



Monografía 14

Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por avión

*Energy consumption and emissions associated with
transportation by aeroplane*

Grupo de investigación en consumo energético del transporte
aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid

*Monografías **EnerTrans**/14 - **EnerTrans** Project Documents/14*

Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por avión

Energy consumption and emissions associated with transportation by aeroplane

Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid

<http://www.enertrans.es>

ÍNDICE

ÍNDICE.....	3
1. LA GESTIÓN DE LA ENERGÍA EN EL TRANSPORTE AÉREO	5
2. LOS FUNDAMENTOS DEL VUELO	6
2.1. Breve historia de la aviación	6
2.2. Terminología del ala.....	9
2.2.1 Elementos del perfil	9
2.2.2 Elementos del ala	9
2.3. Principios del vuelo	10
2.3.1 Teorema de Bernoulli	10
2.3.2 Efecto Venturi	12
2.3.3 Origen de las fuerzas aerodinámicas.....	13
2.4. Mandos de vuelo y dispositivos hipersustentadores.....	19
3. SISTEMAS DE PROPULSIÓN Y SISTEMAS DE LAS AERONAVES EN LA AVIACIÓN COMERCIAL	22
3.1. Sistemas de propulsión	22
3.1.1 Introducción: motores de aviación	22
3.1.2 Motores a reacción	22
3.1.3 Clasificación de los motores a reacción: estado-reactores, pulso-reactores y turbo-reactores	24
3.2. Sistemas de las aeronaves	35
3.3. Combustibles y lubricantes	39
3.4. La combinación motor-avión	41
4. VUELO AUTOMÁTICO Y SISTEMAS DE GESTIÓN Y CONTROL	43
4.1. Fases del vuelo	43
4.1.1 Definiciones de uso común	43
4.1.2 Definiciones de Seguridad en la Aviación Civil	44
4.2. Performance de una aeronave	48
4.2.1 Performance de certificación	49
4.2.2 Operaciones Especiales	49
4.2.3 Performance en vuelo	50
4.2.4 Performance con un motor inoperativo	50
4.2.5 Performance con dos motores inoperativos.....	50
4.2.6 Limitaciones de peso en aeropuertos.....	50
4.3. Vuelo Automático	52
5. TIPOS DE COMPANÍAS AÉREAS Y TIPOS DE AERONAVES	58

5.1. Tipos de Compañías Aéreas	58
5.2. Tipos de Aeronaves	62
6. LA REDUCCIÓN EN EL PESO Y EL CONSUMO EN EL TRANSPORTE ÁEREO	69
6.1. Menos peso. Distintos Servicios	69
6.2. Aviones “de plástico”	71
6.3. Vuelos de posición: un elemento en extinción	79
7. EL DETERIORO DE LAS PRESTACIONES (PERFORMANCE) DE LAS AERONAVES.....	82
8. LA AVIACIÓN Y EL CAMBIO CLIMÁTICO	92
8.1. Herramientas para un consumo eficiente: el Cost Index.	92
8.1.1 Coste de un vuelo	94
8.1.2 Costes relacionados con el tiempo de vuelo.....	95
8.1.3 Cálculo del Cost Index.....	96
8.1.4 El Cost Index en Boeing	98
8.2. El ahorro de combustible según Boeing.....	99
8.3. La perspectiva de Airbus	102
8.3.1 Planificación del vuelo	102
8.3.2 Procedimientos pre-vuelo.....	103
8.3.3 Procedimientos en vuelo.....	105
8.3.4 En resumen.....	106
8.4. Los consejos de la IATA	106
8.4.1 Programa de IATA para la conservación del combustible (IATA Fuel Conservation Programme)	110
8.4.2 Campaña de IATA para la eficiencia en el gasto del combustible....	111
8.5. La circular 303 de la OACI	112
8.5.1 Antecedentes	112
8.5.2 Recomendaciones	113
8.5.3 En resumen.....	115
8.6. Aviación y cambio climático.....	115
8.6.1 Aeropuertos. ACI (Airports Council International).	116
8.6.2 ATC. Los ANSP. Boeing. OACI.....	117
8.6.3 Las compañías aéreas. La IATA	120
8.6.4 La Aviación de Negocios.....	121
8.6.5 Los constructores de aeronaves.....	123
BIBLIOGRAFÍA	125
ANEXOS	128

1. LA GESTIÓN DE LA ENERGÍA EN EL TRANSPORTE AÉREO

Desarrollaremos, en las páginas siguientes, un breve análisis del ciclo de la energía en el transporte aéreo describiendo los fundamentos del vuelo, el funcionamiento de la mecánica que rige su actividad, los sistemas de propulsión y los sistemas de aeronaves, los tipos del transporte aéreo y tipos de aeronaves, los sistemas de gestión para el vuelo automático y las características de las aeronaves, los sistemas para el control eficiente del consumo de combustible así como los deterioros en las condiciones de las aeronaves que conducirían a penalizaciones en el mismo. El capítulo final lo dedicaremos a los últimos pronunciamientos de las agencias internacionales para la descripción de las mejores prácticas que consigan minimizar el consumo de combustible y las emisiones derivadas del mismo.

Lo aquí expuesto no tiene afán enciclopédico ni de monografía al uso sino un fin meramente descriptivo para poder realizar comparaciones entre tipos de transporte y elaboración de un modelo común de comparación dentro del proyecto ENERTRANS.

2. LOS FUNDAMENTOS DEL VUELO

2.1. Breve historia de la aviación

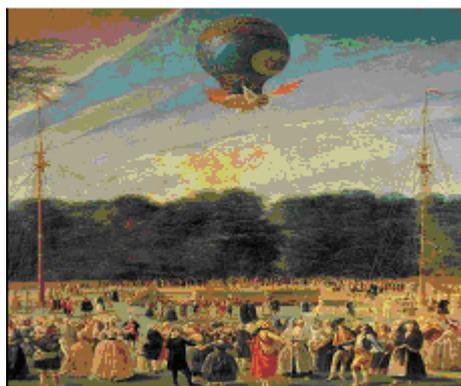
Desde el principio de los tiempos el hombre se ha sentido fascinado por la capacidad de los pájaros para volar. Las leyendas acerca de la capacidad de las personas para poder moverse por el aire se remontan a la cultura griega, donde la leyenda de Ícaro y Dédalo nos relata cómo gracias al ingenio se pudieron fabricar unas alas con las que volar escapando del laberinto del minotauro.

En cualquier caso, hasta el Renacimiento no hubo ninguna aproximación seria al planteamiento de cómo llevar a cabo el vuelo. Fue Leonardo Da Vinci el primero que, tras el estudio de la anatomía humana y la de las aves, determinó que el hombre, por el mero empleo de su propia fuerza no sería capaz de remontar el vuelo sin una ayuda artificial. Diseñó unas máquinas que, aunque nunca salieron del papel, se basaban en el concepto de que el aire era un fluido resistente, como el agua, lo que resultó ser fundamental para el desarrollo de la aerodinámica. Suyo es, por ejemplo, el diseño del primer paracaídas capaz de ralentizar el descenso de un objeto sólido.

Así que, como la tecnología hasta entonces no permitía un vuelo sostenible, se llegó al desarrollo de máquinas más ligeras que el aire. Esto consiste en crear algo con menos densidad que el aire que nos rodea para que tienda a elevarse, al igual que pasa con el agua y el aceite. Al fijarse en cómo el humo de una hoguera sube, se llegó a la conclusión de que el aire caliente era la solución, ya que si se podía encerrar este aire caliente haría subir la estructura.

Aunque se sabe que en China y Japón se utilizan desde hace mucho tiempo globos de papel con unos pequeños farolillos en su interior, el primer éxito registrado en este campo se atribuye a los hermanos Montgolfier quienes, tras muchos ensayos previos con bolsas de seda, consiguieron el 4 de junio de 1.783 elevar un globo de unos diez metros de diámetro que llevaba un pato, un gallo y un cordero a unos 2.000 metros de altitud. Después el globo descendió suavemente a unos dos kilómetros del punto de partida.

Figura 1.



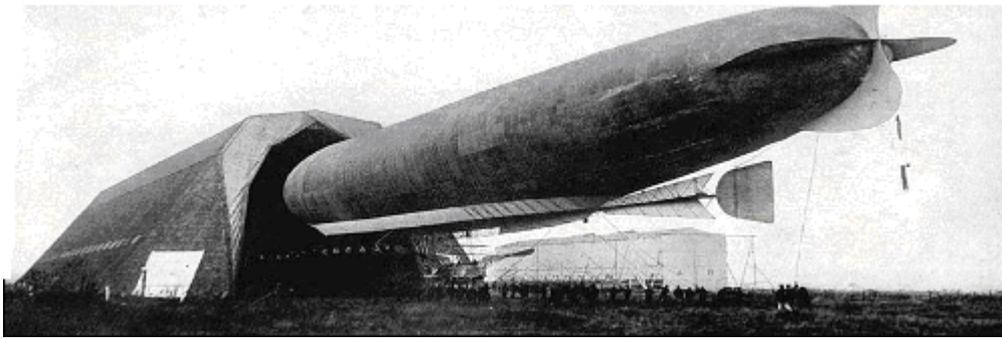
Más adelante, en octubre de ese año, se realizó el primer vuelo tripulado, elevando durante cuatro minutos a dos personas, entre ellas el médico Pilatre de Rozier, que después se estrellaría en otro globo de los hermanos Montgolfier convirtiéndose así en la primera víctima de la aviación.

