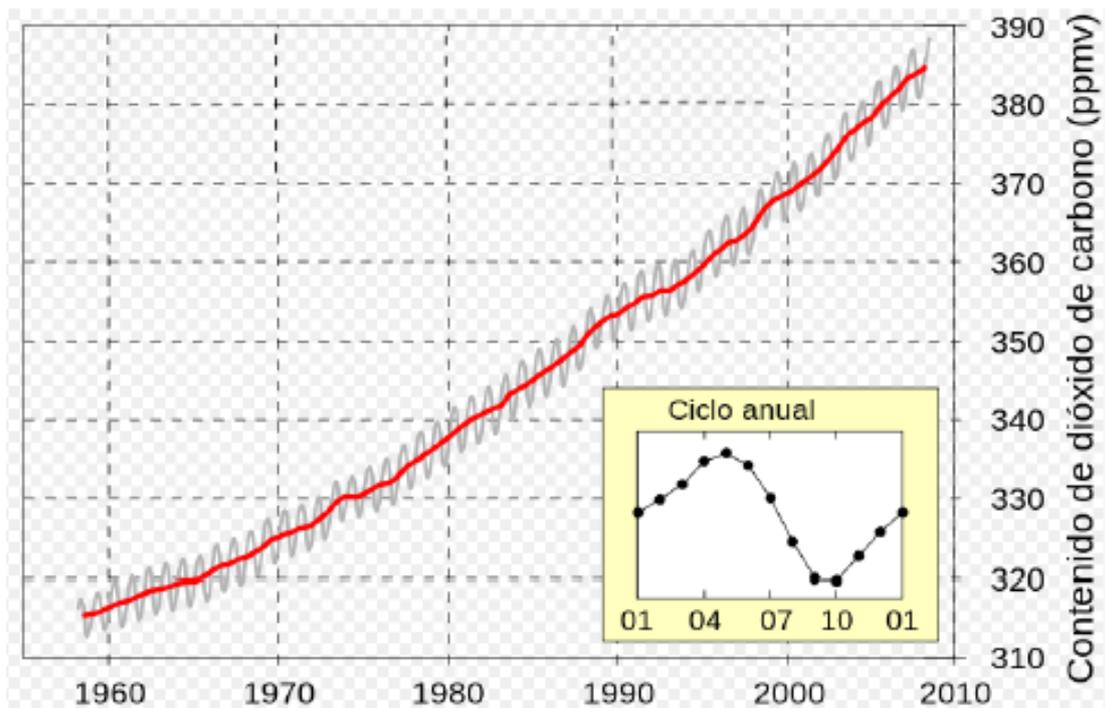


Fig. 7 Contenido atmosférico de CO₂.

No todos los combustibles emiten la misma cantidad de CO₂, se pueden diferenciar tres **tipos de combustible en aviación**:

- **GASOLINA DE AVIACIÓN:** El Avgas 100LL es una gasolina de alto octanaje diseñada específicamente para uso en motores de aviación alternativos. Sus especificaciones son muy estrictas debido a que tiene que soportar el amplio rango de temperaturas y presiones de funcionamiento que se dan en las aeronaves.

La combustión de 1 litro de Avgas 100LL genera 2,199Kg de CO₂.

- **JP-5:** Es un combustible derivado del queroseno. Su composición es una mezcla de distintos hidrocarburos, con alcanos, cicloalcanos e hidrocarburos aromáticos. Fue desarrollado en 1952 para los reactores embarcados en portaaviones, donde el riesgo de incendio era particularmente alto. El JP-5 se mantiene como el principal combustible para la aviación embarcada con motores de reacción.

La combustión de 1 litro de JP-5 de aviación genera 2,527Kg de CO₂.

- **QUEROSENO:** Obtenido por destilación del petróleo, se utiliza como combustible en los motores a reacción y de turbina de gas o bien se añade al gasóleo de automoción en las refinerías. Se utiliza también como disolvente y para calefacción doméstica, como dieléctrico en procesos de mecanizado por descargas eléctricas y, antiguamente, para iluminación.

La combustión de 1 litro de queroseno genera 2,580Kg de CO₂.



Estos datos provienen de la Administración de Información Energética de Estados Unidos (EIA).

Con estos datos podemos ver como los combustibles más pesados emiten más CO₂.

La fuente primaria del incremento de dióxido de carbono, es el uso de los combustibles fósil. El uso de tierras (para agricultura, ganadería, etc.) también contribuye a dicho aumento.

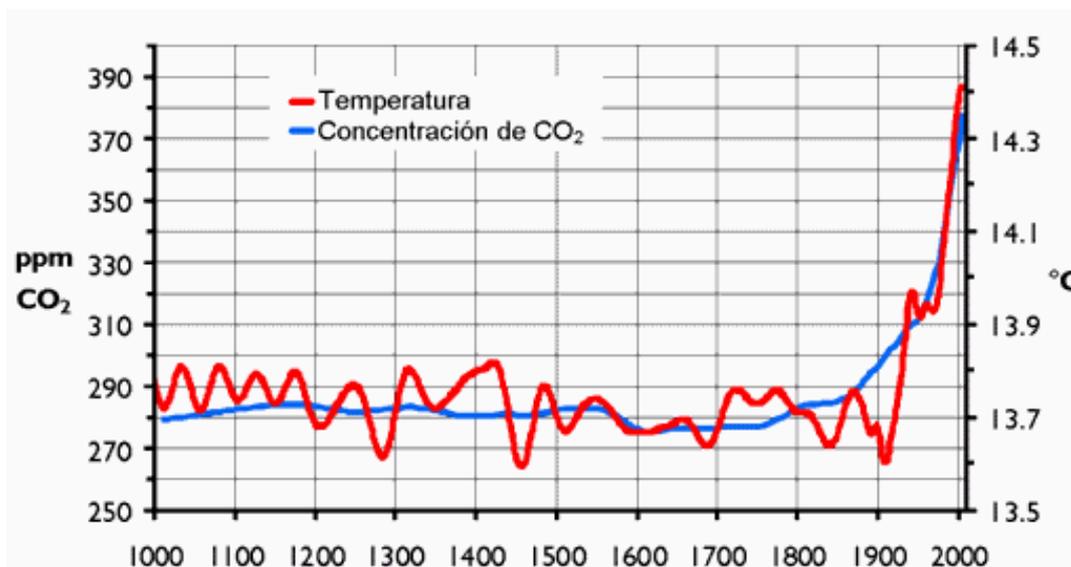


Fig. 8 Concentración de dióxido de carbono atmosférico anual.

Las emisiones de CO₂ en 1992 por parte de las aeronaves fueron de 140 millones de toneladas (0,14 Gt/año). Esto corresponde al 2% del total de emisiones de CO₂ en el ámbito mundial o al 13% del total de emisiones de los medios de transporte.

Las estimaciones sobre el incremento de emisiones de CO₂ por parte de la aviación para el año 2050 será de 0,23 hasta 1.45 Gt/año, es decir, se estima que se incremente entre 1,6 y 10 veces la cantidad emitida en 1992.

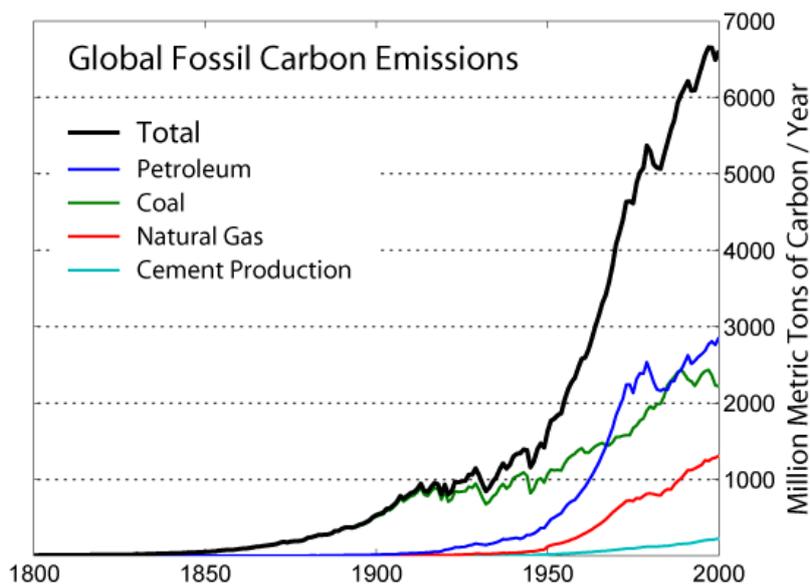


Fig. 9 Flujo de carbono hacia la atmósfera.



En un proceso de combustión típico la mayor parte del carbono es liberado como CO₂ de forma inmediata.

Una pequeña fracción es liberada en forma de gases diferentes del CO₂ (CH₄, CO, COVDMs) que en última instancia se oxidan a CO₂ en la atmósfera, por lo que se integran al cálculo general de las emisiones de CO₂.

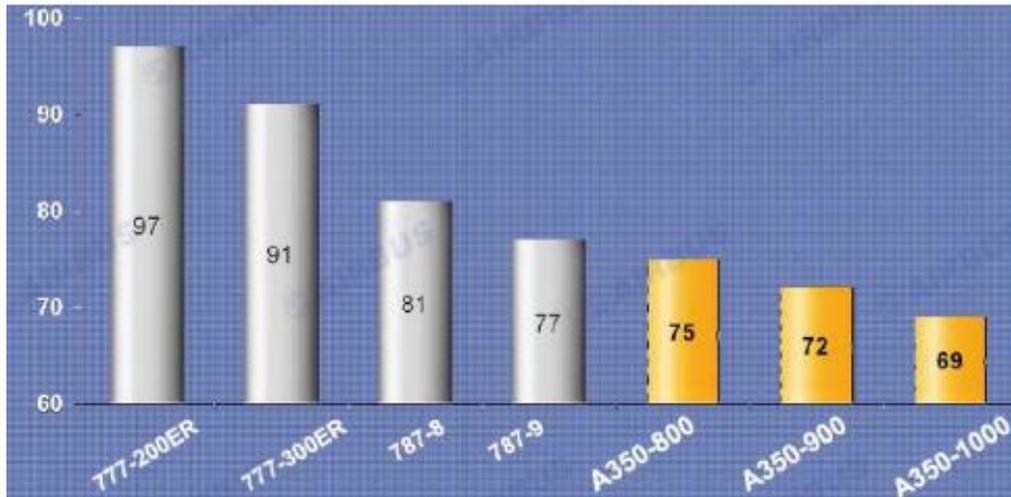


Fig. 10 Gramos de CO₂ emitidos por persona por km.

2.4.2. Vapor de agua

El principal gas invernadero es el vapor de agua (H₂O), responsable de dos terceras partes del efecto invernadero natural. En la atmósfera, las moléculas de agua atrapan el calor que irradia la Tierra y la irradian a su vez en todas las direcciones, calentando la superficie terrestre, antes de devolverlo de nuevo al espacio.

El vapor de agua en la atmósfera forma parte del ciclo hidrológico, un sistema cerrado de circulación de agua.



Fig. 11 Estelas de condensación formadas por el vapor de agua.

Las emisiones de vapor de agua de las aeronaves subsónicas se liberan en su mayoría en la troposfera donde se eliminan rápidamente por la precipitación dentro de un lapso de 1 ó 2 semanas. Una fracción pequeña de las emisiones de vapor de agua se libera en la estratósfera inferior donde puede acumularse hasta formar concentraciones más grandes.



2.4.3. Metano (CH₄)

El segundo gas que más contribuye al efecto invernadero acentuado es el metano (CH₄). Desde el principio de la Revolución Industrial, las concentraciones de metano en la atmósfera se han duplicado y han contribuido un 20% al incremento del efecto invernadero. En los países industrializados, el metano representa normalmente el 15% de las emisiones de los gases invernadero.

En la atmósfera, el metano retiene el calor y es 23 veces más efectivo que el CO₂. Su ciclo de vida es, sin embargo, más breve, entre 10 y 15 años.

La estimación de las emisiones de metano es mucho más complicada que las de CO₂.

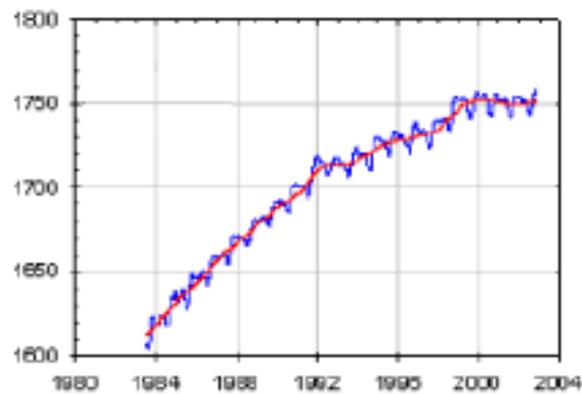


Fig. 12 Contenido atmosférico de Metano.

Las emisiones de metano dependen de la temperatura en la cámara de combustión.

¿DE DÓNDE PROVIENE EL CH₄?

- **Fuentes naturales de CH₄:** Descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas, sistemas digestivos de termitas y rumiantes.
- **Fuentes antropogénicas de CH₄:** Cultivos de arroz, quema de biomasa, quema de combustibles fósiles, basureros y aumento de rumiantes como fuente de carne.
- **Sumideros de CH₄:** Reacción con radicales hidroxilo en la troposfera y con el monóxido de carbono (CO) emitido por acción antropogénica.

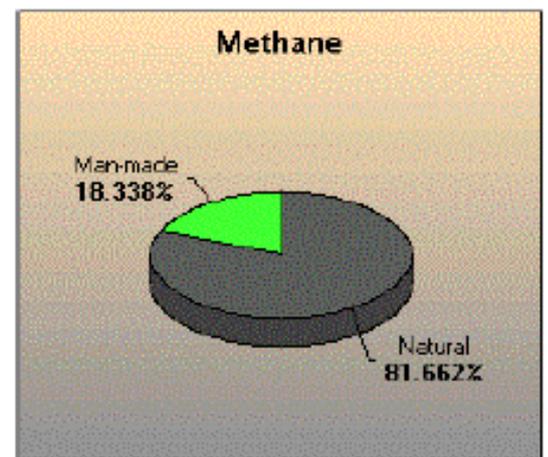


Fig 10 Procedencia del Metano



2.4.4. Óxidos Nitrosos (NO_x)

En los países industrializados, el N₂O representa aproximadamente el 6% de las emisiones de gases invernadero. Desde el inicio de la Revolución Industrial, las concentraciones de óxido nitroso en la atmósfera han aumentado un 16% aproximadamente y han contribuido entre un 4 y un 6% a acentuar el efecto invernadero.

Las concentraciones de óxido nitroso han aumentado desde valores pre-industriales de 270ppm a 319ppm en 2005. Más de un tercio de este aumento se debe a la actividad humana, principalmente la agricultura.

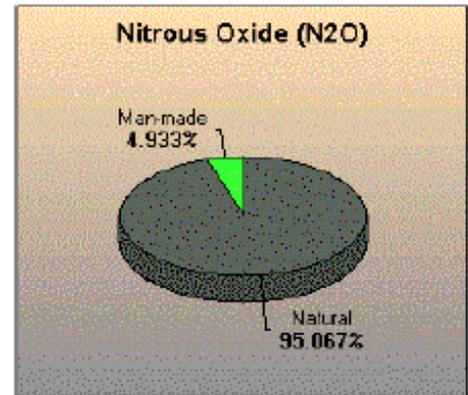


Fig. 13 Procedencia del Oxido Nitroso.

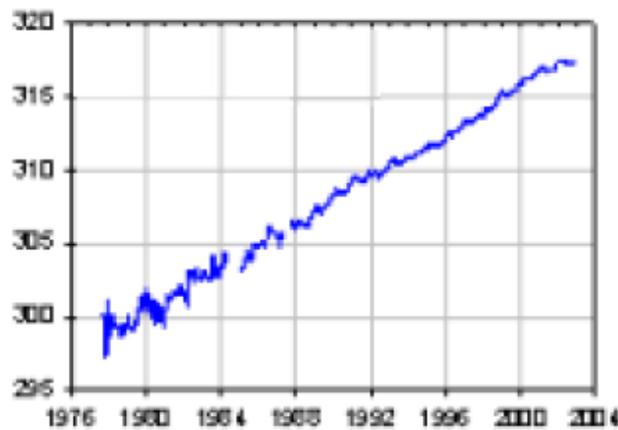


Fig. 14 Contenido atmosférico de NO_x.

Se emiten 5g de NO₂ de media por kg de combustible. (22g por kg de combustible en aeronaves supersónicas).

Es un gas de larga duración atmosférica (~100años).

Las emisiones de NO_x causan cambios en el metano y el ozono. El ozono es un gas de efecto invernadero. También protege la superficie de la Tierra de la perjudicial radiación ultravioleta, y es un contaminante común del aire.

El NO_x emitido por las aeronaves actúa en la química del ozono. Las aeronaves subsónicas vuelan en la troposfera superior y en la estratósfera inferior (a altitudes que varían entre 9 y 13 km), mientras que las aeronaves supersónicas vuelan varios kilómetros por encima (a altitudes de entre 17 y 20 km) en la estratósfera. Se considera que **el ozono de la troposfera superior y la estratósfera inferior aumente en respuesta al incremento de NO_x** y que el metano disminuya. A altitudes más elevadas, el aumento de NO_x da lugar a la disminución del ozono en la capa estratosférica. La permanencia de los precursores del ozono (NO_x) en estas regiones aumenta con la altitud y de ahí que las perturbaciones del ozono provocadas por las



aeronaves dependen de la altitud de la inyección de NO_x y varían de regionales en la tropósfera a globales en la estratósfera.

En resumen, en las zonas con mucho tráfico aéreo ha aumentado la concentración de ozono en la tropósfera superior creando una tendencia a calentar la superficie de la tierra.

No obstante, las emisiones de sulfuro y agua de las aeronaves en la estratósfera tienden a agotar el ozono, compensando parcialmente los aumentos del ozono inducidos por el NO_x . El grado en que ocurre esto no está todavía cuantificado.

Las emisiones NO_x de las aeronaves disminuyen la concentración del metano (CH_4), que es también un gas de efecto invernadero. Estas reducciones del metano tienden a enfriar la superficie de la Tierra. Se calcula que la concentración de metano en 1992 sea un 2% inferior al de una atmósfera sin aeronaves. Esta reducción de la concentración del metano inducida por las aeronaves es 2,5 veces inferior al aumento general observado desde los tiempos preindustriales. La incertidumbre de las fuentes y la velocidad de disminución del metano impiden verificar el impacto de la aviación sobre las concentraciones de metano mediante observaciones atmosféricas.

2.4.5. CO

El monóxido de carbono (CO) es un subproducto de la combustión incompleta y es esencialmente combustible parcialmente quemado. Si la mezcla aire / combustible no tiene suficiente oxígeno presente en la combustión, no se quema completamente. Cuando la combustión tiene lugar en un entorno sin la suficiente cantidad de oxígeno, entonces no se puede oxidar completamente los átomos de carbono y por lo tanto no se genera dióxido de carbono (CO_2) sino monóxido de carbono (CO).

Hay varias condiciones de funcionamiento normal del motor bajo las cuales esto ocurre. Por ejemplo, durante la operación en frío, el calentamiento, y el incremento de potencia. Es, por tanto, normal que se produzca una mayor concentración de monóxido de carbono bajo estas condiciones de funcionamiento. Otras causas de monóxido de carbono excesivo incluyen inyectores con fugas, alta presión de combustible, un control inadecuado del circuito cerrado (loop control).

Cuando el motor está caliente en reposo o en velocidad de crucero (sin acelerar), se produce muy poco monóxido de carbono porque hay suficiente oxígeno disponible durante la combustión para oxidar completamente los átomos de carbono. Esto se traduce en mayores niveles de dióxido de carbono (CO_2), el principal subproducto de una combustión eficiente.

El monóxido de carbono tiene como consecuencia la ralentización de la oxidación de los tejidos en la sangre, sustituyendo al oxígeno y agravando las insuficiencias cardíacas. Provoca problemas sensoriales a dosis muy elevadas.

Si su proporción es superior al 0.3% en volumen de aire es mortal en 30 minutos. La formación del CO es uno de los principales pasos en la reacción de combustión de un hidrocarburo.



2.4.6. Óxidos sulfúricos, Aerosoles de sulfato y hollín

Las concentraciones en masa de aerosoles provocadas por las aeronaves son pequeñas en relación con las causadas por fuentes situadas en la superficie.

Aun cuando la acumulación de aerosoles aumentara por el empleo de combustible de aviación, se prevé que en 2050 las concentraciones en masa de aerosoles causadas por las aeronaves seguirán siendo pequeñas en comparación con las fuentes de superficie.

El aumento del hollín tiende a calentar, mientras que el de los sulfatos tiende a enfriar la superficie de la tierra.

La fuerza radiante directa de los aerosoles de sulfatos y hollín de las aeronaves, es pequeña comparada a las de las otras emisiones de las aeronaves. Debido a que los aerosoles influyen en la formación de nubes.

La acumulación de aerosoles provocada por las aeronaves puede desempeñar un papel en el incremento de la formación de nubes y cambiar las propiedades radiantes de estas.

2.5. IMPACTO DE LA AVIACIÓN SUPERSÓNICA

La gran diferencia es que los vuelos supersónicos son a una altitud de 19km aproximadamente, es decir, unos 8km más que los vuelos subsónicos, por lo que emiten dióxido de carbono, vapor de agua, NO_x, SO_x y hollín en la estratósfera. Los NO_x, el vapor de agua y los SO_x de las emisiones de las aeronaves supersónicas contribuyen todos a los cambios en el ozono estratosférico. Se estima que la fuerza radiante de las aeronaves supersónicas será 5 veces mayor que la de las aeronaves subsónicas.

2.6. LA IMPORTANCIA DE EMITIR LOS GASES EN ALTURA

El gas de efecto invernadero más importante, el CO₂, se extiende por la atmósfera con tanta rapidez que realmente no importa dónde o a qué altitud sea emitido: El impacto es el mismo. No obstante, es posible que otras emisiones, tales como el NO_x y el vapor de agua, tengan un efecto más potente si se producen a mayor altitud. Los científicos expresan este incremento del efecto como factor multiplicador.

Teniendo en cuenta estas emisiones que no son de CO₂ y el multiplicador, el IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) calcula que **la aviación es responsable de aproximadamente el 3% del total del impacto climático debido a la actividad humana.**



2.7. COMO REDUCIR LAS EMISIONES

2.7.1. Aproximación con descenso continuo

La aproximación en descenso continuo (CDA – Continuous Descent Approach) consiste en que el avión realice los últimos kilómetros del vuelo con el motor al ralentí aprovechando el planeo, la aeronave adopta una configuración que le permite realizar el descenso de forma continua, sin modificar su estado durante la aproximación, variando los perfiles de velocidades y trayectoria en función de las características de la aeronave.

Uno de los principales problemas que plantea su aplicación en escenarios reales, es la compatibilidad con procedimientos convencionales o escalonados. Dado que no se puede actuar sobre la aeronave en descenso continuo una vez que se ha iniciado el procedimiento.

OBJETIVO:

- **Reducir** el consumo de combustible y en consecuencia **las emisiones de gases contaminantes** a la atmósfera.
- **Reducir el ruido.**
- **Reducir el tiempo** que la aeronave tarda en llegar al umbral de la pista, ya que la velocidad media con la que se realiza la aproximación es, normalmente, mayor.
-

En España comenzó a practicarse en 2009 y se introdujo como norma que cuando el avión esté a unos 180 km de la pista el piloto debe colocar los motores al ralentí y descender planeando. De esta forma continuará hasta que se encuentre a 11 kilómetros del destino, momento en el se volverá a meter potencia al aparato para controlar la maniobra de aterrizaje.

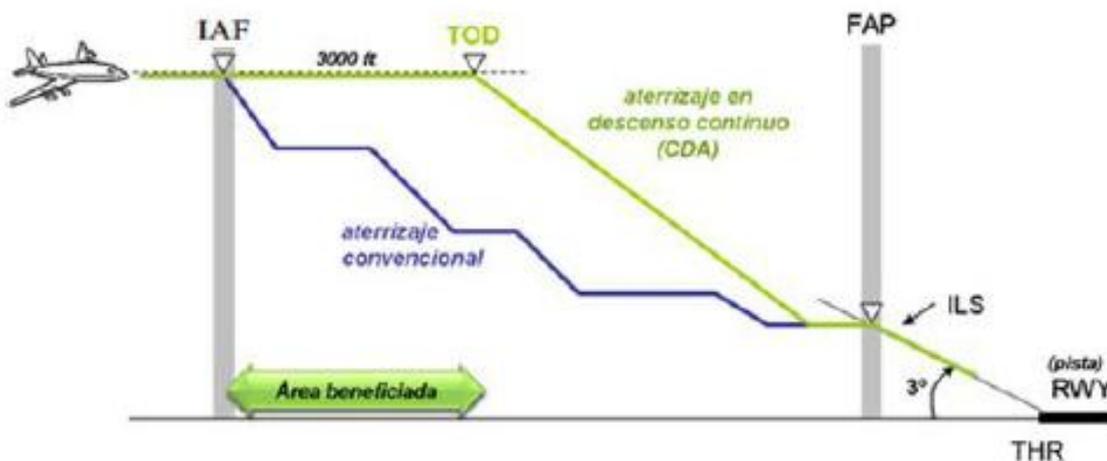


Fig. 15 Aproximación convencional y en descenso continuo.



En la *figura 15* se pueden identificar los puntos principales en una maniobra de aproximación CDA y en una maniobra de aproximación convencional.

- Punto de aproximación inicial ("*initial approach fix*", IAF), punto que marca el inicio de la maniobra de aproximación instrumental convencional en un aeropuerto.
- Punto de inicio del descenso continuo ("*top of descent*" TOD).
- Punto de inicio del tramo de aproximación final ("*final approach fix*" FAP), punto que marca el inicio del último tramo de la aproximación convencional, a partir del cual las aeronaves mantienen su configuración y descienden todas siguiendo la trayectoria que marca la senda de planeo.

Un factor a tener en cuenta es el **viento** antes de comenzar el descenso continuo.

- Si hay mucho viento de cara aumentara la deceleración del avión reduciendo la distancia necesaria para frenar el avión en comparación con una situación con viento normal.
- Si tenemos viento de cola el efecto es el opuesto reduciendo la deceleración y aumentando la distancia de frenado.

Es fundamental saber las condiciones del viento para poder ajustar la velocidad y el momento en el que comenzar el CDA. En caso de no tener una información certera sobre el viento hay que realizar un aterrizaje convencional.

RESULTADOS:

RUIDO

En las poblaciones situadas a 18km de los aeropuertos sobre las que sobrevuelan los aviones **desciende entre 4 y 6 dBA** según estudios de AENA. Esto es porque los aviones pasarían a mayor altura y además pasarían con los motores al ralentí.

EMISIONES

Tomando como ejemplo el aeropuerto de Newark (Nueva Jersey, EEUU) en el que en un día aterrizaron 697 vuelos usando el CDA.

Como podemos ver en la figura se ahorraron casi 40 toneladas de combustible y sobre **57Kg de combustible cada vuelo**

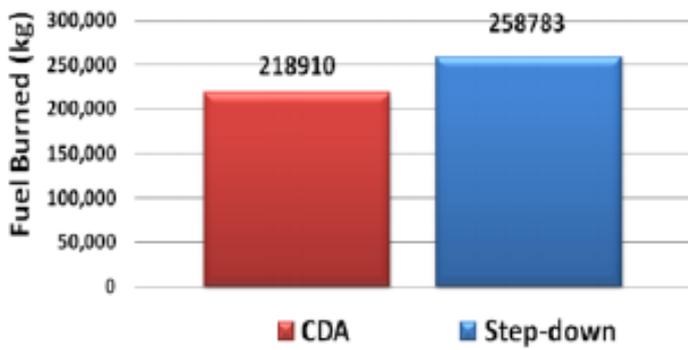


Table 1 Fuel savings statistics
Total 697 flights

Total	39873 kg
Per flight	57.2 kg

Fig. 16 Comparativa de consumo en el aeropuerto de Newark el 14/08/2005.

El ahorro depende mucho del tipo de avión pudiendo llegar a ser muy diferente. En grandes aeropuertos el uso del CDA puede provocar un atasco a la entrada de las pistas por lo que habría que dar prioridad a algunos aviones sobre otras, en la siguiente figura vemos una estimación del ahorro de combustible en función del avión, los aviones que más ahorran usando el CDA tendrán siempre prioridad sobre el resto buscando así el mayor ahorro posible.

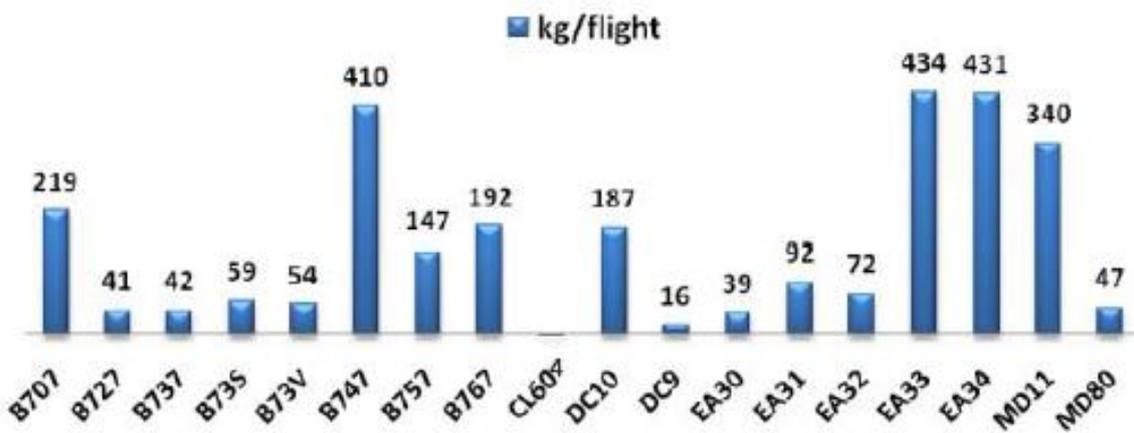


Fig. 17 Ahorro medio al usar el CDA en diferentes aviones.

TIEMPO

Al contrario de lo que se piensa, la aproximación en descenso continuo (CDA) ahorra tiempo de vuelo, esto es así porque la velocidad media con la que se realiza la aproximación es normalmente mayor además de que el avión vuela más tiempo en velocidad crucero.

En la siguiente figura podemos ver los ahorros de tiempo en función del tipo de avión en el aeropuerto de Louisville. Podemos ver como se ahorra una media de 2'42 minutos por vuelo.