En cualquier caso estos globos tenían un doble problema: por un lado, cuando el aire de su interior se enfriaba se volvía tan denso como el que había por fuera y el globo descendía, y por otro lado, el globo no se podía controlar y se dirigía donde lo llevase el viento.

Para solucionar el primer problema se desarrollaron los globos denominados “aeróstatos”, que o bien porque eran capaces de mantener el aire caliente -como hacen los globos actuales- o bien porque contenían un gas que siempre era menos denso que el aire exterior, conseguían permanecer en el aire más tiempo.

Para solucionar el segundo problema se dotó a los globos de motores con hélices y de timones, como en los barcos, para poder dirigir estos aparatos por el aire. De esta manera aparecieron los primeros dirigibles, siendo los más famosos los desarrollados en Alemania por el conde Ferdinand Von Zeppelin.

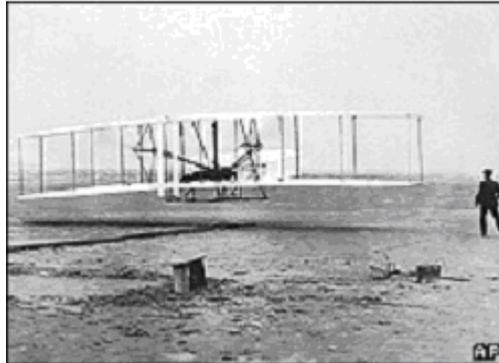
Figura 2.



Pero tanto los globos como los dirigibles resultaban ser unas máquinas enormes, por lo que se siguió trabajando para desarrollar otro tipo de máquinas.

No fue hasta el 17 de diciembre de 1903 que los hermanos Wright, unos fabricantes de bicicletas de Ohio, consiguieron realizar el primer vuelo de la historia con una máquina más pesada que el aire, y es que, gracias a un primitivo “túnel de viento” creado por ellos, desarrollaron el primer ala con perfil aerodinámico. Tras echarlo a suertes, Orville Wright, en el avión “Flyer I” con un motor de 12 hp recorrió una distancia de 37 metros en 12 segundos (el ala del Airbus 380 mide 73 metros de una punta a la otra), y tras él, el mismo día, su hermano Wilbur recorrió 200 metros en 59 segundos.

Figura 3.



Aunque ellos son considerados como los primeros en hacer un vuelo en una máquina más pesada que el aire, esto no hubiera sido posible sin el trabajo previo de otros como por ejemplo Otto Lilienthal quien, en 1896, tras numerosas pruebas desarrolló un planeador que terminó estrellándose.

Tras ellos, el desarrollo de la aviación fue imparable y en 1906 el brasileño Santos Dumont realizó el primer vuelo en Europa. A partir de ahí el desarrollo de la aviación vino de la mano de retos que se iban planteando, como el premio de 1.000 libras que el diario británico Daily Mail ofreció al primero que consiguiera cruzar el Canal de la Mancha, conseguido por el francés Luis Bleriot el 25 de julio de 1909, o el premio de 10.000 libras ofrecido por el mismo periódico a quien primero consiguiese cruzar el Atlántico, conseguido por Alcock y Brown en 1919.

Aunque éste fue el primer vuelo trasatlántico, el más recordado es el realizado por Charles Lindbergh, que voló de Nueva York a París en 33 horas y media. También merecen ser destacados los “raids” efectuados por aviadores españoles a Argentina y Filipinas.

En cualquier caso, el gran avance en el desarrollo de la aviación se produjo en las dos guerras mundiales.

En la primera de ellas el impulso bélico permitió la creación de máquinas que volaban a más de 200 km/h, que subían a más de 5.000 metros de altitud y que tenían una autonomía de 500 kilómetros, tan solo 15 años después del primer vuelo del Flyer I.

En la segunda, el empleo de nuevas tecnologías terminó llevando a la creación del primer avión a reacción.

Tras la segunda contienda, se produjo un excedente de aviones y de pilotos, lo que catapultó su utilización a nivel comercial. De hecho, en 1.944, se crea en Chicago la Organización de Aviación Civil Internacional, OACI, (ICAO en sus siglas en inglés), para poder establecer una serie de reglas que ordenasen un poco el creciente tráfico aéreo mundial, aunque ya previamente, tanto en la conferencia de París de 1.919 como en la de La Habana de 1.928, unos cuantos países establecieron unas reglas básicas de navegación.

Hoy en día, la aviación se ha convertido en un medio de transporte imprescindible en la economía mundial, con aviones capaces de llevar a más de 850 pasajeros en trayectos sin escalas de 16.000 kilómetros.

Una vez introducidos en la historia y desarrollo de la aviación, analizaremos brevemente los fundamentos del vuelo para ello, primero hemos de familiarizarnos con algunos términos que se emplean en el estudio de la aerodinámica.

2.2. Terminología del ala

Para poder comprender el ala o plano de un avión hemos de conocer sus partes, principalmente el “perfil aerodinámico”, que es un corte transversal realizado al plano.

2.2.1 Elementos del perfil

- Borde de ataque: es la parte delantera del perfil en el sentido de la marcha, la que se encuentra con el aire.
- Borde de salida: es la parte opuesta al borde de ataque, la trasera en el sentido de la marcha.
- Cuerda: es una línea recta imaginaria que va del borde de ataque al borde de salida
- Extradós: es la parte superior del plano o perfil.
- Intradós: es la parte inferior del plano o perfil.
- Espesor: distancia que se mide perpendicularmente entre el extradós y el intradós, su grosor.
- Espesor máximo: valor máximo del grosor a lo largo de la cuerda. Este valor máximo de espesor se suele expresar en tantos por ciento de la cuerda.
- También el ala o plano tiene ciertos términos con los que conviene familiarizarse.

2.2.2 Elementos del ala

- Superficie alar: es la superficie en metros cuadrados del ala.
- Envergadura: es la distancia de una punta del ala a la otra.
- Cuerda máxima: es la cuerda en aquel sitio del ala donde esta es mayor, generalmente, el encastre o unión del ala con el fuselaje.
- Cuerda media: es aquella que multiplicada por la envergadura nos da la superficie alar.
- Estrechamiento: es el cociente entre la cuerda máxima y la cuerda mínima, (aquella que hay en la punta del ala).
- Alargamiento: es la relación entre la envergadura y la cuerda media.
- Línea del 25% de la cuerda: es la unión de todos los puntos que se encuentran al 25% de las distintas cuerdas que se van dando desde el encastre del plano con el fuselaje hasta la punta del ala.
- Flecha: es el ángulo que se forma entre la línea del 25% de la cuerda y una perpendicular al eje longitudinal del avión.

- **Diedro:** es el ángulo que forma el borde de ataque con el plano de simetría vertical del fuselaje.

2.3. Principios del vuelo

Para comprender cómo vuela un avión a través del aire tenemos que conocer como se mueve el aire alrededor de las alas y por tanto cómo se comporta el aire cuando se desplaza.

2.3.1 Teorema de Bernoulli

El aire es un fluido compresible. De todos es conocido el uso de botellas de aire comprimido para el buceo o las armas. Pero para facilitar su estudio, el aire se considera incompresible cuando se mueve por debajo de la velocidad del sonido. Cuando la velocidad del aire se acerca a la del sonido ya se consideran otras cuestiones en la dinámica de fluidos como la compresibilidad.

Como todos los reactores comerciales, a excepción del Concorde franco-británico, vuelan a velocidades subsónicas, consideraremos que el aire que se mueve por sus alas también es subsónico y por tanto, incompresible, es decir que su densidad es constante.

Imaginemos un tubo rígido a través del cual se desplaza una cantidad de aire. Imaginemos también que aislamos una sección de una determinada longitud dl de este tubo. Tanto al principio como al final de esta sección nos encontramos con dos áreas, o superficies, que vienen a ser como la entrada y la salida de un túnel, en las que medimos sus características físicas de manera que nos encontramos con que al principio del tubo, o primera superficie S , en aire pasa a una determinada velocidad V y con una determinada presión p . Al final de esta sección el aire pasa por la segunda superficie S' con otra velocidad $V+dv$ y tiene otra presión $p+dp$.

Si tenemos en cuenta que la presión es igual a fuerza por superficie, lo que en nuestro sistema se mide en kilogramos por centímetro cuadrado y en el anglosajón en libras por pulgada cuadrada, obtenemos que p (presión) = F (fuerza) / S (Superficie).