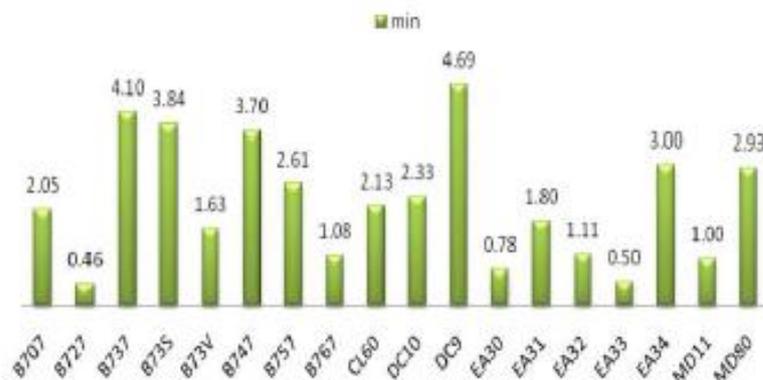


Table 2 Time savings statistics
Total 697 flights

Total	1049 min
Per flight	2.42 min/

Fig. 18 Tiempo ahorrado por vuelo.

El **principal problema** que presenta la implantación de este tipo de procedimientos es la imposibilidad de ajustar tiempos y velocidades para garantizar la separación mínima entre aeronaves manteniendo los niveles de seguridad, ya que, en la prestación de servicios de control de tráfico aéreo (ATC), el controlador no podrá actuar sobre la aeronave para modificar sus condiciones una vez iniciado el procedimiento.

Conocer los perfiles de descenso de los diferentes tipos de aeronaves es imprescindible para una implantación compatible con una capacidad del aeropuerto similar a la que se obtiene con procedimientos convencionales.

CONCLUSIONES

La aproximación en descenso continuo es un procedimiento que reduce considerablemente el impacto ambiental. Los resultados que se obtienen son los siguientes.

Reducción de consumo de combustible:

Si la media de ahorro de combustible es de 57.2Kg por vuelo.

Tomando como densidad del combustible Jet A-1 a 15°C = 0.804Kg/L

$$52 \text{ kg} \cdot \frac{1}{0.804 \text{ kg/L}} = 71.14 \text{ Litros}$$

Si cada litro de Jet A-1 emite 2.527 kg de CO₂ (según la Energy Information Association)

$$71.14 \text{ L} \cdot 2.527 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \sim 180 \text{ kg}$$

Cada vuelo emite aproximadamente 180kg de CO₂ menos a la atmosfera.



Si el 100% de los aeropuertos mundiales pudieran instaurar la aproximación en descenso continuo supondría la siguiente reducción de CO₂.

Si cada día vuelan 93000 aviones (según la universidad de ciencias aplicadas (ZHAW) de Zúrich).

$$93000 \cdot 180 \text{ kg} = 16740 \text{ Toneladas}$$

Se emitirán 16740 Toneladas menos de CO₂ al día.

Conseguir que el 100% de los aeropuertos usaran el CDA es algo prácticamente imposible debido a su complejidad en aeropuertos grandes y en horas diurnas pero este cálculo da una idea de lo importante que es introducir este procedimiento.

Reducción del impacto acústico de los aviones en el aterrizaje

En poblaciones cercanas a aeropuertos (~18km) se reduce el ruido de los aviones en 4-6dBA.

Reducción del tiempo de vuelo

Se ahorraría una media de **2,42minutos** por vuelo de media.

2.7.2. Aumento de la capacidad del factor de carga

Para optimizar al máximo el gasto de combustible hecho por las aerolíneas, estas tratan de llenar sus aviones lo máximo posible. Este factor de ocupación era en torno al 65% entre los años 1980 y 1995, algo más del 70% en torno al año 2000, y de casi el 80% en la actualidad. De lo que se deduce el aumento considerable que ha experimentado.

2.7.3. Mantenimiento

El mantenimiento de las aeronaves, es uno de los aspectos más importantes en el ahorro de combustible, y lo que más debe controlar una aerolínea son los aumentos de resistencia por deterioros, así como el consumo específico de sus motores.

El consumo específico se tiende a deteriorar con el paso del tiempo, debido a diversas causas entre las que se encuentran:

- A corto plazo: aumento de ruido entre álabes y sellados, debido a roces durante las condiciones de máximo esfuerzo.
- A largo plazo: erosión de superficies, pérdidas a través de los sellados en el interior de la zona caliente, y aumento de holguras en álabes de turbina de alta y de baja.



Las soluciones que se aplican son las siguientes:

Instrumentación

Los efectos sobre el consumo suelen ser por errores de indicación como la velocidad, la altitud de vuelo o el peso del combustible. Es debido a los márgenes de error y la mala calibración de los indicadores que se producen con el uso.

Modificaciones

Los aviones en servicio reciben una serie de modificaciones por razones de seguridad y eficiencia; y hay que tener en cuenta la repercusión sobre el consumo en la evaluación de cada modificación..

Existen diferentes técnicas probadas de mejorar el consumo a través de acciones de mantenimiento, y el factor determinante suele ser la limitación en alcance o carga de pago.

Restauración de actuaciones del motor

El motor se degrada por suciedad, erosión de álabes, pérdidas de sellado y aumento de tolerancias. Debido al incremento del consumo específico de un motor típico en función de las horas de servicio, estas operaciones son de vital grado. Se restaura mediante lavado de compresores en revisión general.

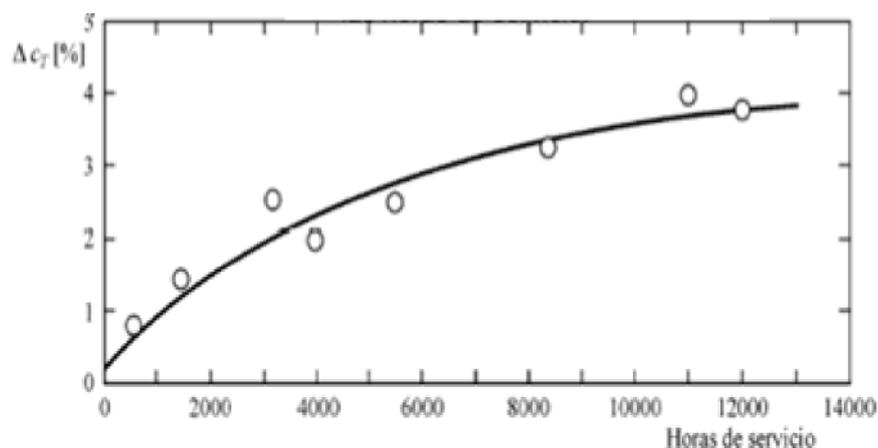


Fig. 19 Consumo específico del motor VS horas de servicio.



2.7.4. Reducción de la velocidad

La forma más clara de explicar el ahorro de combustible al reducir mínimamente la velocidad es con un ejemplo. Para un A-340-600 si disminuimos el número de Mach de 0,83 a 0,82 podemos ahorrar un 5% en fuel, aumentando 0,7 minutos por cada hora de vuelo. Esto es que para un vuelo de unos 6000 km. (distancia Madrid-Nueva York) tan solo se tardaría 4 minutos y unos segundos más que antes; con un ahorro enorme de combustible. En la gráfica adjunta podemos contrastar estos datos con las curvas; y puede servir a las aerolíneas para que el incremento de tiempo y de consumo sea el mínimo posible. Esto puede variar según el modelo de aeronave.

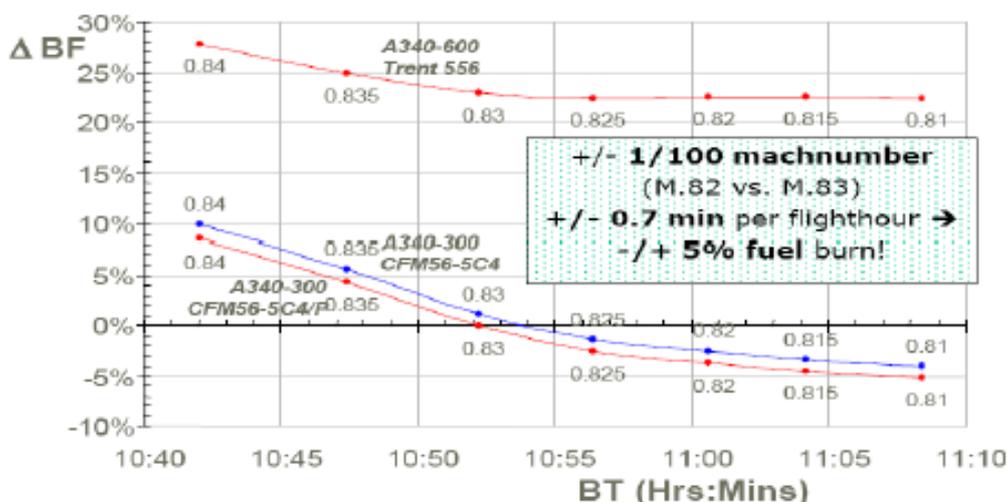


Fig. 20 Ahorro de combustible al disminuir el número de Mach en diversos modelos de A-340.

2.7.5. Cielo único europeo

El objetivo principal es acortar los vuelos, esto es posible porque estos no siguen la trayectoria más corta debido a la fragmentación del tráfico aéreo.

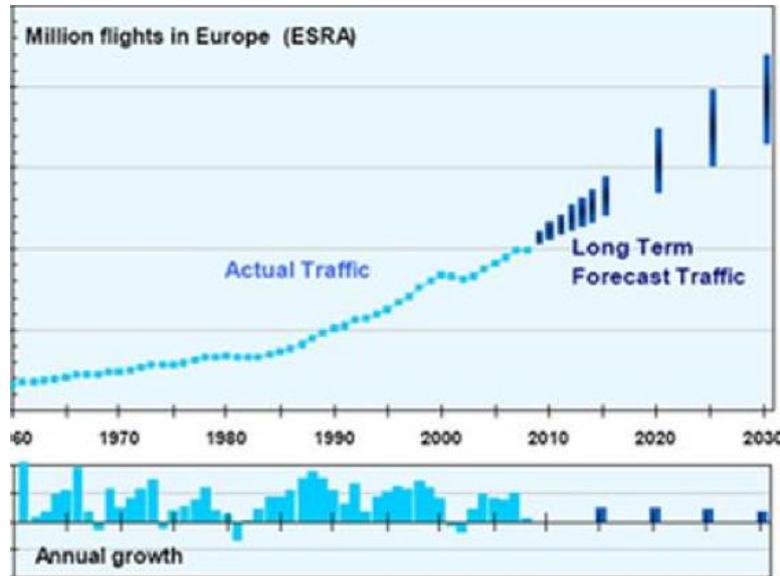
Las primeras aproximaciones dan un ahorro de aproximadamente 300kg de combustible por vuelo (estamos hablando de vuelos europeos de aproximadamente 1500km de ruta).

El Cielo único europeo es una iniciativa comunitaria, encuadrada dentro de los Tratados de la Unión Europea, que pretende reformar la arquitectura del sistema de gestión de tránsito aéreo europeo permitiendo el cumplimiento de las necesidades futuras de capacidad y de seguridad así como con los requisitos medioambientales cada vez más exigentes.

La administración del espacio aéreo dejaría de contar con fronteras nacionales, para pasar a utilizar los 'bloques funcionales de espacio aéreo', cuyos límites se diseñan con la **máxima eficiencia como objetivo**. Sin dejar nunca de lado la seguridad, el objetivo primario del Cielo Único Europeo es dar cabida al creciente tráfico aéreo en Europa, que ya no soporta el modelo de sectores aéreos actual, ya que a pesar de la actual crisis se sigue experimentando un crecimiento del tráfico aéreo.



Las rutas de los vuelos intraeuropeos son aproximadamente un 15 % menos eficientes que las rutas de los vuelos nacionales, un porcentaje muy grande.



Source: EUROK

Fig. 21 Crecimiento anual del tráfico aéreo.

El espacio aéreo europeo es de los más congestionados del mundo, y el sistema actual sufre de deficiencias, como la división en sectores siguiendo fronteras nacionales o los sectores para uso restringido a los militares incluso cuando podría no estar usándose.

UNA APROXIMACIÓN DE LAS POSIBLES REDUCCIONES EN LOS VUELOS APLICANDO LA INICIATIVA CIELO ÚNICO EUROPEO:

Vuelo desde Madrid	Ruta Directa (km)	Ruta Indirecta (km)	Tiempo Ruta Directa (horas)	Tiempo Ruta Indirecta (horas)	Reducción tiempo (minutos)	Reducción combustible (Kg)
Colonia	1418	1495	2,38	2,51	7,72	278
Bruselas	1312	1383	2,20	2,32	7,14	257
Copenhague	2056	2167	3,45	3,64	11,19	403
Varsovia	2271	2394	3,82	4,02	12,37	445
Roma	1332	1404	2,24	2,36	7,25	261
Berlín	1852	1952	3,11	3,28	10,08	363
París	1061	1118	1,78	1,88	5,78	208
Londres	1240	1307	2,08	2,20	6,75	243

Tabla 1 Resultados del Cielo Único Europeo (desde Aeropuerto Madrid).



CONCLUSIONES:

Teniendo en cuenta que puede haber unos 28000 vuelos diarios en Europa y considerando un **ahorro medio de 300 kilogramos de combustible por vuelo**, se ahorrarían unos **8.400.000 kilogramos de combustible diarios**.

Considerando que cada litro de combustible se traduce en aproximadamente 2.5 kg de CO₂, **se evitarían la emisión de aproximadamente 21 toneladas de CO₂ diarias**.

Unos números impresionantes y que urgen a hacer posible esta medida pese a los obstáculos políticos que conlleva.

2.7.6. Sistemas de derechos de emisiones (ETS)

Este sistema obliga a todas las aerolíneas que vuelen a cualquier aeropuerto europeo a que paguen una tasa en función de las emisiones de CO₂ de las mismas, con el objetivo de frenar el crecimiento de estas emisiones.

2.7.7. Biocombustibles

Los biocombustibles son combustibles líquidos hechos de productos agrícolas como cereales u oleaginosas. Son una alternativa muy atractiva al queroseno actualmente utilizado porque no requiere de modificaciones en los motores de los aviones y puede ser mezclado con el queroseno y usado con la actual generación de motores.

Toda sustancia susceptible de ser oxidada produce energía, las plantas utilizan energía solar para convertir CO₂ y agua en moléculas orgánicas constituidas por carbono e hidrógeno. Por lo tanto, son capaces de almacenar energía durante su crecimiento. Se puede utilizar esa energía acumulada en las plantas no sólo en la forma usual (soporte como alimento de la vida animal), sino para producir aún más energía. Una forma de utilizar esa energía acumulada en las plantas es la producción de biocombustibles: compuestos que pueden ser usados tanto en la producción de calor como en la alimentación de motores.



La IATA, organización que agrupa a las principales compañías aéreas del mundo, pretende que en 2015 los biocombustibles representen el 1% del total del combustible empleado y que en 2020 se llegue al 15%.