Por tanto si multiplicamos por S en ambos lados de la ecuación tenemos que $p * S = F$, es decir, que la fuerza es igual a la presión por unidad de superficie. Si aplicamos esto en nuestra sección de tubo podremos hallar la fuerza que ejerce la masa de aire que hay en dicha sección, en concreto dicha fuerza será:

$$F = p * S(\text{de la "boca" del túnel}) - (p + dp) * S'(\text{de la "salida" del túnel}) \quad [1]$$

Si además “acortamos” la sección que estamos estudiando tendremos que en cuando esa longitud sea cero, ambas superficies tendrán el mismo tamaño, $S = S'$. Al sustituir en la ecuación anterior tendremos:

$$F = p * S - (p + dp) * S$$

O lo que es lo mismo:

$$F = p * S - p * S - dp * S$$

Resultando al final:

$$F = -dp * S \quad [2]$$

Por otra parte el volumen de la masa de aire que esta entre las superficies de entrada y de salida es igual a la superficie (que ya hemos igualado en ambos extremos) por la longitud del tubo dl :

$$Vol. = S * dl \quad [3]$$

Y como la densidad es la cantidad de masa que tenemos por unidad de volumen tendremos que:

$$\rho = m/Vol. \quad [4]$$

Por lo que podremos definir la masa como el producto de la densidad por unidad de volumen:

$$m = \rho * Vol.$$

Ya que como se explicó antes $Vol. = S * dl$, si sustituimos en la fórmula anterior tendremos que:

$$m = \rho * S * dl$$

Si además tenemos en cuenta que la aceleración es la variación de velocidad en una determinada variación de tiempo obtendremos que:

$$a = dV/dt \quad [5]$$

Si sustituimos en la ecuación fundamental de la dinámica, (la fuerza es igual a la masa por la aceleración), la masa m y la aceleración a por los valores que hemos obtenido anteriormente tendremos que:

$$F = m * a \quad [6]$$

Luego:

$$F = \rho * S * dl * dV/dt$$

Y ya que la velocidad V es la variación de longitud en una determinada cantidad de tiempo tendremos que:

$$V = dl/dt \quad [7]$$

Que si lo sustituimos en la ecuación anterior obtenemos:

$$F = \rho * S * V * dV/dt$$

Como a su vez habíamos quedado que:

$$F = -dp * S$$

Si sustituimos en la ecuación anterior deducimos que:

$$- dp * S = \rho * S * V * dV/dt$$

Y como las S se anulan entre sí:

$$- dp = \rho * V * dV/dt$$

O lo que es lo mismo.

$$dp + \rho * V * dV/dt = 0$$

Que es la ecuación del teorema de Bernoulli en su forma diferencial. Como consideramos desde el principio que la densidad era constante, al integrar esta ecuación obtenemos la expresión mas conocida del teorema:

$$p + 1/2\rho * V^2 = cte. [8]$$

Donde la presión p es la presión estática, (por ejemplo si estamos en un coche sería la presión atmosférica del aire que hay dentro y alrededor del coche), y la mitad del producto de la densidad por el cuadrado de la velocidad es la presión dinámica, (en el ejemplo del coche la fuerza con la que el aire nos golpea la mano si la sacamos por la ventanilla).

Es en esta expresión del teorema donde encontramos el fundamento del vuelo, ya que en esta propiedad la suma de estas presiones a lo largo de ese "túnel" de corriente es constante, nos apoyaremos para conseguir una aplicación práctica.

2.3.2 Efecto Venturi

Como acabamos de ver, la suma de las presiones es constante, pero esto ocurre en todos los puntos de ese tubo de corriente de manera que si por ejemplo tenemos tres puntos diferentes ocurrirá que:

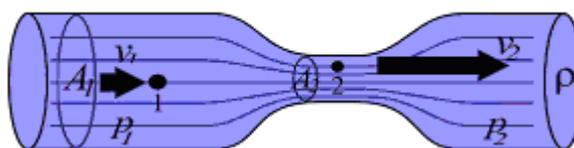
$$p_1 + 1/2\rho_1 * V_1^2 = p_2 + 1/2\rho_2 * V_2^2 = p_3 + 1/2\rho_3 * V_3^2 = cte. [9]$$

Esto significa que al ser la densidad siempre la misma, ya que consideramos el aire como incompresible, si va variando la presión, necesariamente ha de variar la velocidad para que al final el resultado de la ecuación sea constante.

$$p_1 + 1/2\rho_1 * V_1^2 = p_2 + 1/2\rho_2 * V_2^2 [10]$$

Basándonos en esto podemos deducir que si un fluido incompresible pasa por un estrechamiento, al aumentar la velocidad disminuye la presión, lo que se conoce como efecto Venturi.

Figura 4.



Una ejemplo práctico de este efecto lo podemos observar en los rápidos de un río, donde el agua, fluido incompresible, aumenta de velocidad cuando fluye por un estrechamiento producido por rocas, etc.

Otro ejemplo lo tenemos cuando soplamos aire con los pulmones, si queremos aire frío lo que hacemos es estrechar los labios para que el aire salga mas rápido y por consiguiente con menos presión (lo que hace disminuir su temperatura). Sin embargo si echamos aire con la boca mas abierta el aire sale mas despacio y a la temperatura que tiene en los pulmones.

Si este efecto lo podemos llevar al ala entonces tendremos el origen de la sustentación.

2.3.3 Origen de las fuerzas aerodinámicas

¿Cómo podemos hacer uso de este efecto en un ala? Ya definimos antes lo que era un perfil aerodinámico, por así decirlo, es como una “loncha” de ala. Lo que pretendemos es conseguir crear un “estrechamiento” en el perfil para conseguir variar las características físicas del aire que se mueve alrededor de él. En el perfil podíamos ver que en la parte superior, el extradós, se produce un estrechamiento por la curvatura que tiene.

Este estrechamiento hace que el aire que pasa cerca del plano se vea acelerado, lo que provoca a su vez que la presión disminuya. Como en la parte inferior del plano (el intradós) la curvatura y por tanto el estrechamiento es menor, la variación de velocidad y por tanto de la presión es también menor.

Figura 5.



Con esta diferencia de presiones se crea la sustentación, ya que tenemos una presión mayor en la parte inferior del plano que la que tenemos en la parte superior, por tanto la suma vectorial de dichas fuerzas resulta en una componente que hace elevar al plano y con él, al avión.

Así que como vemos, lo fundamental para conseguir que un plano vuele es la velocidad (ya que si no tenemos velocidad, no hay disminución de presión y no hay sustentación), y la curvatura (ya que sin ella no se produce el estrechamiento, y sin el, no hay variación de la presión).

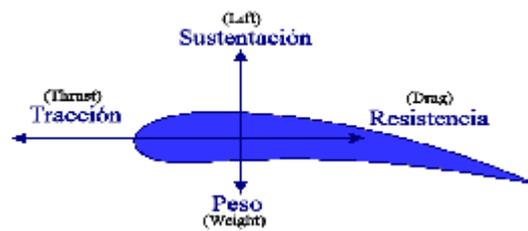
Como veremos más adelante, si somos capaces de variar a nuestra voluntad la curvatura conseguiremos variar la sustentación o incluso conseguir que se produzca en sentido contrario.

Como es lógico la curvatura no es aumentable infinitamente por ello existe el concepto de “Capa Límite”. La forma del perfil es aerodinámica, que significa que éste penetra en el aire realizando la menor perturbación posible y fluyendo el aire a su alrededor en forma de láminas. La capa de láminas cuya velocidad es influenciada por el paso del ala se llama Capa Límite. Para que todo esto funcione como se ha descrito, el flujo de aire que rodea al perfil debe ser laminar, es decir sin remolinos. Este efecto se observa mejor en el agua, al pasar un velero el agua fluye suavemente alrededor pero cuando remamos, el remo genera muchos remolinos. Si la Capa Límite laminar se destruye, la sustentación desaparece.

Pero la sustentación no es más que una de las cuatro fuerzas que intervienen en el movimiento de un avión, aunque desde luego la más importante. Las otras tres son: el peso (que va en sentido contrario a la sustentación), la tracción (que es la fuerza

producida por los motores) y la resistencia (que va en sentido contrario a la tracción).

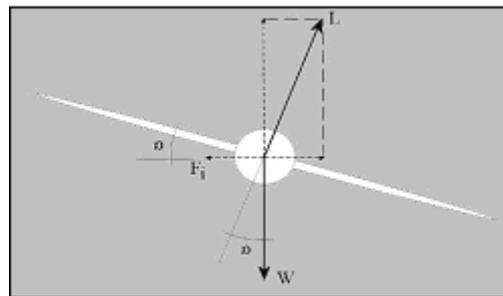
Figura 6.



Cuando todas estas fuerzas están compensadas el avión está en vuelo nivelado y velocidad constante. Hay que hacer notar que la tracción y la resistencia son siempre contrarias, pero no así el peso y la sustentación. El peso está siempre dirigido al centro de la tierra y la sustentación es un vector perpendicular al ala hacia el extradós. Si el avión cambia el ángulo de cabeceo estas dos fuerzas dejan de ser contrarias y se generan componentes que actúan elevando/descendiendo o acelerando/desacelerando el aerodino.

Al igual que hemos hecho antes, vamos a explicar matemáticamente como afecta el viraje a la distribución de fuerzas y por tanto a la energía requerida.

Figura 7.



Como vimos anteriormente, cuando un avión vuela recto y nivelado está sometido a la fuerza de sustentación y a su peso. Sin embargo, cuando realiza un viraje, además de estas dos fuerzas también interviene una inercia hacia el exterior del viraje conocida como fuerza centrífuga. Esta fuerza F se define por la fórmula descrita anteriormente -fuerza es igual a masa por aceleración- pero en este caso, al estar volando el avión un arco, la aceleración centrípeta o normal será la siguiente:

$$a_n = v^2/R \quad [11]$$

siendo V la velocidad del avión y R el radio de la circunferencia que el avión está volando.

Si sustituimos este valor de aceleración en la ecuación fundamental de la dinámica obtenemos que:

$$F = m * a_n \text{ por tanto: } F = m * V^2/R \quad [12]$$

y ya que la masa es el peso dividido por la aceleración de la gravedad ($m = W/g$) si lo sustituimos en la ecuación anterior:

$$F = W/g * V^2/R$$

Si ahora proyectamos las fuerzas y las igualamos obtenemos que $F = L * \text{sen} \varphi$ y que $W = L * \text{cos} \varphi$, por tanto:

$$L * \text{sen} \varphi = W/g * V^2/R \quad [13]$$

O lo que es lo mismo:

$$R = W * V^2/g * L * \text{sen} \varphi$$

si sustituimos L por el valor que tiene con respecto a la densidad del aire y la superficie alar ($L = 1/2 \rho * V^2 * S * C_L$), donde C_L es un coeficiente de sustentación, obtenemos que:

$$R = W * V^2/g * 1/2 \rho_0 * V^2 * S * C_L * \text{sen} \varphi$$

si tenemos en cuenta que el cociente entre la densidad real de la masa de aire ρ y la densidad a nivel del mar en una Atmósfera Standard ρ_0 la denominamos σ , si multiplicamos y dividimos por ρ tendremos que la ecuación anterior es igual a:

$$R = (2/g * \rho_0 * S) * (W/\sigma * C_L * \text{sen} \varphi)$$

Como el seno de φ aumenta según lo hace el ángulo, σ decrece según aumenta la altitud, podemos deducir que el radio del viraje crece si aumentan el peso o la altitud, aunque se puede disminuir si aumenta el ángulo de inclinación.

La forma más intuitiva de comprender esto es con los peraltes que hay en las pistas de pruebas o en los velódromos. En ellos la parte superior de la pista está más inclinada para cuando el vehículo viaja a más velocidad (es como inclinar el ángulo de inclinación o de alabeo en un avión), de esta forma, aunque la pista tenga el mismo radio de viraje, la misma curva se puede tomar a una velocidad mucho mayor.

De forma análoga, como definimos que $W = L * \text{cos} \varphi$, si lo sustituimos en la ecuación

$$R = W * V^2/g * L * \text{sen} \varphi \text{ obtenemos que:}$$

$$R = L * \text{cos} \varphi * V^2/g * L * \text{sen} \varphi = V^2/g * \text{tg} \varphi \quad [14]$$

Esta ecuación es muy importante ya que como la tangente φ aumenta según lo hace el ángulo podemos deducir que el radio aumenta con velocidad (como vimos anteriormente) y que disminuye con el ángulo de inclinación como vimos en el ejemplo de los peraltes.

El vincular el peso con el ángulo, $W = L * \text{cos} \varphi$, o lo que es lo mismo, $L = W/\text{cos} \varphi$, nos permite deducir que como el coseno de φ siempre será menor que la unidad, la sustentación en un viraje deberá ser mayor cuanto mayor sea el ángulo de inclinación, es decir, que necesitaremos más potencia, y por tanto más energía, cuando realizamos un viraje que cuando volamos rectos.

De la misma forma cuando el avión vira debe generarse fuerza centrípeta. Esta fuerza depende principalmente del radio de giro: al reducirse el radio, se incrementa. Para hacernos una idea, cuando un avión vuela recto y nivelado sólo existe el peso: se dice que soporta un factor de carga de 1G. Se define Factor de Carga como la sustentación dividida por el peso.

Figura 8.



Cuando se hace un viraje de 60° , para mantener la altura se debe doblar la sustentación, ya que las fuerzas centrípetas con esa inclinación producen una aceleración igual al peso con lo que se alcanzan los 2G, es decir, 2 veces la fuerza de la gravedad, la sensación es como si pesáramos exactamente el doble. Los aviones comerciales limitan el ángulo de alabeo a 30° porque así se restringe el factor de carga a 1,15G, valor confortable para el pasaje.

En el estudio de la aerodinámica la resistencia también es un factor muy importante, ya que en un avión se estudian dos tipos de resistencia: la parásita y la inducida.

La resistencia parásita es muy fácil de “visualizar”. El aire, al ser un fluido con cierta viscosidad, hace que al rozar sus moléculas con la estructura del avión vaya frenando un poco el avance del mismo. Es como deslizarse por una pista de hielo o por una carretera de asfalto, la fricción entre los cuerpos hace que en el primer caso la energía de avance se disipe muy lentamente, mientras que si pretendemos deslizarnos sobre asfalto el rozamiento nos hará frenar muy rápidamente. Con el aire ocurre lo mismo.

La resistencia inducida tiene que ver con el movimiento del aire alrededor del plano. Al existir esa diferencia de presiones entre el intradós y el extradós, como las presiones siempre tienden a igualarse, el aire trata de pasar del intradós al extradós. Esto produce un movimiento de aire que termina en un torbellino, como un remolino de aire que se escapa del plano por la punta. Este remolino se puede observar si se colocan columnas de humo en la trayectoria de un avión. Cuando este pasa el remolino, conocido como “estela”, hace que las columnas de humo giren.

Figura 9.

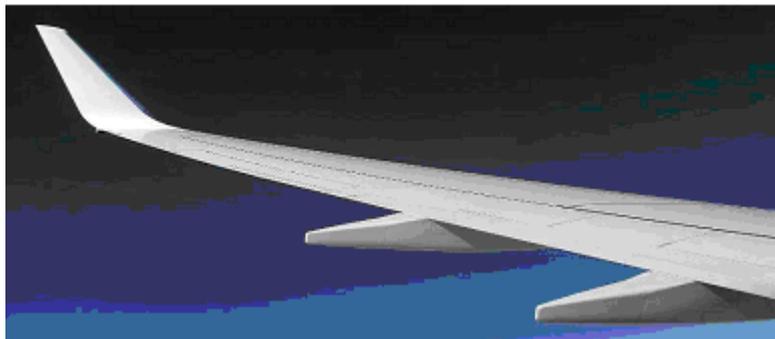


Este remolino le quita energía a todo el plano de forma directamente proporcional a la sustentación, ya que cuanto más sustentación hay, más diferencia de presiones y mayor es el remolino o estela. De hecho, los aviones cuanto más pesados son, más sustentación necesitan y más estela tienen, lo que puede afectar a otro avión que vaya detrás lo suficientemente cerca.

Un ejemplo visible de este remolino lo podemos tener en los aviones de combate cuando realizan un viraje muy pronunciado. Al incrementarse el peso con la fuerza centrífuga el avión necesita más sustentación para no caerse. Este incremento de sustentación aumenta la fuerza del torbellino hasta el punto de que la presión en el interior es mucho menor que la presión atmosférica del aire, como ocurre en el interior de un tornado. Si esta presión cae lo suficiente la humedad del aire se llega a condensar haciendo visible el remolino.

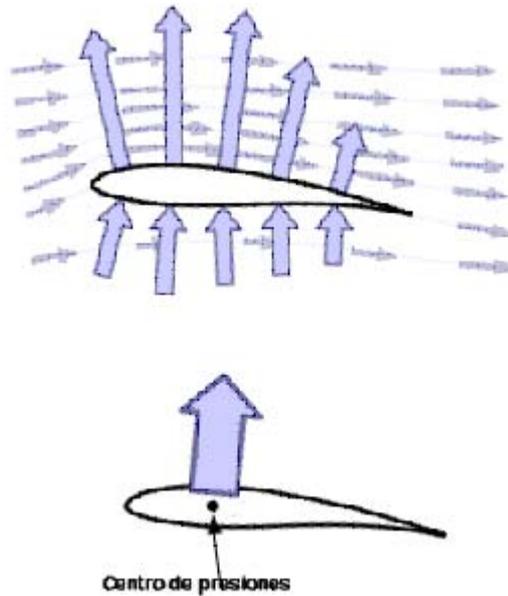
Para contrarrestar esta resistencia inducida se han desarrollado distintas formulas, como por ejemplo, el empleo de alas con la punta en forma de elipse, o más recientemente, con la punta hacia arriba, lo que se conoce como “Winglets”, que consiguen minimizar la fuerza de dichos remolinos. También los planeadores utilizan un gran alargamiento para que el remolino se disipe al máximo cuando alcance la punta del plano. Teóricamente el ala perfecta debe ser infinita para evitar esta resistencia.

Figura 10.