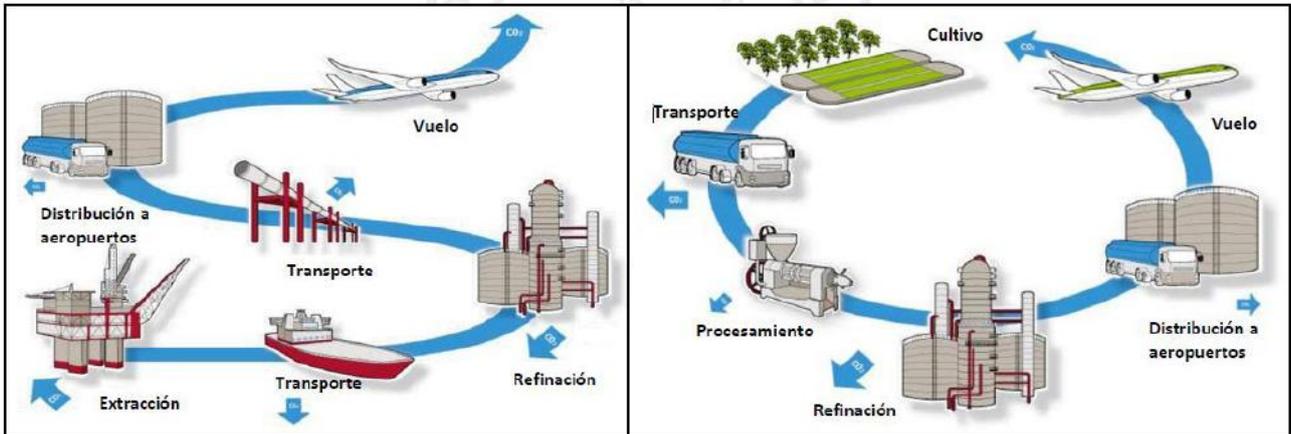


Fig. 22 Proceso de refinamiento de combustibles fósiles y de biocombustibles.

Todo nuevo combustible de aviación debe ser compatible con la infraestructura actual de la industria aeronáutica, es decir:

- Cumplir con requerimientos de desempeño.
- No requerir cambios en aviones y motores.
- No requerir cambios para su manejo y distribución.
- Capacidad de ser mezclados con otros combustibles de origen fósil.

HISTORIA:

En **Marzo de 2011**, el fabricante Airbus estableció un acuerdo de colaboración con la aerolínea **TAROM** para el desarrollo de biocombustibles a partir de camelina.

En **Marzo de 2012**, tres de las principales constructoras de aviones, **Airbus, Boeing y Embraer** firmaron un acuerdo de intenciones y colaboración para trabajar conjuntamente en el desarrollo de biocombustibles de aviación de acuerdo a precios asequibles para las compañías. Este acuerdo se llevó a cabo en el marco de la Cumbre de la aviación que se celebró en la ciudad de Ginebra

Este acuerdo entre los 3 grandes constructores, se engloba dentro del objetivo fijado por la Comisión Europea y que cada vez presiona más a las líneas aéreas para conseguir aumentar en un 4% la utilización de biocombustibles en los aviones para el año 2020.



En **Abril del 2012**, la compañía australiana **QANTAS**, realizó con un Airbus A-330 un vuelo entre las ciudades de Sydney y Adelaida usando un combustible al 50% mezcla de combustible normal de aviación y aceite re-utilizado.

En **Mayo de 2012**, la canadiense **Porter** realizó con un Bombardier Q400 un vuelo entre Toronto y Ottawa usando una mezcla al 50% entre biocombustible y combustible Jet A-1.

En **Agosto del 2012**, el fabricante Americano **BOEING** junto al fabricante aeronáutico y corporación de aviación comercial China (**COMAC**), abrieron un centro tecnológico de investigación, donde desarrollarán nuevas iniciativas para el refinado de aceite usado de cocina para conseguir un biocombustible de aviación sostenible que sea capaz de reducir el impacto de los gases invernadero.

Boeing ya ha realizado un vuelo transatlántico con biocombustibles.

En **España en Octubre del 2011**, Repsol e Iberia han tomado la iniciativa y en octubre impulsaron el primer vuelo en nuestro país con bioqueroseno. Un Airbus 320, de los que Iberia utiliza habitualmente, realizó el trayecto entre Madrid y Barcelona empleando como carburante una mezcla de 25% de biocombustible y 75% de queroseno tradicional.

El bioqueroseno empleado en este vuelo fue obtenido del aceite de la camelina, una planta oleaginosa no comestible, y Repsol se hizo cargo de la obtención, análisis de alto rendimiento, distribución y logística del combustible. Para realizar el vuelo con este biocombustible no hubo que realizar ninguna adaptación en los motores del avión y se estima que **supuso una reducción en las emisiones de 1.500 Kg. de CO₂**.

Boeing cree que la industria empleará un pequeño porcentaje de biocombustibles ya en 2015; Airbus ha declarado que habrá que esperar hasta 2025 para que el uso de biocombustibles llegue al 25% de los vuelos comerciales.

Refinamiento



Fig. 23 Proceso de refinado de Biocombustible.



El aceite extraído de estas plantas se procesa según un procedimiento de refinado conocido como hidrotratamiento, que consiste en someter esos aceites vegetales a una reacción química con hidrógeno, catalizador y alta temperatura, y que da lugar a unos hidrocarburos que tienen una composición química idéntica al queroseno de origen fósil. Gracias a ello pueden alimentar los motores sin necesidad de introducir modificaciones y su origen vegetal permite reducir el balance global de emisiones de CO₂.

Conversión directa de CO₂ en biocombustibles

Investigadores del Departamento de Ingeniería Química y Molecular de la Universidad de California, Los Ángeles, han conseguido generar mediante modificación genética una cianobacteria que produce isobutanol e isobutilaldehído a partir de CO₂.

El isobutanol presenta ciertas ventajas respecto del etanol, como su mayor contenido energético, su mayor compatibilidad con motores de combustión interna, su mayor facilidad para ser purificado de fermentos y que es menos corrosivo para ser transportado por tubería. Las productividades alcanzadas (3.000 µg/l·hora para isobutanol y 6.2 30 µg/l·hora para isobutilaldehído) son varios órdenes de magnitud superiores a procesos similares con cianobacterias para la producción de etanol.

En términos de producción por hectárea de suelo ocupado también supone una mejora de forma considerable respecto a la producción de etanol ligno-celulósico y derivado del maíz, incluso biodiésel procedente de micro algas. No obstante, los autores consideran que en un futuro esta relación de productividades podría empeorar debido a las expectativas de crecimiento en productividades en el proceso de fabricación del etanol ligno-celulósico y de maíz.

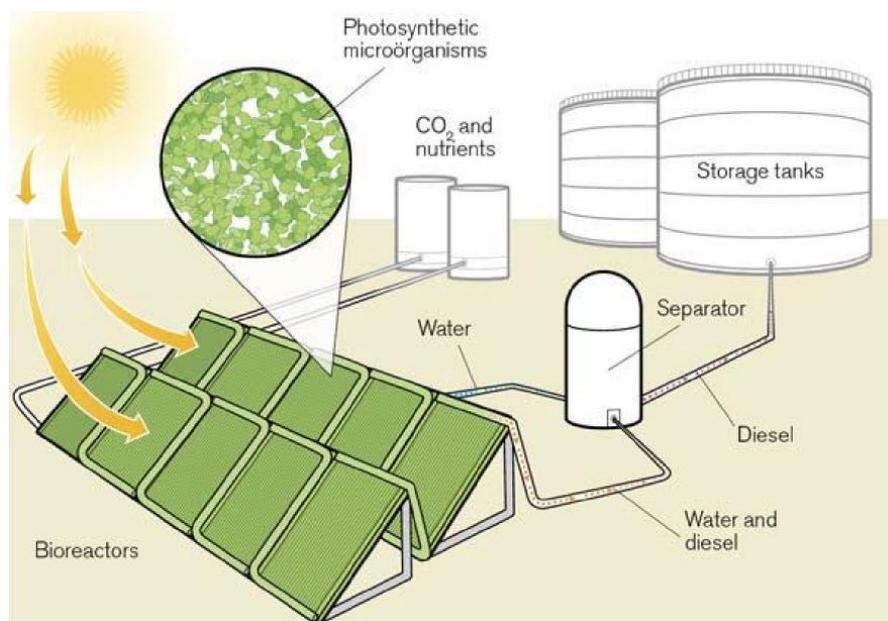


Fig. 24 Esquema de funcionamiento de una planta de producción de biocombustibles a través de energía solar y alimentación por CO₂.



Problema de los biocombustibles

Uno de los temas más delicados es el de la **competencia que suponen respecto al uso de la tierra y del agua**, recursos básicos para el consumo humano y animal, lo que provoca subidas de precios en los alimentos básicos y en los insumos agrarios, afectando a veces enormemente a los más pobres e incentivando la deforestación y desecación de terrenos vírgenes o bosques nativos.

El precio de los alimentos ha aumentado dramáticamente en los últimos años cerca del 83% en tres años, según el Banco Mundial de Alimentos. El papel de los biocombustibles es visto como significativo en este aumento por el Instituto Internacional de Investigación sobre Política Alimentaria y el Fondo Monetario Internacional, que han estimado que contribuyen al 30% de la reciente inflación en el precio de los alimentos. Informes del Banco Mundial de alimentos estiman que se trata de una contribución más alta, cerca del 65%.

Por otro lado, **la producción de biocombustibles ha llegado a degradar sumideros naturales de carbono** como humedales y selvas tropicales, dando como resultado enormes emisiones de carbono que tardarán décadas, si no siglos, en recuperarse. Además, las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por el uso masivo de fertilizantes nitrogenados son entre 3 y 5 veces mayores de lo que se ha tenido en cuenta hasta ahora.

COCLUSION

Los biocombustibles se plantean como una fuente de energía no solo renovable, si no también sostenible. Es renovable pues, por la forma de obtención, no se agota, como los combustibles fósiles. Sostenible porque se basa en la transformación de CO₂ en hidrocarburos, y aunque teóricamente todo el CO₂ producido por la quema de combustibles podría ser reciclado por las plantas y algas, se estima que se podría obtener un 'rendimiento de reciclaje' de un 84%.

Los biocombustibles permitirían diversificar las fuentes así como tener un suministro más constante en cantidad y precio. A su vez crearía trabajo no solo en los países petroleros, si no allí donde se pudiera producir el biocombustible. En el gráfico de abajo podemos ver las distintas áreas del mundo donde se podrían producir los biocombustibles de segunda generación así como el tipo de fuente de biocombustible.

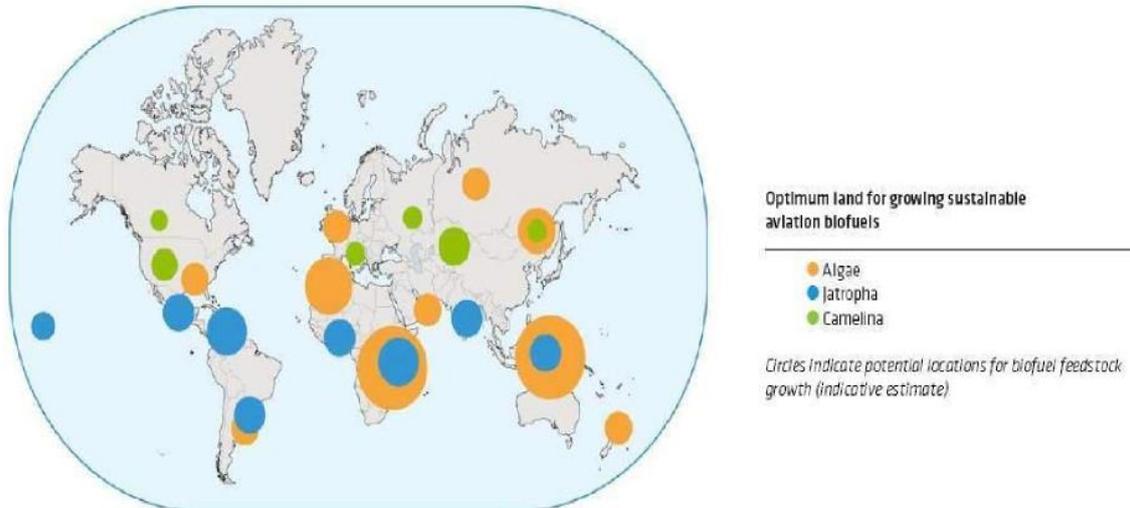


Fig. 25 Áreas del mundo de producción de biocombustibles de segunda generación.

En este campo no sólo trabajan grandes empresas, sino "startups" de todo el mundo (empresas de emprendimiento asociadas a la innovación).

Destaca la actividad de firmas como Solazyme, que cuenta con contratos con el ejército de Estados Unidos para desarrollar biocombustible a partir de algas que pudiera usar el mayor ejército del mundo.

Otra startup, PetroAlgae, ha firmado un contrato con la petrolera Indian Oil, para cosechar algas a gran escala, que puedan ser empleadas en la producción de un biocombustible que pueda ser usado en la aviación.

El llamado Big Oil, o principales compañías petrolíferas del mundo, no se desentiende de la investigación en biocombustibles a partir de algas, pese a que presionan en foros como la cumbre de Copenhague y su sucesora, la cumbre de Bonn, para limitar al máximo cualquier acuerdo que limite las emisiones de CO₂ más allá de sus intereses económicos.

British Petroleum y ExxonMobil son dos de las grandes petroleras que muestran mayor empuje en biocombustibles.

La producción masiva de combustible basado en algas para su uso masivo en industrias como la aeronáutica se encuentra todavía en fase embrionaria, según el parecer de varios especialistas en la industria, reunidos recientemente en San Diego, California.



2.7.8. Turbofan Engranado “Geared Turbofan” GTF

El turbofan asistido por marchas es una tecnología desarrollada por Pratt & Whitney (P&W), bautizado como PurePower PW1000G.

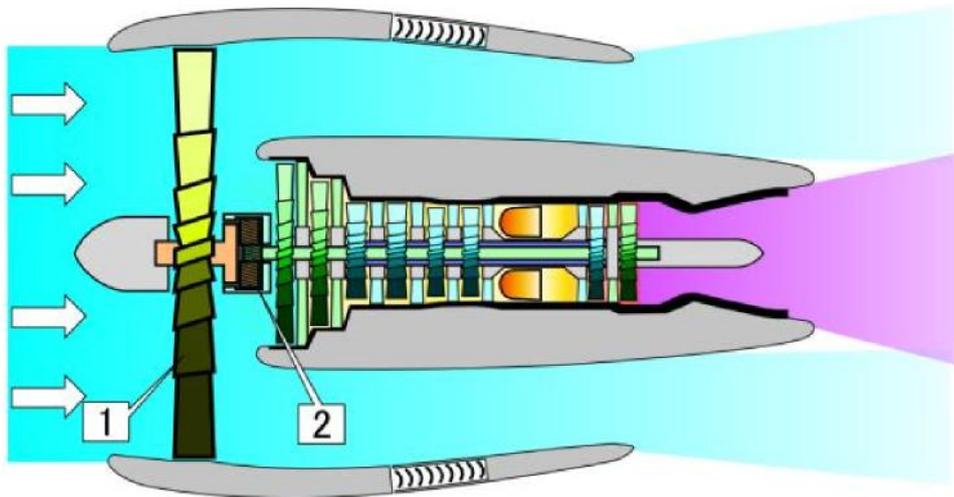


Fig. 26 Turbina y ventilación separadas.

A diferencia de un turbofan convencional este presenta un sistema de engranajes reductores que permiten variar la velocidad del ventilador, sin importar las velocidades del compresor de baja y la turbina de alta presión. De este modo se consigue una operación más eficiente del motor en función de las necesidades.