La suma de estas dos resistencias, parásita e inducida, se contraponen al avance del avión, quitándole energía, como hace un paracaídas de frenado en un avión o en un coche de carreras.

Figura 11.



Como vemos son cuatro las fuerzas que afectan a un avión, pero además nos encontramos con que esas fuerzas no se aplican en el mismo punto. Por ejemplo, al producirse el estrechamiento del ala poco a poco se va produciendo una disminución gradual de las presiones a medida que nos acercamos a dicho estrechamiento. Igualmente, cuando hemos pasado el estrechamiento las presiones van aumentando gradualmente. Se crea lo que se denomina gradiente de presiones, que si se suma vectorialmente nos da una sola componente de sustentación. El punto donde se aplica esta suma, donde se aplica el resultante de todas las sustentaciones del plano, es lo que se denomina “centro de presiones”. Por explicarlo de forma más intuitiva imaginemos un avión a escala que colgamos del techo por medio de un hilo. El punto del avión donde atamos el hilo sería el centro de presiones.

Pero con otra fuerza ocurre lo mismo, y es que aunque todas las partes del avión pesan, podemos definir un punto que es la suma vectorial de todos los pesos del avión. Es el centro de gravedad. Si intentamos sostener una cuchara sobre la punta de un dedo podremos observar que el punto de equilibrio, es en realidad el centro de gravedad. Aunque ese no sea el punto medio de la longitud de la cuchara sí que mantendremos la cuchara en equilibrio, ya que estaremos sustentando la cuchara por su centro de gravedad.

¿Qué ocurre por tanto si ambos centros, el de presión y el de gravedad, no se aplican en el mismo sitio? Pues tendremos lo que se denomina un par de fuerzas, es decir, que el avión tenderá a subir o a bajar el morro, en función de cómo estén estas fuerzas. Podemos entender mejor este fenómeno pensando en el volante de un coche. Si queremos girar el volante una mano sube y la otra baja. Al no estar ambas en el mismo punto el volante gira, (si estuviesen en el mismo punto, al ir en sentidos contrarios simplemente se anularía una fuerza con la otra).

Para impedir que este par de fuerzas actúe lo que hacemos es usar una serie de elementos.

2.4. Mandos de vuelo y dispositivos hipersustentadores

El primer elemento que utilizamos es un estabilizador horizontal en la cola.

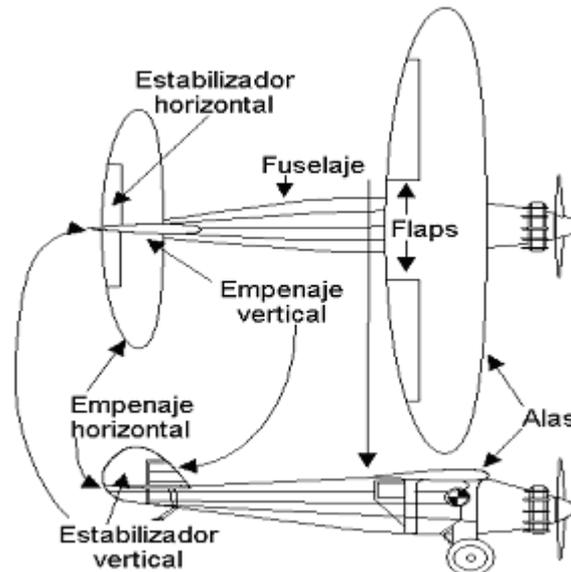
Este estabilizador no es más que un pequeño plano situado en la cola pero “boca abajo” es decir, con una curvatura mayor en la parte de abajo. Eso produce una pequeña fuerza de sustentación en sentido contrario a la fuerza de sustentación que produce el plano principal, evitando así la tendencia del plano a subir (lo que se denomina “momento de encabritado”) o bajar (lo que se denomina “momento de picado”) que produce el que el centro de presión y el de gravedad no estén en la misma posición. Volviendo al ejemplo del volante, es como que una mano sube y la otra baja para girar pero una tercera genera la fuerza suficiente en la dirección correcta para que el volante se mantenga en equilibrio sin moverse.

Si además de esto ponemos al final de este estabilizador una superficie que suba o baje a nuestra voluntad, conseguiremos variar esa “sustentación inversa” a nuestra conveniencia, para conseguir quitar esa sustentación o acentuarla y tener así un movimiento de picado o encabritado. La superficie que varía esa curvatura del estabilizador es el timón de profundidad, que actúa igual que el timón del barco.

Si hacemos que el timón baje, la curvatura, que recordemos que se considera desde el borde de ataque hasta el borde de salida, se incrementará y por lo tanto, la sustentación será mayor, mientras que si el timón sube, la curvatura disminuye y la sustentación decrecerá. Con esto conseguimos que esa “tercera mano” del volante frene a las otras dos o que ayude a cualquiera de ellas para conseguir el giro, en nuestro caso, que el morro del avión se levante o baje, o sea que gire alrededor de su eje transversal, que va de una punta del plano a la otra.

Lo mismo ocurre con el timón de dirección, ya que en sentido vertical tenemos un estabilizador vertical con otro timón, llamado de dirección, que afecta al giro del avión alrededor de su eje vertical, (como si pinchásemos al avión de arriba abajo para convertirlo en una veleta). Este movimiento se denomina “guiñada”.

Figura 12.



El tercer tipo de giro se produce alrededor del eje longitudinal, que va del morro del avión a la cola, y es el movimiento de “alabeo”.

El alabeo consiste en inclinar el avión hacia un lado o hacia el otro como hace un motorista para tomar una curva. Al igual que antes lo que hacemos es que unas superficies móviles, llamadas alerones, suben o bajan para cambiar la curvatura del plano en esa sección. En este caso el movimiento es asimétrico en cada ala, de forma que cuando un alerón sube, el simétrico baja y viceversa. Esta diferencia de curvaturas alares crea una sustentación diferente en cada plano, obligando a girar en el eje longitudinal al avión como en el ejemplo del volante.

Es hora de hablar de las superficies hipersustentadoras. Las alas de un avión, especialmente en los reactores comerciales modernos, están diseñadas para producir la sustentación necesaria cuando vuelan a una determinada altitud y sobre todo con una determinada velocidad. Así, la velocidad normal de operación suele estar en estos reactores en torno a un 75%-85% de la velocidad del sonido a esa altitud, lo que se denomina Mach .75-.85. Esto equivale entre 750 Km./h. y 900 Km./h. aproximadamente.

¿Pero qué ocurre si volamos más despacio? Como vimos antes si no hay suficiente velocidad alrededor del perfil, no se crea la sustentación. Si a esto le sumamos que la velocidad normal de un avión en el momento del aterrizaje es de unos 300 kilómetros por hora comprenderemos que cuando volamos tan “despacio” el ala necesita de una ayuda extra para poder producir la sustentación necesaria.

Esta ayuda viene de los elementos hipersustentadores que no son más que unas superficies que al extenderse aumentan artificialmente la cantidad de sustentación que genera el ala. Hay dos tipos de superficies hipersustentadoras, los Flaps y los Slats.

Los Flaps son unas superficies retráctiles que al desplegarse siguen la curvatura del perfil. Funcionan como una prolongación del ala, por una parte aumentan la superficie total del ala y por otra aumentan la curvatura de la misma. Estos dos efectos, como ya hemos visto, aumentan la sustentación.

Figura 13.



Puede haber Flaps de borde de ataque o de borde de salida.

En el borde de ataque se suelen emplear los Slats, que son unas ranuras que se abren para permitir que parte del flujo de aire que normalmente pasaría por el intradós se dirija al extradós. Con esto se consigue que el extradós tenga más energía y que genere más sustentación.

Adicionalmente existen los aerofrenos o spoilers. Estas superficies que se encuentran paralelas al ala en la parte superior, se despliegan perpendicularmente en el extradós y su función es la de eliminar gran parte de la sustentación del ala, de esta forma se pierde energía, que aunque parece incoherente, es necesario, como lo es el frenar en un coche.

El principio en el que se basa su funcionamiento es en romper la Capa Límite cuando esta choca con el aerofreno, El ala genera sustentación hasta ese punto y pierde toda la que proporcionaba lo que queda por detrás desestabilizando el equilibrio de fuerzas. Al perder sustentación el avión baja, para poder seguir en vuelo nivelado hay que levantar el morro lo que provoca mayor resistencia y pérdida de velocidad, es decir: frenada.

3. SISTEMAS DE PROPULSIÓN Y SISTEMAS DE LAS AERONAVES EN LA AVIACIÓN COMERCIAL

3.1. Sistemas de propulsión

3.1.1 Introducción: motores de aviación

El primer avión propulsado de la historia de la aviación del que se tienen datos, el de los hermanos Wright, utilizaba un motor de hélice.

Los sistemas de propulsión hasta los años 30 del siglo pasado utilizaron motores de pistón que proporcionaban empuje a una hélice para conseguir que se venciesen las fuerzas de resistencia (resistencia al avance y gravedad) y las aeronaves pudieran levantar el vuelo. Los primeros motores de émbolo utilizaban un pequeño motor de gas que hacía girar una hélice de diámetro elevado para acelerar el aire y producir sustentación y empuje. En las sucesivas etapas del desarrollo del transporte aéreo se evidenciaron las carencias de este sistema de propulsión que impedía alcanzar velocidades elevadas.

En la actualidad tan sólo una pequeña porción de aeronaves de escaso peso (privadas y de compañías de aerotaxi) utilizan motores de émbolo para la tracción siendo sustituidos éstos, en la aviación comercial y de forma generalizada, por sistemas de propulsión a reacción.

3.1.2 Motores a reacción

Aunque se tienen noticias de diseños de turbinas de vapor (Aeolipile) realizados por Hero de Alejandría hace unos 2100 años y conocemos que en China se han utilizado cohetes de pólvora desde el siglo XII a. d. C., fue Sir Isaac Newton quien formuló el empuje a reacción en 1687.

En ese año publicó un libro fundamental: “Philosophiae Naturalis Principia Mathematica” en el que realizaba una síntesis de la física existente hasta entonces.

En aquél momento toda la física se podía reducir a tres principios básicos, conocidos como las Leyes de la Dinámica ó Leyes de Newton. Aunque estas leyes sólo valen para sistemas de referencia inerciales podemos afirmar que los motores a reacción están basados en la segunda y tercer ley de Newton:

1º Ley: Principio de Inercia. Todo cuerpo permanecerá en estado de reposo o mantendrá velocidad constante cuando se le deja libre sin que actúe ninguna fuerza sobre él.

2ª Ley: Ley de la Fuerza ó Principio Fundamental de la Dinámica. El incremento de la cantidad de movimiento es proporcional a la resultante total de las fuerzas actuando sobre dicho cuerpo. En términos matemáticos esta ley se expresa mediante la relación: [15]

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

Se afirma también que: la fuerza que actúa sobre un cuerpo es directamente proporcional al producto de su masa y su aceleración. [16]

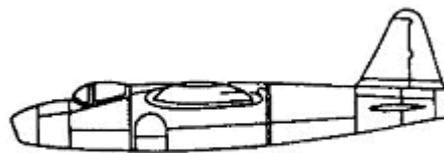
$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

3º Ley: Principio de Acción y Reacción. Por cada fuerza que actúa sobre un cuerpo éste realiza una fuerza igual pero de sentido opuesto sobre el cuerpo que la produjo. Dicho de otra forma: Las fuerzas siempre se presentan en pares de igual magnitud y sentido opuesto y están situadas sobre la misma recta.

El primero en patentar una turbina de gas siguiendo estos principios fue un inglés, John Barber, que en 1791 presentó un diseño que usaba el ciclo termodinámico de una turbina de gas. Su diseño constaba de compresor, cámara de combustión y turbina.

No fue hasta la tercera década del siglo XX cuando dos ingenieros, uno alemán Hans von Ohain (junto con Max Hahn) y otro inglés Frank Whittle, diseñaron, por separado, el precursor de los modernos motores a reacción para aviación

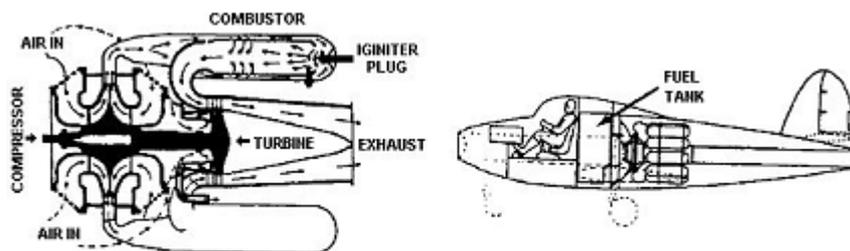
Figura 14.



The German Heinkel HE-178

En Enero de 1930 Frank Whittle presentó, para su aprobación, una patente de una turbina de gas para un avión a reacción. Hasta el verano de 1939 no obtuvo la licencia del Ministerio del Aire inglés para construirla. El avión experimental con ese motor voló por primera vez en mayo de 1941.

Figura 15.



Whittle's Reverse-Flow
 Combustion Chamber

Fuselage Arrangement of the
 E28/39 Experimental

Desde entonces, se han realizado muchas mejoras y variaciones de los diseños en los motores a reacción, lo que ha posibilitado la fabricación de aeronaves más grandes y rápidas. En apenas cien años, los aviones han evolucionado desde el primer vuelo de

12 segundos de los hermanos Wright hasta aviones supersónicos capaces de volar enormes distancias en unas pocas horas gracias a los motores a reacción.

3.1.3 Clasificación de los motores a reacción: estato-reactores, pulso-reactores y turbo-reactores

En esencia, un motor a reacción es una máquina diseñada con el propósito de expulsar un gran volumen de gases a una velocidad y presión elevadas, con el objeto de producir una fuerza en sentido contrario (empuje), necesaria para superar la resistencia aerodinámica de una aeronave. Además de producir un escape de alta velocidad, el motor a reacción produce, a la vez, energía hidráulica, eléctrica, neumática (para aire acondicionado y presurización) y sangrado de aire caliente para protección anti-hielo.

Podemos distinguir cuatro tipos de motores a reacción. Tres de ellos son utilizados por la industria aeronáutica y los denominados motores cohete (no necesitan aire ambiente para su funcionamiento y son ideales para operaciones fuera de la atmósfera), que son utilizados por la industria aeroespacial.

Los motores a reacción utilizados por la industria aeronáutica se dividen en estato-reactores, pulso-reactores y turbo-reactores. En un estudio específico al final de este trabajo haremos referencia a los motores turbo reactores de hélice o turbohélices.

Estato-reactores son motores a reacción **auxiliares** que carecen de compresores y turbinas. La compresión se efectúa por la alta presión dinámica debida a la alta velocidad necesaria para su funcionamiento. El aire comprimido se somete a un proceso de combustión en una cámara y a una expansión en la tobera de escape. Esta forma de trabajo es continua. Es el más sencillo de los motores a reacción, ya que no tiene piezas mecánicas móviles, a excepción de la bomba de combustible. Los componentes esenciales son: el difusor de admisión, la cámara de combustión y la tobera de escape. En virtud de que éstas sean convergentes o divergentes se utilizan para propulsión subsónica o supersónica.

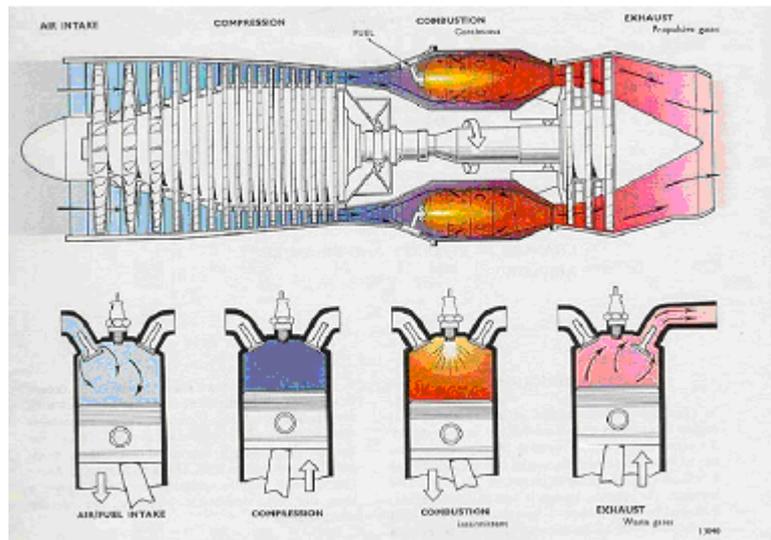
Los pulso-reactores son similares a los “estato”. La diferencia estriba en que mientras que estos últimos sólo se pueden encender o apagar y tienen un funcionamiento continuo, los “pulso” disponen en su interior de unas válvulas que permiten ejecutar la combustión de manera intermitente a impulsos de alta frecuencia.

Los turbo-reactores son turbinas de ciclo abierto con un turbocompresor y producen muy elevados rendimientos.

La operación básica de un turbo-reactor, de forma esquemática, consiste en:

- El aire entrante es comprimido mediante un compresor
- Se añade combustible y se produce la ignición
- Los gases mueven una turbina
- La turbina mueve al compresor
- Los gases abandonan el avión por la parte trasera en un chorro de alta velocidad

Figura 16.



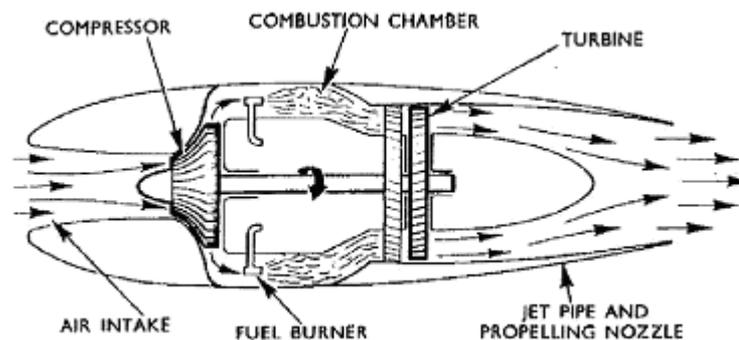
El proceso es similar al de un motor de explosión: admisión-compresión-combustión-escape, como se ilustra en la figura adjunta.