Las turbinas son más eficientes a velocidades elevadas; al contrario, los ventiladores son más eficientes a baja velocidad, lo que hace que los motores turbofan incorporen una dialéctica antagónica entre sus dos componentes principales. Los motores obligan a ambos a funcionar a la misma velocidad, con lo que no se obtiene el ahorro de combustible óptimo, ya que uno de los dos componentes irá forzado.

El sistema de engranajes reductores permite que una turbina funcione a altas velocidades mientras el ventilador lo hace a una velocidad inferior. Las pruebas realizadas por P&W en la primavera de 2009 surgieron según lo previsto (incluyendo 75 horas de vuelo en un Airbus A340 sin una sola incidencia).

Según P&W, el nuevo turbofan produce ahorros de combustible y emisiones, además de **reducir el ruido en un 50%**. The Economist cita a especialistas en la industria aeronáutica que creen que los turbofan con marchas pueden ahorrar un 20%-25% de combustible aunque la mayoría de informes dan un **ahorro del 15%**.

Este motor también tiene la ventaja de ser más resistente a la ingestión de pájaros que el turbofan clásico, dado que el fan gira más lentamente.



2.7.9. Open Rotor

También conocido como Propfan tiene su origen en el programa de eficiencia de energía de aeronaves de la NASA que se inició en 1975 con el fin de combatir el riesgo de aumento de costos de combustible reduciendo el consumo en diversas formas.

Es una modificación de un turbofan con el ventilador colocado fuera de la carcasa del motor, en el mismo eje que los álabes del compresor. Los motores open rotor son conocidos como motores UHB (ultra-high by-pass). El diseño está concebido para ofrecer las prestaciones y velocidad de un turbofan con la economía de funcionamiento de un turbohélice.

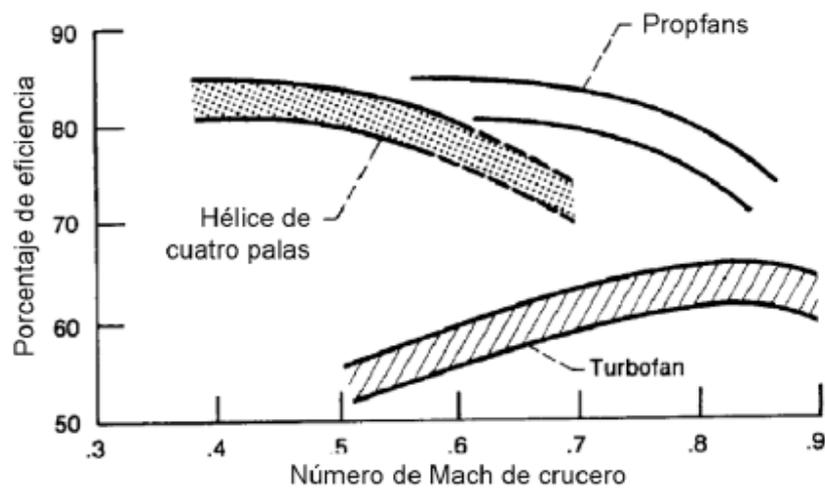


Fig. 27 Porcentaje de eficiencia en función del número de Mach.

El open rotor contra rotativo es la tecnología que ofrece un mayor potencial de ahorro de combustible pero presenta mayores desafíos técnicos como son: el diseño de componentes contra rotativos fiables, el diseño de hélices silenciosas, el diseño de un mecanismo de cambio de ángulo de hélices capaz de funcionar en la parte caliente del motor, la operación estable en modalidad de frenado, etc.

Una particularidad de este diseño es que las hélices están ubicadas en la parte trasera del motor. Esto no es común en motores con hélices e implica que no se pueda montar debajo del ala (debe ser instalado en la parte trasera del fuselaje) y que el mecanismo que regula el ángulo de las hélices debe operar en la parte caliente del motor.

Las palas son semi-arqueadas, y al igual que un ala en flecha, disminuyen la relación de alargamiento sin cambiar el área de la pala.



General Electric realizó pruebas con esta tecnología y llegó ya entonces a la conclusión de que su uso habría ahorrado un 30% de combustible; pero, en aquel momento, el motor era muy ruidoso.

Desventajas y Retos a superar

Esta tecnología presenta una gran disminución del consumo de combustible debido a la alta eficiencia en la propulsión. Sin embargo, esta tecnología aún muestra grandes retos que deben ser superados por los fabricantes para que puedan ser certificadas y aptas para su uso en la aviación civil. Los principales desafíos que presenta el Open Rotor son:

- Elevadas emisiones de ruido. Efectos ambientales y en cabina.
- Fuertes vibraciones que implican reforzar estructuras haciendo un avión más pesado.
- Instalación en la parte trasera del fuselaje del avión.
- Construcción de hélices seguras que no se desprendan.
- Diseño y refrigeración del “Mid-Frame”.
- Diseño de una caja de reducción fiable y eficiente.
- Diseño de una turbina contrarrotativa eficiente y estable.

Ruido

El principal problema que presenta el Open Rotor es la gran cantidad de ruido que produce. En un campo en la que la tendencia a seguir es hacia motores cada vez más silenciosos, se presenta como el mayor reto a superar por los fabricantes.

Definir perfectamente las fuentes de ruido es tremendamente complicado. Ajustándonos al alcance de este estudio, dividiremos el ruido producido por este tipo de configuración en dos:

- Ruido producido individualmente por las coronas.
- Ruido producido por la interacción del rotor con otros componentes.

El ruido producido individualmente por las coronas tiene origen en la gran carga aerodinámica de los álabes y se ve incrementado cuando los flujos se aproximan a velocidades transónicas.

En el segundo caso, la turbulencia del flujo provoca vibraciones y ruido al chocar con las hélices. La más importante es la creada por la cabeza de los álabes de la primera corona, que choca contra los álabes de la segunda corona y producen el ruido por interacción rotor-rotor. Éste efecto aumenta conforme aumenta la velocidad de giro de las hélices.

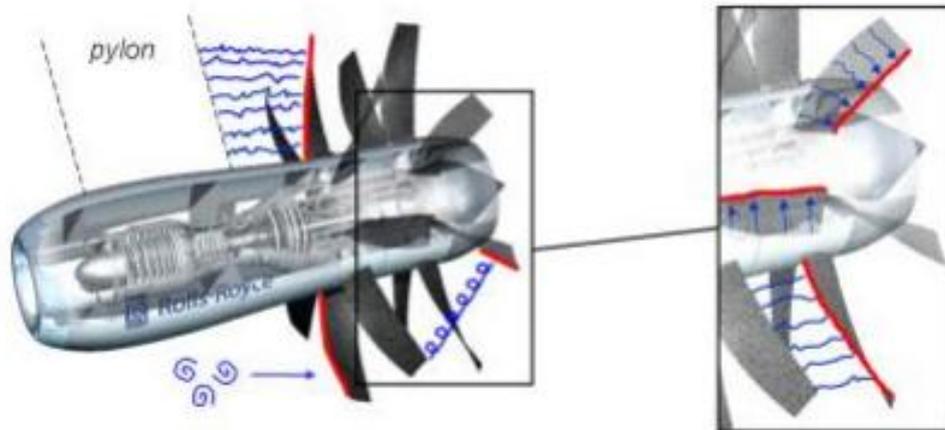


Fig. 30 Esquema que representa los distintos orígenes en la producción de ruido.

Durante crucero, el efecto dominante es el ruido producido individualmente por las coronas. Sin embargo, durante el despegue ambos son aproximadamente de la misma magnitud y el aumento de ambos está relacionado con la gran carga aerodinámica de los álabes.

Estudios dejan entrever que la solución para reducir la generación de ruido en crucero pasan por optimizar los perfiles aerodinámicos para flujos transónicos y así minimizar el ruido producido por las coronas. Para la reducción de ruido por interacción debe evitarse la igual en el número de álabes entre coronas. Otras mejoras pasarían por modificar la punta de álabes de la corona frontal, optimizar la separación entre hélices o reducir el radio de la corona trasera, minimizando así su interacción con la turbulencia.

FOD

Otro de los problemas a afrontar por esta tecnología es la seguridad frente a FOD (Foreign Object Damage). El hecho de que las hélices no estén encapsuladas como el caso de un turbofan hace que cualquier impacto (por ejemplo ingestión de ave) pueda producir desprendimiento de algún álabes y resultar peligroso impactando contra la cabina o contra cualquier parte del avión.



Caja de reducción planetaria diferencial:

En la siguiente figura vemos la configuración de la caja de reducción. Esta tiene tres ejes que pueden ser usados tanto como entrada y salida de potencia. A diferencia de las cajas de reducción planetarias convencionales, la DPGB no tiene una relación de velocidades fija sino una relación de torques fija y las velocidades de giro provienen de las cargas aplicadas en las salidas.

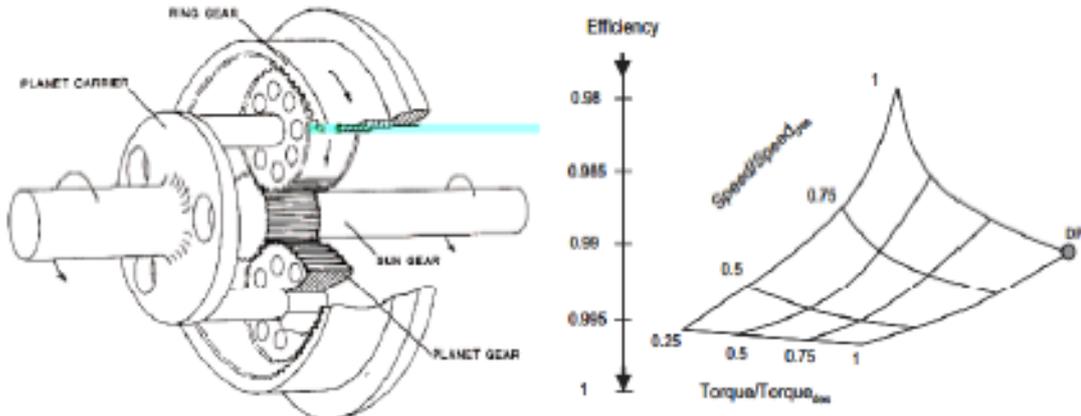


Fig. 31 Caja de reducción DPGB y su eficiencia.

CONCLUSIONES:

Las cifras de ahorro de combustible son impresionantes pero el problema del ruido es lo primero que los fabricantes tienen que solucionar.

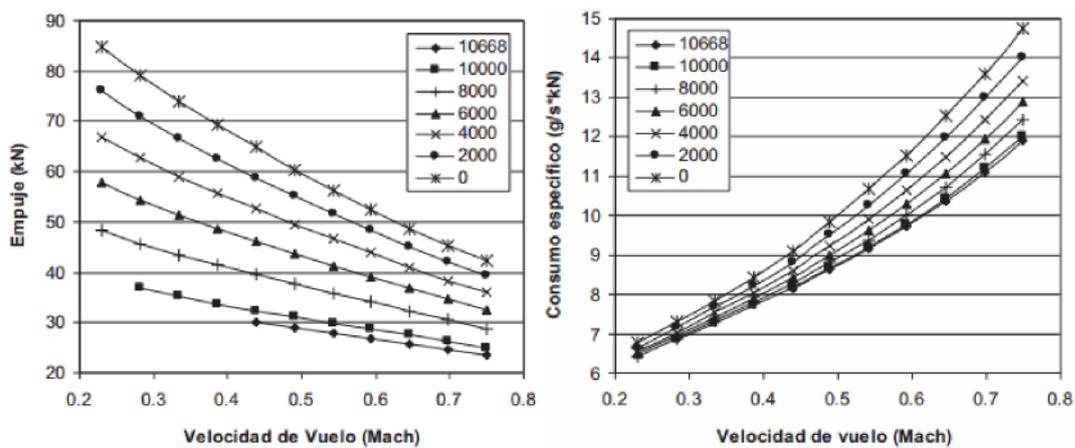


Fig. 32 Empuje producido y consumo a diferentes alturas.



Un avión propulsado con open rotor debe volar a una velocidad un tanto menor (Mach 0.75) a la de un turbofan (Mach 0.83) para aprovechar su potencial de ahorro de combustible.

	CFM56-5B	Geared Open Rotor	Ahorro (%)
Fin de subida	17.47	11.85	32.2
Despegue	11.2	6.68	40.4
Inicio de Crucero	16.22	11.36	30

Tabla 2 Comparación de consumo específico.

En esta tabla podemos ver la comparación de consumo específico (g/s*kN) entre un open rotor y un turbofan CFM 56-B que hoy en día tiene el 60% del mercado de los A318, A329, A320 y A321

Resultados de varias simulaciones muestran que un open rotor “silenciado” es menos eficiente que el open rotor normal pero sigue proporcionando un ahorro sustancial cercano al 21%.



2.7.10. Reducir el peso de los aviones

En la actualidad, el concepto clave en el diseño y fabricación de aviones es la reducción de peso. Gracias al **aluminio** y a su aleación con otro metal aún más ligero como el **magnesio** y a los **materiales compuestos como la fibra de carbono**, ha sido posible aumentar el tamaño de los aviones sin comprometer su peso. Dos buenos ejemplos son el Boeing 787 y el Airbus 380, aviones que cuentan con una elevada cantidad de piezas fabricadas con materiales compuestos.

Con este tipo de materiales ligeros y resistentes se consigue aumentar la resistencia estructural del avión al tiempo que se reduce su peso, lo que se traduce a nivel operativo en menor longitud de pista necesaria para despegar o aterrizar, menor consumo de combustible y menor ruido generado por sus motores.

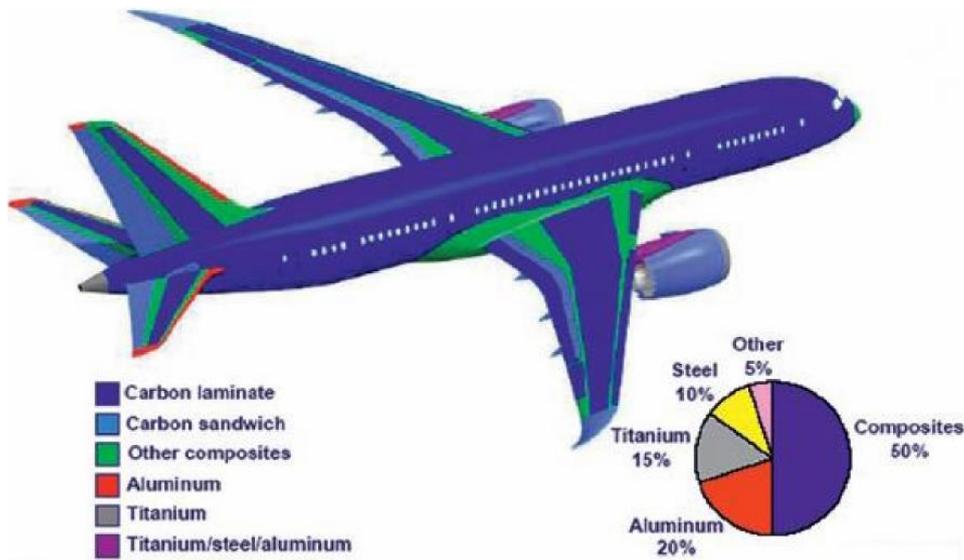


Fig. 33 Materiales del Boeing 787.

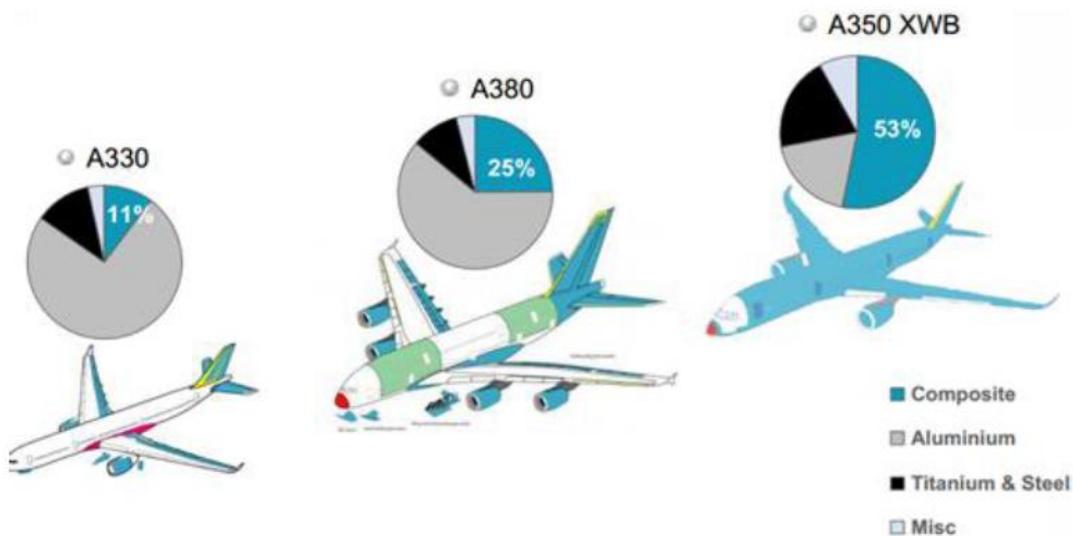


Fig. 34 Materiales en los distintos aviones de Airbus.



Aluminio

Una combinación de ligereza, resistencia y alta conductibilidad eléctrica y térmica, es la propiedad que convirtió al aluminio y sus aleaciones en un material clave para la construcción de aviones, automóviles, o motores de combustión interna, entre otras muchas aplicaciones.

La razón de esto es que un volumen dado de aluminio pesa menos que el mismo volumen de acero. Los únicos metales más ligeros son el litio, el berilio y el magnesio.

El aluminio sólo presenta un 63% de la conductividad eléctrica del cobre para alambres de un mismo grosor, pero pesa menos de la mitad. Esto significa, que un alambre de aluminio de conductividad comparable a uno de cobre es más grueso, pero sigue siendo más ligero. Todo esto tiene su importancia en el caso del transporte de electricidad de alta tensión (700.000 voltios o más) a larga distancia, para lo que, precisamente, se utilizan cables de aluminio.

Pese a todo esto **el uso de aleaciones de aluminio en el sector aeronáutico está en declive a favor de los materiales compuestos.**

Materiales compuestos en los aviones

Los materiales compuestos (composites) representan el futuro de las tecnologías utilizadas para fabricar estructuras de aviones, ya que ofrecen la posibilidad de construir aeronaves más ligeras y por tanto más eficaces y menos contaminantes.

Su utilización en las estructuras de aviones se está viendo también favorecida por el desarrollo de nuevas técnicas y procesos de fabricación que acercan sus costes de producción a los de las aleaciones de aluminio.

La industria de los materiales compuestos ha realizado durante los últimos años un gran esfuerzo dando como resultado un gran desarrollo de esta industria y un incremento constante en su capacidad productiva.

En resumen, la ventaja fundamental de los materiales compuestos es la reducción de peso: comparada con una pieza metálica idéntica, la de compuestos **puede pesar hasta un 30% menos**, y sin embargo aún tienen un gran potencial de desarrollo por delante.

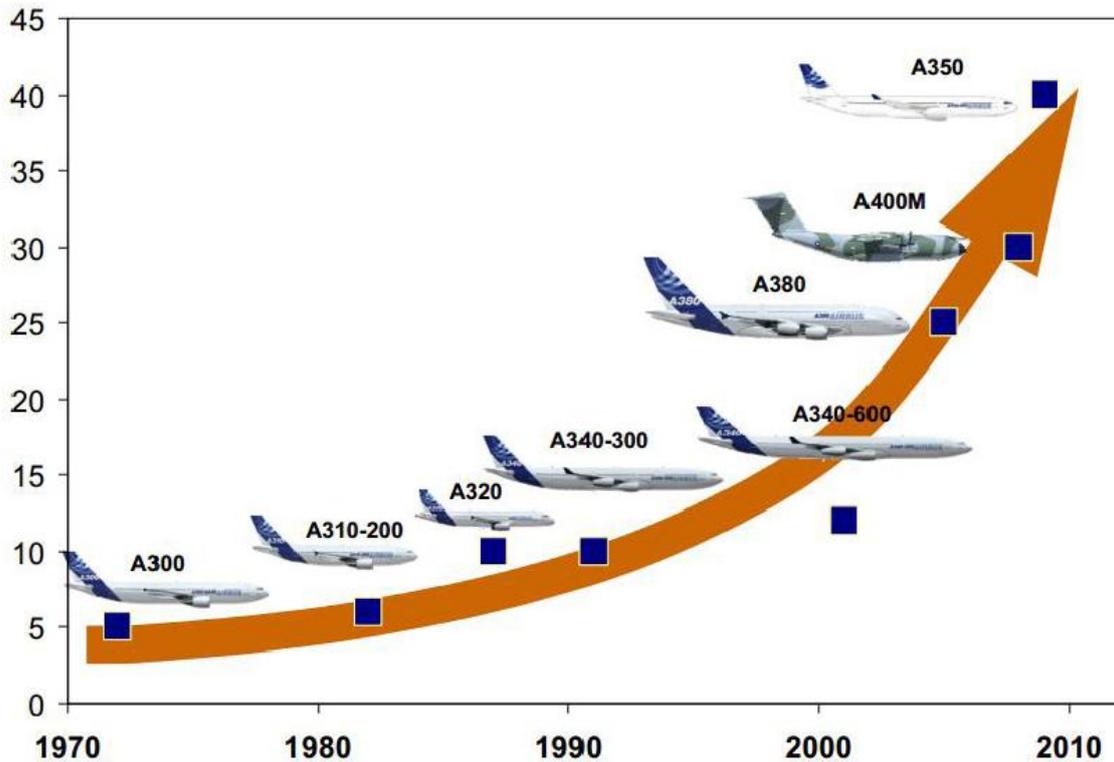


Fig. 35 Evolución de los materiales compuestos en aviones Airbus.

Materiales compuestos usados en el sector aeroespacial

- **Fibra de vidrio**

Es el material compuesto más común, la fabricada a partir de fibras de vidrio incrustadas en una matriz de resina

- **Fibra de carbono**

Este compuesto, hecho de átomos de carbono y una matriz de epoxi, tiene un gran valor debido a su peso ligero. La fibra de carbono también proporciona resistencia al calor y por lo tanto es útil para naves espaciales y aviones militares.

- **Fibra de boro**

Dado su gran diámetro (entre 100 y 140 micrómetros) la fibra de boro tiene una alta rigidez de flexión lo que limita su uso en aeronaves más complejas. Esta característica la distingue de fibra de carbono, cuyo diámetro más pequeño aporta una mayor flexibilidad.



- **Aleación de Aluminio-Titanio**

La aleación de aluminio-titanio difiere de un material compuesto, pero resulta igualmente valioso como un material de construcción aeroespacial.

- **Nanotubos de carbono**

Propiedades:

- Propiedades mecánicas similares a las de un diamante.
- Propiedades específicas de un orden de magnitud superiores que las de las fibras de grafito.
- Muy alta flexibilidad.
- Muy alta conductividad eléctrica y térmica.
- Elevada área superficial.

Propiedad	Nanotubos	Fibra de carbono	Acero
Resistencia a la tracción (Gpa)	11-63	3-7	0,4
Módulo Tracción (Gpa)	270-950	200-800	200
Resistencia Especifica	200-300	50	0,05
Modulo Especifico	250-500	500	26
Deformación ultima (%)	20-40	1-3	25

Tabla 3. Propiedades Nanotubos

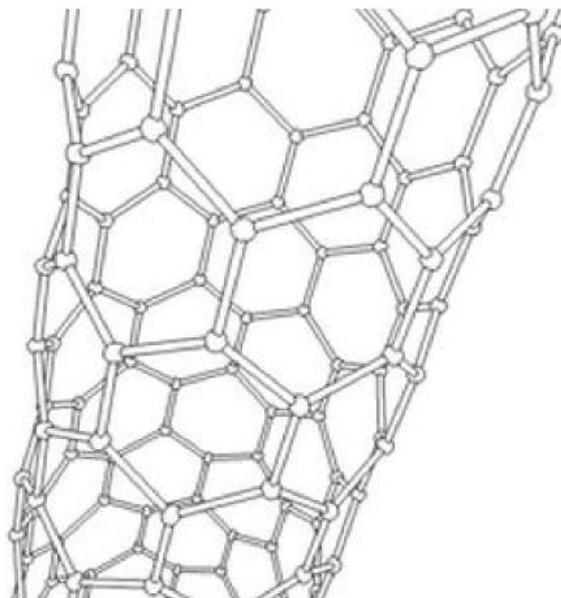


Fig. 36 Representación de un nanotubo de carbono.



Motores más ligeros

El objetivo es claro, diseñar el motor más eficiente que proporcione el mayor empuje con el mínimo consumo de combustible.

El aspecto clave es el desarrollo de materiales más resistentes a los esfuerzos y a la fatiga, más ligeros y que toleren altas temperaturas sin perder sus cualidades. Un motor turbofán como el desarrollado para el Airbus A380, absorbe durante su funcionamiento en vuelo, unas 1,2 toneladas de aire en cada segundo gracias al ventilador. El 87% de este aire es impulsado directamente hacia atrás, como lo haría una hélice, mientras que el 13% restante se comprime y se mezcla con el combustible para producir, tras el paso por varias etapas, la energía suficiente para mover a gran velocidad el fan.

Y cuanto mayor sea el diámetro del fan, mayor es la relación de compresión del aire y la temperatura en la cámara de combustión, por lo que aumenta la eficiencia del motor. El problema, es disponer de los materiales que resistan esos esfuerzos y temperaturas y que sean ligeros.

Los fans se fabrican de una **aleación de titanio**. Sus palas no son macizas, sino huecas y rellenas por un entramado de soportes a modo de panal de abeja. Son de una pieza, sin remaches ni soldaduras, y que estén unidas al disco central también sin soldaduras. La razón se debe a una propiedad física de ciertas aleaciones conocidas como superplásticas.

2.7.11. Uso de placas solares en los aviones

Aunque resulte sorprendente, uno de los lugares donde los paneles solares fotovoltaicos podrían tener un mayor rendimiento es en las alas y fuselaje de los grandes aviones comerciales, sin embargo, nunca han sido explotado para producir energía.

Se trata de un emplazamiento idóneo, que además, evita (una vez el avión ha iniciado su vuelo) algunos de los mayores inconvenientes de la tecnología fotovoltaica, como su baja producción durante días nublados.

Las últimas evoluciones realizadas en la tecnología fotovoltaica evita añadir un gran peso al fuselaje de los aviones, además de poder crear técnicas contra la congelación de las células fotovoltaicas usando, por ejemplo, parte del aire caliente que expulsan los motores del avión.

Los suizos Bertrand Piccard y Andre Borschberg fueron más allá en 2008, propulsando el propio avión con un motor eléctrico, capaz de navegar a 10.000 metros de altura y circunnavegar el globo.



Otro avión, en esta ocasión no tripulado, fue un avión solar de reconocimiento de 30 kilos, bautizado como Zephyr, quedando demostrado que un motor eléctrico con baterías recargadas mediante paneles solares permite volar a una altura de 20 metros prácticamente de manera indefinida.



Fig. 37 Avión eléctrico.

Los expertos auguran que los paneles solares de gran densidad y eficiencia llegarán pronto a la aviación comercial.

Hay quien presagia motores híbridos para la aviación, similares a los ya probados con éxito en la industria automovilística. La propulsión con combustible convencional o biocombustible sería necesaria cuando más potencia se requiera, es decir, durante el despegue y el aterrizaje, mientras la propulsión eléctrica se encargaría del resto del trayecto.

La búsqueda por aviones impulsados por electricidad se remota a 1979, cuando surgió el Solar Riser, la primera aeronave eléctrica tripulada. El Solar Riser utilizaba celdas fotovoltaicas para cargar una batería que daba poder a un motor eléctrico. Por desgracia, el sistema sólo daba energía para cinco minutos de vuelo. En la actualidad, los dos candidatos más fuertes que tenemos son el E430 y el SkySpark.

El E430 ganó recientemente el premio Lindbergh para aviones eléctricos. Tiene asientos para dos personas y vuela hasta 150 kilómetros por hora. Sin pasajeros, el avión tiene un peso de 255 kilogramos, incluyendo una batería de 83 kilos que requiere de tres a cuatro horas para cargarse. Por su parte, el SkySpark tiene el récord de velocidad al alcanzar los 250 kilómetros por hora el año pasado.

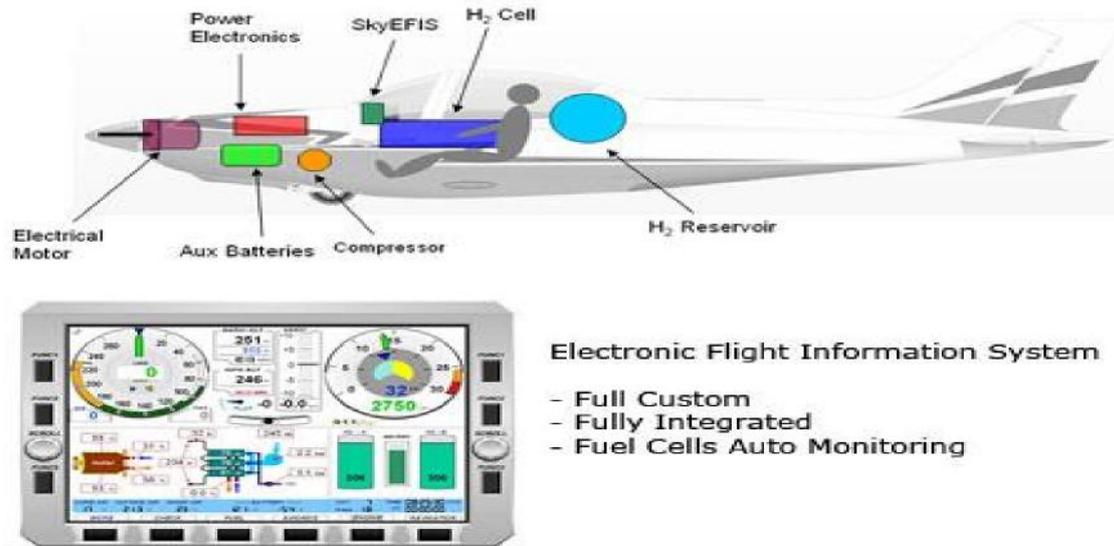


Fig. 38 Avión eléctrico.

No cabe duda que este tipo de aviones van mejorando, pero el camino hacia los vuelos comerciales impulsados por electricidad es muy largo. Buena parte del problema pasa por las baterías. Una pila para impulsar un avión es grande y pesada, lo que evita que los aviones tengan la ligereza que necesitan para permanecer en el aire. La alternativa es crear una aeronave híbrida con baterías solares. La energía solar es capaz de mantener al avión en vuelo durante el día, mientras que las baterías se encargan del trabajo por las noches.