Tipos de turbo-reactores

Aunque no exista una clasificación “académica” de tipos de turbo-reactores, se puede distinguir entre:

- Reactores de flujo único, son aquellos en los que todo el aire que entra en el motor es sometido a compresión y combustión parcial, expansionándose en las turbinas para captar la energía necesaria y mover el compresor produciéndose en la tobera una salida de flujo a alta velocidad y presión.

Figura 17.

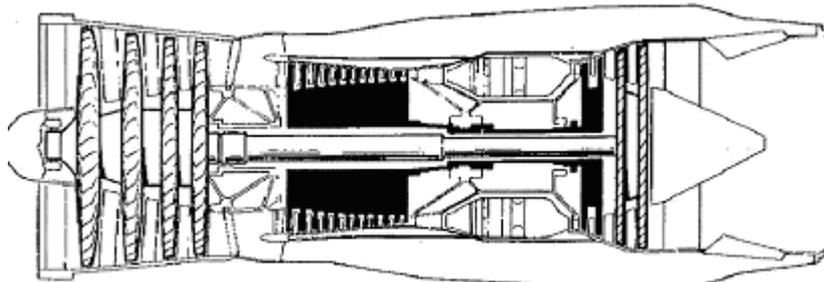


Motor tipo “Whittle” similar a los pioneros del vuelo a reacción. Podemos observar que tiene un difusor de entrada, un compresor centrífugo, un solo eje, cámaras de combustión anulares y un escalón de turbina con un difusor de salida (tobera). Los motores que hoy equipan a las más modernas aeronaves comerciales responden a este modelo inicial.

- Reactores de doble flujo, son aquellos en los que una parte del aire que penetra en el motor sigue las mismas transformaciones que en los de flujo

único y otra parte no es sometida a combustión, acelerándose únicamente por la acción de los alabes del compresor consiguiendo un aumento en el empuje.

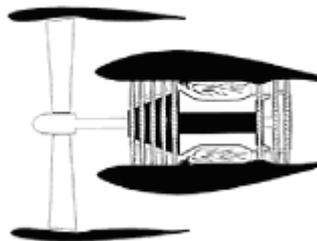
Figura 18.



Twin-spool By-pass Turbo-jet (low by-pass ratio)

Figura 19.

Turbofan Engine



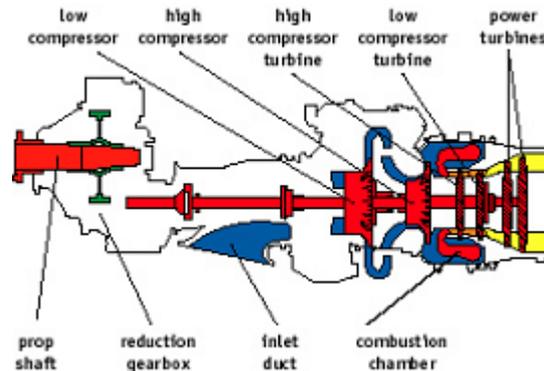
Source: U.S. Federal Aviation Administration

En los primeros motores, como el de la figura anterior, el índice de derivación (proporción entre el flujo secundario y el primario) era muy bajo. En la actualidad los modelos más avanzados y potentes tienen elevados índices de derivación de hasta 9:1, como el de la figura adjunta (Turbo fan Engine).

- Según el número de compresores utilizados, podemos distinguir hasta ocho tipos de motores y, según los ejes, podemos encontrar motores de hasta tres ejes.
- Según el tipo de compresor se pueden dividir entre centrífugos y axiales. Los compresores centrífugos fueron los utilizados en los primeros motores a reacción, en cambio, los axiales son los más utilizados en la actualidad debido a su configuración, elevado rendimiento y facilidad de acoplamiento en varios escalones.
- Según como proporcionen el empuje se pueden dividir en turborreactores (propriadamente denominados) y turbohélices.

Turbohélices

Figura 20.



Un motor turbohélice es un sistema propulsivo formado por un turbo-reactor básico y una hélice arrastrada por una o varias turbinas movidas por la energía cinética de los gases en la expansión después de la combustión. El ciclo termodinámico es igual al del reactor puro sólo que en éste, la propulsión es el resultado de la reacción sobre la masa de gas acelerada, mientras que en el turbohélice el 90 por ciento se produce por medio de la tracción de la hélice y un 10 por ciento por la energía cinética de los gases que salen por la tobera.

La energía obtenida en un turbohélice, se puede expresar en forma de potencia transmitida al árbol de la hélice.

En la imagen podemos apreciar un motor de hélice Pratt & Whitney of Canada serie 100. En los aviones ATR 42 un turbo-reactor de doble eje empuja a una hélice de seis palas mediante un sistema reductor cuya regulación se controla electrónicamente. El diámetro de la hélice es de unos cuatro metros, dando el cien por cien de su potencia a 1.200 revoluciones y pesa unos 180 Kg.

Una de las características fundamentales de los motores turbohélice es su bajo consumo específico y habitualmente se adoptan para aeronaves de pequeño radio de acción. A velocidades pequeñas el rendimiento propulsivo de este motor es grande, pero presenta el inconveniente de que a alta velocidad del avión aparecen efectos que contrarrestan el aumento de dicho rendimiento.

La propulsión mediante hélice puede utilizarse hasta una velocidad determinada por encima de la cual sus actuaciones disminuyen en comparación con las del turbo-reactor. Un motor con hélice tiene mejores características en despegue y subida inicial mientras que sus actuaciones disminuyen en alta velocidad.

Ciclo de funcionamiento

El proceso al que somete el aire y a la mezcla de aire-combustible para el funcionamiento de las turbinas de gas y turbo-reactores corresponde al ciclo termodinámico de Brayton:

- Compresión adiabática
- Combustión a presión constante
- Expansión adiabática

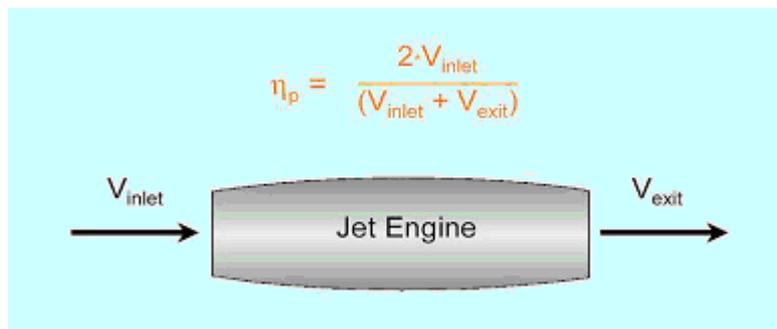
Estos procesos se emplean para producir trabajo neto y su posterior aprovechamiento como energía mecánica o eléctrica.

En un turbo-reactor de un solo compresor axial el ciclo de funcionamiento es el siguiente:

1. Se realiza la compresión del aire en el difusor de entrada debido a la presión dinámica proporcionada por el movimiento relativo del motor en el aire.
2. Se comprime el aire en el compresor mediante la aplicación del trabajo mecánico proporcionado por la turbina.
3. Se produce una combustión a presión casi constante.
4. Se produce una expansión del gas en la turbina o turbinas, captando la energía que se utiliza para mover el compresor.
5. Se produce la expansión del gas en la tobera de salida aumentando su velocidad y creando un gran incremento en la cantidad de movimiento, lo que se traduce en empuje.

El empuje en un motor a reacción

Figura 21.



La eficiencia en la propulsión de un motor a reacción podemos expresarla en términos de velocidad de entrada del aire antes del compresor (V_{inlet}) y velocidad de salida de los gases por la tobera (V_{exit}).

Así podríamos expresar la eficiencia en términos de comparación entre esas velocidades de la manera que aparece en la gráfica.

Se podría alcanzar una eficiencia del 100% si se pudieran igualar la velocidad de salida a la de entrada. Pero para que esto ocurriese la masa de aire que fluyera a través del motor debería ser infinita. Si bien esto no es factible en el mundo real, al menos indica que se consigue mayor eficiencia al aumentar la aceleración de una gran masa de aire en una cantidad discreta que en acelerar una pequeña masa de aire de manera elevada. Los modernos motores de gran índice de derivación obtienen una eficiencia más elevada acelerando grandes masas de aire de manera discreta por comparación con los reactores más antiguos de menor índice de derivación.

Si recordamos la tercera Ley de Newton “a toda acción se opone una reacción igual y de sentido contrario”, la acción de un motor reactor es la de acelerar una masa de gas e impulsarlo a través de la tobera. La reacción, igual y opuesta, será el empuje.