Otra alternativa más es el uso de energía eólica, con una turbina que genere energía al reutilizar el viento que pasa cuando el avión toma altura.

La NASA ha estado trabajando también en usar energía vía inalámbrica, enviando microondas en el aire hacia un receptor en la aeronave. Este modelo ha demostrado ser funcional con aviones pequeños y no tripulados (los famosos drones), pero no se ha intentado en uno a gran escala. No cabe duda que el camino es largo, pero poco a poco.



2.7.12. Motores de hidrógeno

El hidrógeno cuya base de obtención es el agua, es muy abundante y puede ser utilizado como combustible tanto en países energéticamente pobres como en los ricos. El hidrógeno posee más potencia en relación energía/peso que cualquier otro combustible, y además produce **poca o ninguna contaminación**, ya que sólo libera vapor de agua en su combustión, como el hidrógeno se puede obtener de forma limpia extrayéndose del agua, al mismo tiempo es un combustible inagotable.

LAPCAT (Long-Term Advanced Propulsion Concepts and Technologies) es un proyecto, financiado por la Comisión Europea, que trata de desarrollar el avión hipersónico del futuro. Este avión viajaría a **velocidades superiores a Mach 5** con lo que un vuelo entre Bruselas (Bélgica) y Sidney (Australia) tendría una duración aproximada de 4 horas.

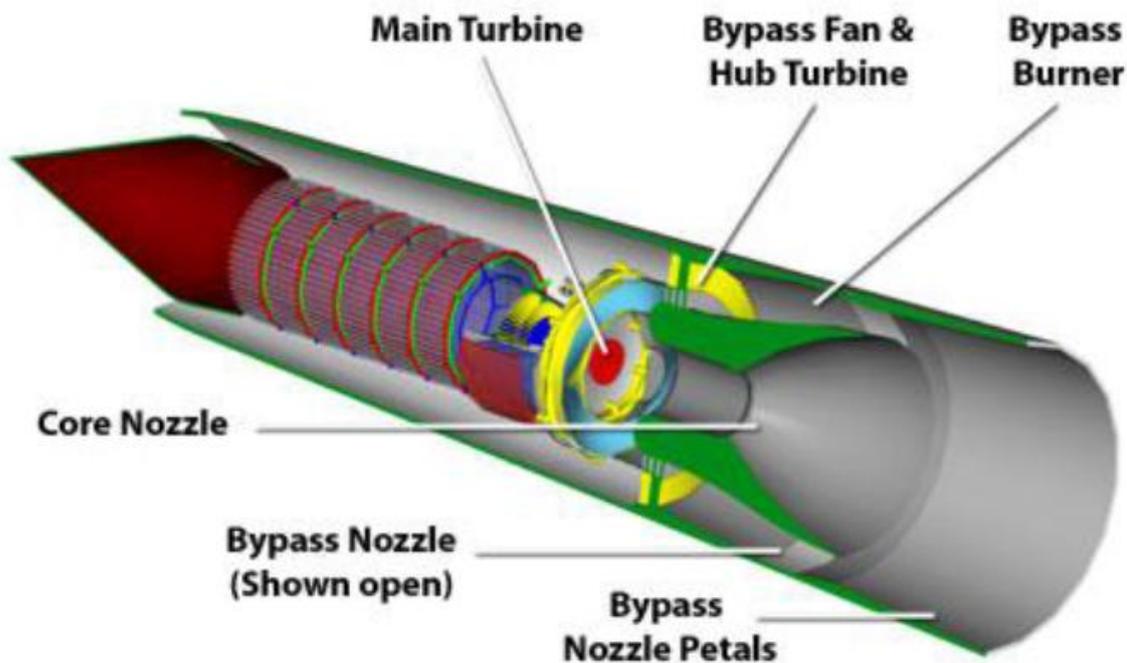


Fig. 39 Turbina de Hidrógeno.

El A2 se basa en un motor de hidrógeno capaz de alcanzar la velocidad de Mach 5 y un fuselaje diseñado para resistir esa velocidad y transportar 300 pasajeros.

Un kilo de hidrógeno produce casi tres veces más energía que el combustible convencional pero su fabricación por electrolisis resulta hoy más cara que la de los combustibles derivados del petróleo.



Fig. 40 Comparación entre el A-2 y el A-380.

En resumen el hidrógeno presenta las siguientes ventajas:

- El hidrógeno es un combustible extraído del agua, la cual es un recurso muy abundante e inagotable en el mundo.
- La combustión del hidrógeno con el aire es limpia ya que los productos de la combustión son en su mayoría vapores de agua, los cuales son productos no contaminantes.
- Los productos de la combustión del hidrógeno con aire son: vapor de agua y residuos insignificantes donde la máxima temperatura es limitada. Algunos óxidos de nitrógeno son creados a muy altas temperaturas de combustión (2000 °C), afortunadamente, la temperatura de auto ignición del hidrógeno es solamente de 585 °C. Una forma práctica para controlar la temperatura de combustión consiste en inducir agua a la mezcla hidrógeno - aire.
- Un motor de hidrógeno produce una emisión de NOx 200 veces menor que los motores actuales.

Pero también presentan las siguientes desventajas:

- Como no es un combustible primario entonces se incurre en un gasto para su obtención.
- Requiere de sistemas de almacenamiento costoso y aun poco desarrollado.
- Elevado gasto de energía en la licuefacción del hidrógeno.
- Elevado precio del hidrógeno puro.



2.7.13. Pilas de combustible

La pila de combustible es un dispositivo electroquímico de conversión de energía similar a una batería, pero se diferencia de esta última en que está diseñada para permitir el reabastecimiento continuo de los reactivos consumidos; es decir, produce electricidad de una fuente externa de combustible y de oxígeno.

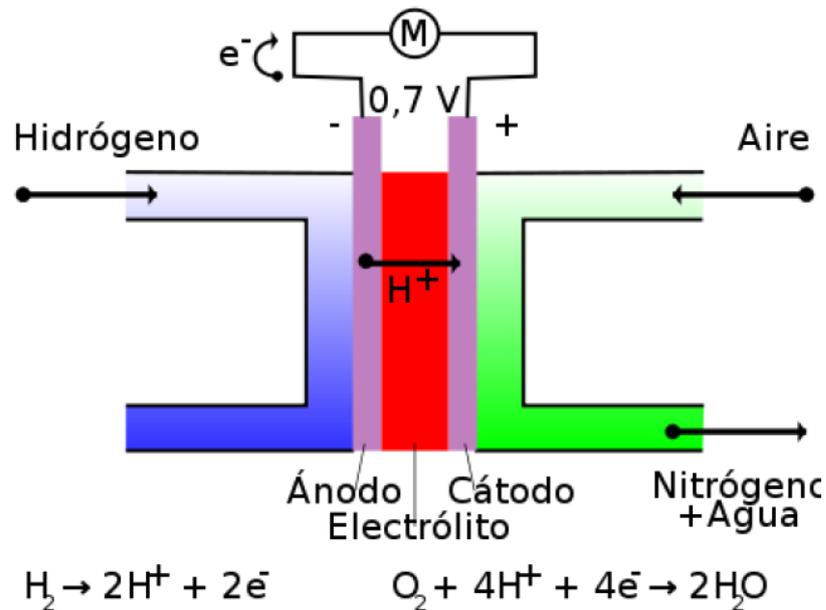


Fig. 41 Esquema de funcionamiento de una pila de combustible.

Airbus pretende que la electricidad de sus aviones proceda de una pila de combustible

Esta iniciativa pretende desahogar el sistema auxiliar de energía a bordo para que su producción se realice consumiendo Hidrógeno y no empleando la electricidad generada por el grupo auxiliar gracias la quema de combustible en sus turbinas.

Con la pila de combustible se abre la posibilidad de que el avión funcione en modo eléctrico en tierra ahorrando combustible, mejorando la calidad del aire en los aeropuertos y reduciendo el ruido considerablemente.

El primer prototipo instalado en un Airbus A320 ha arrojado una potencia máxima de 100 kW, lo que supondría contar con un generador lo suficientemente capaz para tareas en situaciones de emergencia o déficit de fluido eléctrico por fallo en el sistema. Una herramienta que por el momento actuaría en protocolos de emergencia o ante fallo del sistema primario, pero que descubre su verdadero objetivo al pretender convertirse en suministrador eléctrico primario en los próximos ensayos.



3. CONTAMINACIÓN ACÚSTICA

3.1. INTRODUCCIÓN

Los problemas de contaminación acústica provocados por el transporte aéreo han incrementado en las últimas décadas debido a la aproximación de las ciudades a los aeropuertos y al aumento del tráfico aéreo comercial y recreativo.

El ruido que producen los modernos aviones a reacción, dan lugar a numerosos problemas para el ser humano como es el caso de: neurosis, sorderas y otras alteraciones nocivas tanto para los seres humanos como para los animales. De manera que en las cercanías de los aeropuertos, la gente no quiere vivir, ni puede mantener ciertas explotaciones, como por ejemplo, los criaderos de animales.

Las molestias y perjuicios a la salud y la economía, derivados de la exposición al ruido de aviones, en las zonas vecinas a los aeropuertos, dependen de diversos factores como:

- El nivel de emisión sonora de las aeronaves.
- La característica en frecuencias de dicha emisión.
- La duración y frecuencia de la exposición.
- Las trayectorias de vuelo, el número de operaciones.
- Los procedimientos operacionales establecidos.
- Los tipos de aeronaves.
- La cantidad de pistas y su utilización.
- La época del año, las condiciones meteorológicas.
- La sensibilidad de la población.
- Las actividades que se realizan según la clasificación del uso de la tierra en el área de influencia del aeropuerto.



3.1.1. El acuerdo entre la OACI y CAEP de 02/2013

En febrero 2013 la OACI y el comité de protección medioambiental de la aviación (CAEP) llegaron a un acuerdo sobre el nivel de ruido para aviones los comerciales.

El nuevo estándar de ruido se presentará para su revisión final y aprobación por el Consejo de la OACI después de 2013 y entrará en vigor el día 31 diciembre de 2017.

La nueva norma acordada en materia de ruido será 7 EPNdB por debajo de la norma existente de la OACI y se aplicará a los nuevos diseños de aeronaves que entrarán en servicio a partir de 2017 y a las aeronaves de menor peso a partir de 2020. La EPNdB es una medida que refleja la molestia en los seres humanos generada por el ruido de las aeronaves, teniendo en cuenta el nivel de ruido percibido y la duración.

3.2. CERTIFICACIÓN

La finalidad de la prueba de ruido del motor consiste en predecir el comportamiento sonoro del avión terminado y en vuelo, de modo que pueda recibir la aprobación de modelo. También se desea introducir datos específicos de ruido del motor, como ruido producido por el chorro o por el ventilador, y también tonos puros, en un software de simulación de ruido.

Para la certificación se realizan evaluaciones en tres puntos críticos de la operación:

1. En el despegue.
2. En el aterrizaje.
3. En una línea de referencia de la pista.





Los niveles de ruido de cada avión individual están restringidos por los requisitos de certificación de ruido definidos en el Apartado 36 de las Regulaciones Federales de Aviación (FAR) y la Convención de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), Anexo 16.

3.3. FUENTES DEL RUIDO

Para la gran mayoría de los aviones comerciales, la fuente principal de ruido son los motores y el segundo es la corriente de aire en torno a la aeronave.

Ruido del motor en aviones propulsados por hélices:

En aviones propulsados por hélices, estas generan un mayor nivel de ruido que el motor, ya sea alternativo o turbohélice.

Factores que atenúan la emisión de ruido pero que afectan al rendimiento de la aeronave:

- La disposición de un mayor número de palas, lo que aumentaría el peso de la nave disminuyendo el rendimiento.
- Variar el diámetro de la hélice.
- Disminuir la velocidad en la punta de la pala.

Ruido del motor en turboreactores:

La causa principal del ruido emitido por un turboreactor es la mezcla turbulenta que se produce en el exterior de la tobera, de los gases de la combustión a elevada velocidad con el aire circundante.

La potencia sonora emitida por un chorro subsónico ($0,3 < M < 1$) es proporcional a la sexta u octava potencia de la velocidad, en el supuesto de un chorro supersónico, la potencia generada depende de la velocidad elevada a un exponente superior al caso subsónico.

El origen está situado en la parte posterior de los motores, a una distancia equivalente a dos-tres veces el diámetro de la tobera.



El ruido generado no contiene tonos notables, y su banda de frecuencias es bastante amplia:

- El ruido del **fan del motor** resulta de la superposición de ruido de gran ancho de banda (debido al chorro de aire) y ruido con armónicos.

El ruido de gran ancho de banda es debido a la capa límite de aire que rodea a cada una de las palas del compresor, y el flujo de aire que rodea a éstas.

Los armónicos son generados debido al carácter cíclico del movimiento de las aspas. La frecuencia más importante es la denominada fundamental, que es el número de tiempos de pala a la velocidad de rotación del compresor. Los armónicos son múltiplos de la frecuencia fundamental.

Cuando el motor está funcionando a gran potencia el flujo de aire alrededor de las palas puede ser supersónico, generando un ruido de zumbido.

- El ruido de **compresor** es del mismo tipo que el ruido debido a los gases de escape con la salvedad de que los armónicos son menos emergentes debido a un fenómeno de interacción.

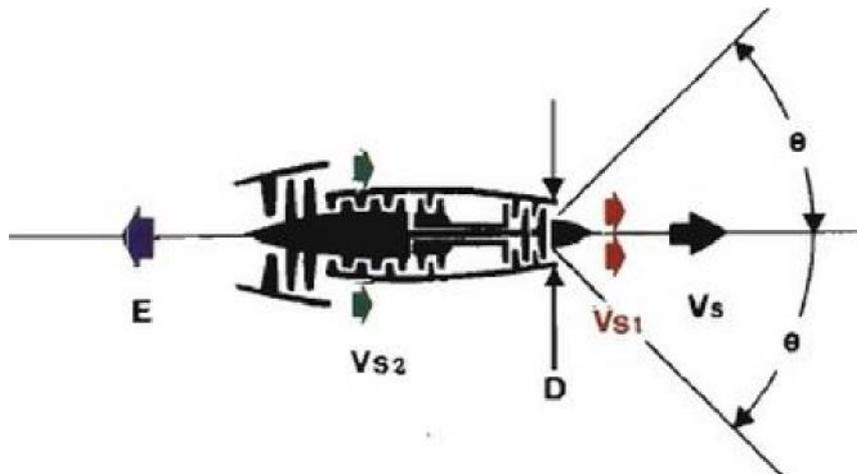


Fig. 42 Energía sonora de la salida de gases de escape de un turborreactor.

E=Empuje del motor

Vs=velocidad de salida de los gases

$\theta=45^\circ$

(Vs1=flujo primario ; Vs2=flujo secundario)

$$W_s \sim V_s^8 D^2$$



Ruido Aerodinámico:

El ruido del fuselaje, es el ruido de la aeronave si todos los motores estuvieran inoperativos. Está provocado por el flujo del aire alrededor del fuselaje y los principales orígenes del ruido son las discontinuidades en el fuselaje, el tren de aterrizaje, y los bordes de salida de las alas y flaps/slats.

Es más detectable este ruido en la fase de aterrizaje cuando los motores están al ralentí.

En los últimos 15 años se ha reducido el ruido aerodinámico entre un 1 y 3dB, correspondiente a una reducción entre el 5% y el 15% del empuje. Aunque estos nuevos diseños no tenían como fin reducir el ruido sino mas bien reducir la resistencia al aire y el consumo de combustible.

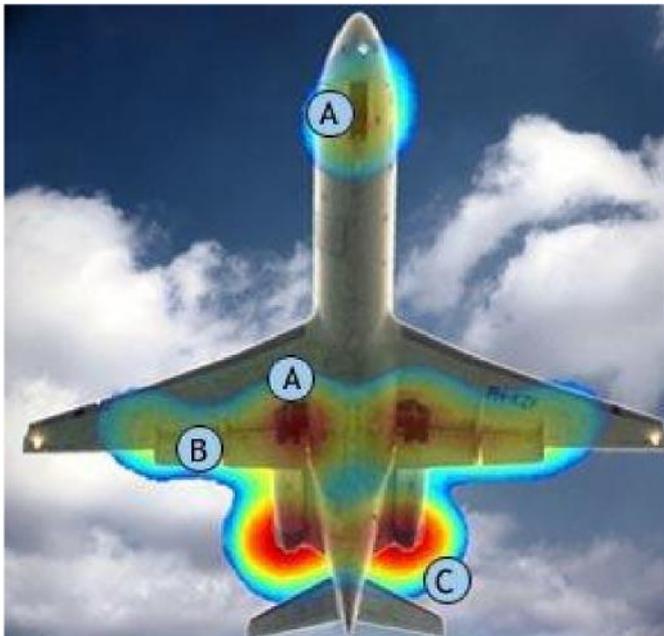


Fig. 43 Nivel de ruido de:

- a) Tren de aterrizaje
- b) Flaps
- c) Motores



Diagrama de directividad

Es un ensayo, cuyo conocimiento es importante para juzgar la emisión sonora de un avión en específico.

El diagrama de directividad es único para cada aeronave y se obtiene de un ensayo estático donde se miden los niveles de emisión sonora para cuatro regímenes de potencia, obteniéndose las curvas respectivas. El ensayo sirve de base para otro diagrama, el de NPD (Ruido-Potencia-Distancia) y para comparar la emisión del avión ensayado con otros de su tipo o diferentes. Normalmente, se distingue entre aviones de hélice y aviones a reacción, debido al distinto mecanismo de generación de ruido.

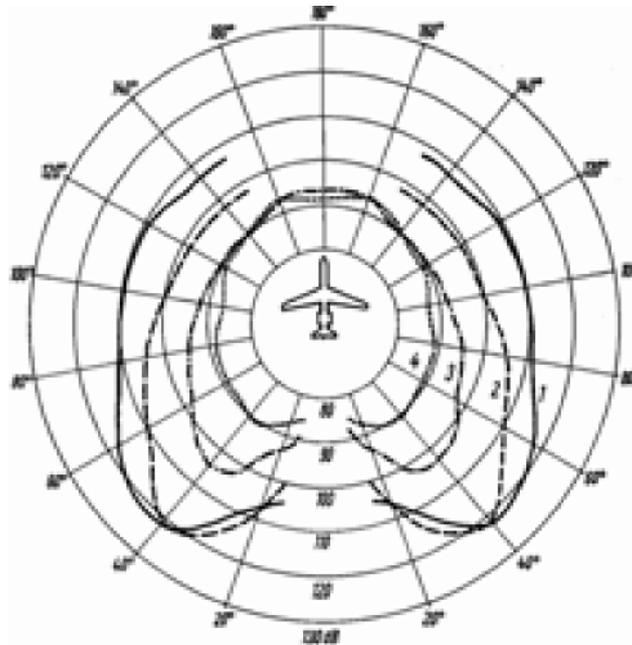


Fig. 44 Diagrama de directividad de un avión turbopropulsado.



3.4. FORMAS DE REDUCIR EL RUIDO

3.4.1. Aterrizaje en descenso continuo (CDA)

Se reduciría el ruido en poblaciones cercanas a aeropuertos (~18km) en **4-6dBA**

Este procedimiento esta explicado en el punto 2.7.1.

3.4.2. Reducción del empuje para disminuir el nivel de ruido:

Empuje nominal: $E \sim (V_s)^2$ $\frac{E'}{E} = \left(\frac{V_{s'}}{V_s}\right)^2$

Empuje reducido: $E' \sim (V_{s'})^2$

Energía sonora nominal: $W_s \sim (V_s)^8$ $\frac{W_{s'}}{W_s} = \left(\frac{V_{s'}}{V_s}\right)^8$

Energía sonora reducida: $W_{s'} \sim (V_{s'})^8$

Reducción del 15% del empuje $\frac{E'}{E} = 0.85$ $\frac{V_{s'}}{V_s} = \sqrt{0.85} = 0.92$

$\Delta dB = 10 \log 0.92^2$ $\Delta dB = -3 \text{ dB}$

Reducción del 30% del empuje $\frac{E'}{E} = 0.7$ $\frac{W_{s'}}{W_s} = \sqrt{0.7} = 0.84$

$\Delta dB = 10 \log 0.84^2$ $\Delta dB = -6 \text{ dB}$



3.4.3. Reducir el ruido de los gases de escape:

Para reducir el ruido emitido por los gases de escape hay que reducir su velocidad de salida y su turbulencia. Posibles soluciones:

- La **conversión del flujo** de los gases de salida de alta velocidad y pequeña masa, en un flujo de baja velocidad y gran masa, haciendo uso de aspiradores y difusores de los tipos convergente–divergente, de toberas de doble flujo, o de pantallas perpendiculares al chorro.
- La **variación de la forma geométrica de la tobera**, cuadrada, rectangular, circular, elíptica, entre otras, o disminuyendo su diámetro, sustituyendo la tobera única por una serie de toberas de diámetro menor, toberas múltiples. Se podría adoptar una configuración de mínimo ruido en despegues y aterrizajes.
- El aumento de espesor de la zona de la tobera donde se mezclan los gases de la combustión y el aire atmosférico, ya sea colocando dispositivos del tipo dentado, **toberas dentadas**, etc.

3.4.4. Envolver el motor

Pueden colocarse paneles anti acústicos que son normalmente de tres tipos

- Tipo reactivo

Reflejan la onda sonora hacia la fuente de emisión (el motor), la onda reflejada es más débil y la energía sonora es disminuida en su origen.

Son idóneos para amortiguar ruidos de baja frecuencia y en general están formados por paneles de nido de abeja en compartimentos con orificios grandes, la separación de los paneles envolventes es $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda del ruido incidente que procede del motor

- Tipo disipativo

Transforman la energía acústica en calor, el material absorbente es por lo general de fibra de vidrio.

- Tipo reactivo – disipativo

Tiene un comportamiento intermedio entre los dos citados anteriormente.



3.4.5. Tasas por ruido:

Actualmente 129 aeropuertos a nivel mundial aplican tasas por ruido, gravando según la clasificación acústica de la aeronave, el peso máximo del despegue y el horario de operación.

En España se aplican estas penalizaciones desde 2007 en los aeropuertos de Madrid-Barajas y Barcelona, en aplicación de la Ley de Calidad del Aire (Disposición final segunda).

Desde el punto de vista de las compañías aéreas, las tasas supone asumir una externalidad medioambiental con un consiguiente incremento de costes de operación, al que responden con diferentes estrategias, entre las que destaca la renovación de flotas con aviones menos ruidosos.

3.4.6. Otras medidas de menor impacto

En los aeropuertos:

- La vegetación es efectiva para reducir el ruido. Si hay posibilidad de poner césped entre la zona de rodaje y la zona a proteger este absorbería parcialmente las ondas sonoras ya que disminuye su efecto de reflexión.
- Las barreras hacen disminuir el nivel de ruido por efecto de la difracción, que es la desviación de los rayos sonoros de su propagación en línea recta con la consiguiente disminución de energía sonora. Para ruidos a frecuencias entre 1000 y 4000 Hz (que son las más sensibles al oído humano) las barreras por si solas pueden reducir como valor medio 7dB.



4. PROBLEMA DE ACTUALIDAD

Dado que cada año viajan en avión más de 2.000 millones de personas, «el transporte aéreo comercial es un medio potencial para propagar extensamente enfermedades transmisibles mediante el contacto con superficies contaminadas o la proximidad a personas infectadas», advierte la Organización Mundial de la Salud en su Guía para la Higiene y la Limpieza en la Aviación. Gran parte del riesgo procede de estar en estrecho contacto con una persona infectada. Pero las superficies contaminadas en los aviones también pueden propagar la enfermedad.

Hay aerolíneas que son reacias a revelar cuánto se limpian sus aviones. Habitualmente se hace una limpieza rápida entre un vuelo y el siguiente y una limpieza más a fondo por la noche o entre vuelos internacionales de larga distancia. Periódicamente los aviones se limpian de arriba a abajo en los periodos de trabajo de mantenimiento exhaustivo.

Estudios médicos han demostrado que las tasas de infección son mayores en las personas que viajan frecuentemente en avión: según un estudio, el aumento del riesgo de contraer un resfriado es del 20%. Gran parte del peligro procede de las personas sentadas una y dos filas adelante o atrás.

4.1. EL VIRUS DEL ÉBOLA EN LA AVIACIÓN COMERCIAL

Una vez metidos en situación, imaginamos que un pasajero que está en pleno proceso gripal, tose, estornuda, se levanta de su asiento y va al aseo, vuelve a su asiento, se desplaza en ese corto camino sujetándose a los cabezales de los asientos, ahora tose, vuelve a estornudar...

Pues bien, una semana después, todo aquel que se encontrara cerca de este pasajero durante el vuelo, expuesto a su tos y sus estornudos, probablemente desarrollará esa gripe, además, el virus de la gripe se transmite por el aire, por lo que y gracias a la ventilación de la cabina del avión, se habrá desplazado hasta los lugares más insospechados, contagiando así a buen número de las personas que viajaban en ese vuelo.



Por fortuna, el virus del ébola no se transmite por el aire (eso nos han contado los especialistas y eso creemos a pies juntillas), se transmite por fluidos corporales, además, para ser altamente contagioso, la persona infectada, debe encontrarse en un estado de desarrollo de la enfermedad muy avanzado, tal que seguramente no le permitiría trasladarse con normalidad a un aeropuerto y tomar un vuelo.

Este razonamiento, nos hace confiar y no temer un eventual contagio, pero no por difícil es imposible, más aún cuando las zonas geográficas de procedencia de los vuelos de riesgo no son las más desarrolladas del mundo y por tanto, controles, accesos y monitorización de pasajeros no nos pueden dar un índice de confianza absoluto, o dicho de otro modo, existe el riesgo, riesgo real de expansión del virus.

Es cierto que se dice que el contagio es a través de fluidos corporales, pero más que el contagio, la salida del virus de la persona infectada, a partir de ahí, el virus puede vivir varios días en esa gota de fluido corporal, depositada sobre la camisa de un pasajero que se encontraba en el radio de proyección de la persona infectada, a partir de ese momento, aquella persona que se roce o contacte con esa gota, simplemente se contaminará.

Las autoridades aeronáuticas, debidamente asesoradas y a través de sus órganos correspondientes, son las que deben pautar la aplicación de las medidas preventivas y correctoras para que la detección y aislamiento de personas afectadas por el ébola no suponga la paralización de los movimientos aéreos de un aeropuerto.



Fig. 45 Forma de detectar personas con posibles problemas médicos.

Es evidente que no se pueden aplicar las mismas normas en un vuelo comercial que en uno de traslado de afectados por el virus.

Las aeronaves que se utilizan en España para las aereo evacuaciones, no son de uso exclusivo para tales misiones, es más, el A310 perteneciente al 45º Grupo del Ejército del Aire, es más habitual viéndolo realizar traslados de personal perteneciente al Gobierno o Casa Real, del mismo modo, el C-130 Hércules del Ala 31 que se ha utilizado también para traslado de infectado por ébola, a diario se utiliza en otras misiones y no han quedado paralizados tras dichos traslados.

En estos casos se han protegido adecuadamente los interiores de las aeronaves para así evitar su contaminación y el personal participante ha aplicado procedimientos de descontaminación y control para evitar contagios accidentales. Procedimientos que han sido llevados con éxito pues ninguno se ha visto afectado por el virus del ébola.



Fig. 46 Airbus A310 medicalizado y con todas las medidas de seguridad pertinentes.

En nuestro país, a nivel de las fuerzas armadas, existen los medios para protegerse en estas situaciones, similares a las ocasionadas por ataques biológicos, se ponen en práctica los procedimientos y se forma al personal, a nivel civil, no es habitual tener esta preparación, formar personal hospitalario no es difícil pero no es cosa instantánea, prepararse para trabajar en condiciones tan duras no es asumible por cualquiera, requiere una preparación previa tanto física como psíquica. Un cursillo acelerado no es buena solución, casi con toda seguridad, seguirá siendo la Unidad Médica de Aeroevacuación del Ejército del Aire la que seguirá transportando hasta territorio nacional a los españoles contagiados, otra cosa será la protección del personal civil que traslade a los afectados hasta el centro hospitalario correspondiente y a su vez, la formación y protección del personal sanitario que los atienda.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha calificado el brote de ébola como emergencia de salud pública internacional, por tanto es algo que atañe a todos los países y que con los medios y recursos adecuados se puede frenar en los países de origen. Nadie quisiera ver en las noticias diarias que en tal vuelo procedente de tal país, se ha descubierto que han volado varios pasajeros infectados y que se ha propagado el virus de un modo descontrolado.



5. BIBLIOGRAFÍA

1. <http://www.hispaviacion.es/el-avion-diseno-fabricacion-y-mantenimiento-2/>
2. http://europa.eu/legislation_summaries/transport/air_transport/tr0026_es.htm
3. <http://www.hispaviacion.es/el-virus-del-ebola-en-la-aviacion-comercial/>
4. <http://www.obsa.org/default.aspx>
5. Climate of the 21st Century: Changes and Risks- Scientific Facts
6. European Biofuels Technology Platform 2010
7. www.pnas.com
8. Ministerio de Fomento de España www.fomento.gob.es
9. Valentín Sainz Diez, “El motor de reacción y sus sistemas auxiliares”2007
10. www.aena.es
11. A. Peters, “Assessment of Propfan Propulsion Systems for Reduced Environmental Impact”. MSc Thesis Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology 2010.
12. P. Lynwander, “Gear Drive Systems: Design and Application”, M. Dekker, 1983.
13. <http://www.boeing.com>
14. <http://www.gasturb.de/>
15. P. Bellocq, P. Pilidis, V. Sethi, “TERA: Una metodología multidisciplinar para evaluación, optimización y comparación de sistemas energéticos y de propulsión”, Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica, ISSN 2009
16. http://www.iata.org/whatwedo/economics/fuel_monitor/Pages/index.aspx
17. <http://www.airbus.com>
18. http://www.aiaa.org/content.cfm?pageid=32_2&lupubid=2
19. Ángel Arroyo Alcolea. “Economía del combustible”
20. <http://www.dancewithshadows.com/flights/save-aviation-fuel.asp>



21. <http://www.marketinggreen.wordpress.com/category/airlines/>
22. Estudio: Fuel Efficiency Board & Event Measurement System realizado por Juan Polyméris.
23. http://www.aviacionsostenible.es/Lists/Eventos/Attachments/38/Eficacia_y_Eficiencia_Resumen.pdf
24. Anexo 16 al convenio sobre aviación civil internacional
25. <http://www.eia.doe.gov/oiaf/forecasting.html>
26. European Biofuels Technology 2010
27. Informe Worldwide Market Forecast for Commercial Air Transport 2007-2026