Si recordamos la segunda ley de Newton: $F = d(mv)/dt$ ($F = m \cdot a$ cuando m es constante), en términos de reactores podemos reescribir esta fórmula de la manera siguiente:

Figura 22. [17]

$$F = \frac{\dot{W}}{g} * (V_2 - V_1)$$

Donde:

F es la fuerza en libras

W es el flujo del gas en libras por segundo

G es la fuerza de la gravedad

V₁ es la velocidad inicial del gas en pies por segundo

V₂ es la velocidad final del gas en pies por segundo

Hemos transformado por tanto la inicial ecuación de F=m*a de manera que la fuerza será igual a la cantidad de flujo por unidad de tiempo multiplicada por el cambio en la velocidad. Para expresar la ecuación en términos más próximos a lo que ocurre en este tipo de motores tendremos que:

Figura 23. [18]

$$F_{net} = \left[\frac{\dot{W}_{air} + \dot{W}_{fuel}}{g} * V_{jetexhaust} \right] - \left[\frac{\dot{W}_{air}}{g} * V_{airplane} \right]$$

Donde:

F_{net} será el empuje del motor, empuje neto.

El primer término del primer paréntesis la masa total del flujo que sale por la tobera

V_{jetexhaust} es la velocidad de salida de los gases por la tobera

El primer término del segundo paréntesis representa al flujo de entrada

V_{airplane} la velocidad de la entrada de los gases al motor

Se denomina empuje neto porque tienen en cuenta la velocidad del avión y la de la entrada de aire. El empuje en términos absolutos será el representado en el primer término de la ecuación.

De esta ecuación se deduce que el empuje es función del flujo de entrada, de la mezcla de aire y combustible a través del motor y de la diferencia entre la velocidad de salida y entrada de los gases.

Figura 24. [19]

$$F = A_{exhaust} * (P_{exhaust} - P_{ambient})$$

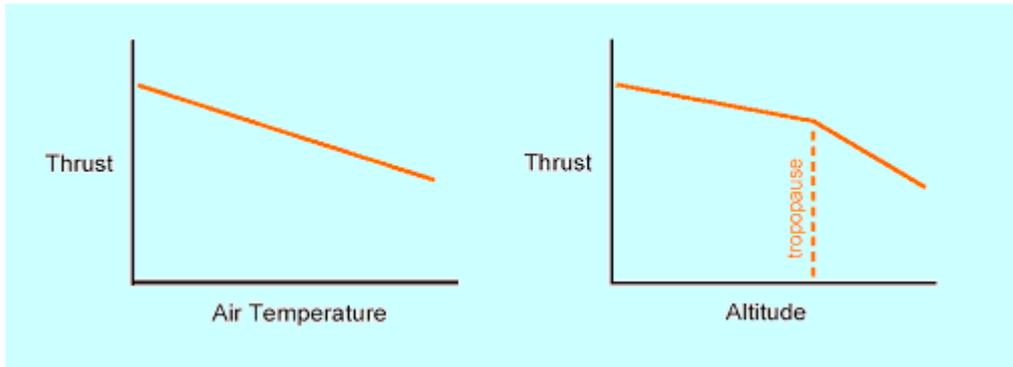
No obstante esta simplificación en la formulación del empuje ignora un componente más del empuje que es la presión en el interior del motor. La mayor parte de la presión en el interior del motor se convierte en velocidad de los gases de escape lo que produce un empuje adicional. Si en la salida la presión total de los gases es superior a la de entrada se produce un empuje extra. Si bien este componente es

pequeño comparado con el producido por la velocidad de los gases de escape no debe ser ignorado.

Existen una serie de factores que afectan al empuje y que mostraremos de manera somera.

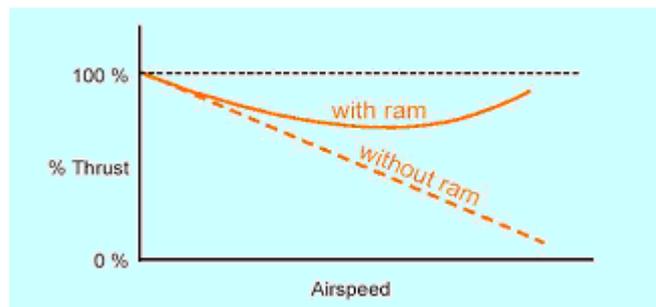
La densidad del aire, que es función de la temperatura y de la altitud de presión, es uno de los componentes que más significativamente afectan al empuje.

Figura 25.



La velocidad del avión afecta a la velocidad de entrada de los gases al motor y a la presión de entrada de los mismos. Cuando se incrementa la velocidad del avión se incrementa la velocidad de los gases de entrada, decreciendo el empuje a la vez que se comprime el aire en la entrada (ram effect) lo que incrementa el empuje por un incremento de la densidad. El efecto combinado lo podemos observar en la figura siguiente.

Figura 26.

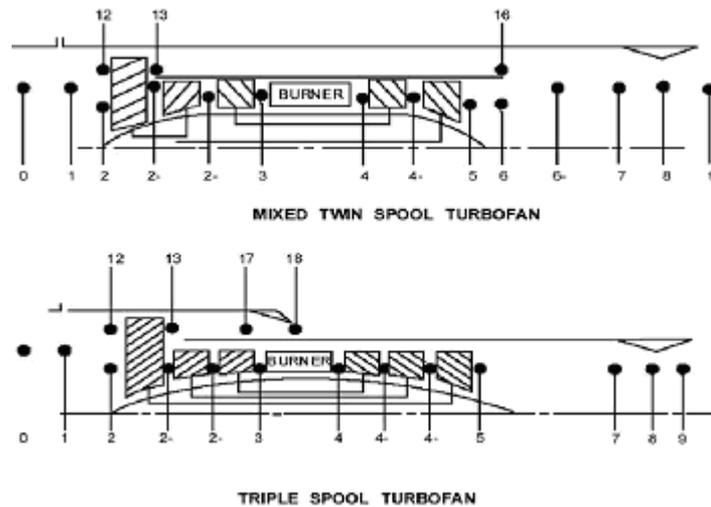


Existen otros efectos que afectan al empuje de manera negativa, como son los sangrados que se realizan para distintas funciones del mismo motor y del avión al que sustenta, la extracción de potencia para las bombas hidráulicas, los generadores eléctricos y las bombas de combustible, entre otros. Por último, la humedad es otro factor que afecta al empuje.

Las características de un motor, tal y como sale de fábrica, no son las mismas que cuando está instalado en un avión, ya que las pruebas que se realizan en fábrica utilizan un anclaje ideal mientras que el flujo de aire que le llega una vez instalado en un avión es distinto. En los test de fábrica, el motor no tiene necesidad de proporcionar energía eléctrica, hidráulica o neumática para su uso como cuando está instalado en un avión. En la gráfica siguiente se muestran los diferentes escalones en la sección transversal de un motor a reacción que se utilizan para la medición de presiones y temperaturas necesarias para el control del motor. Se hace referencia

habitualmente a las características específicas de la masa de aire en esas posiciones en valores de presión y temperatura.

Figura 27.



Elementos y sistemas de los turbo-reactores

Figura 28.



Los turbo-reactores han experimentado una enorme evolución desde sus inicios. Se han desechado los compresores centrífugos generalizándose el uso de los compresores axiales e incrementándose el número de escalones de compresor y de turbina.

La implementación de más de un eje coaxial ha permitido la creación de escalones independientes en la compresión y en las turbinas, que son supervisados de manera más exacta para proporcionar mejores niveles de eficiencia. Se ha producido una gran revolución en los ratios del flujo secundario consiguiéndose índices de derivación muy elevados (9:1 del GE-90B, que propulsa al Boeing 777).

Motor GE90-115 B

- Difusores de admisión

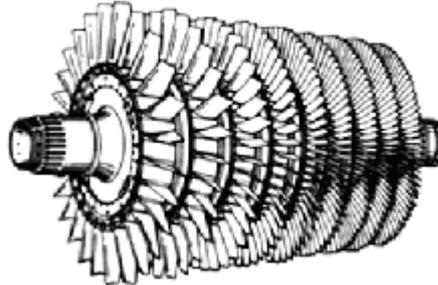
El sistema de admisión de aire en un motor de estas características debe canalizar el flujo de aire de manera correcta, libre de distorsiones, estable y capaz de transformar la mayor parte de la energía cinética en energía debida a la presión. La característica principal es la forma que adopta y depende de la situación del motor en el avión (próximo al fuselaje, debajo de las alas, en el cono de cola...etc).

- Compresores: centrífugos y axiales

Un compresor es, en esencia, una máquina que se encarga de comprimir el aire de entrada, reduciendo el espacio entre las moléculas de éste e incrementando su presión y temperatura. Los más utilizados en la industria aeronáutica, son los centrífugos y los axiales.

Figura 29.

**Nine Stages of a Compressor
Rotor Assembly**



Source: U.S. Federal Aviation Administration

Los compresores centrífugos fueron los primeros utilizados en los motores a reacción, eran más fáciles de fabricar y eran compatibles con la masa de aire que era necesario comprimir cuando la presión exigida no era muy elevada. Esencialmente están formados por el rotor, el difusor y el colector.

Los compresores axiales, por el contrario, son los más utilizados en los motores a reacción modernos debido a su configuración, elevado rendimiento y posibilidad de acoplamiento de varios escalones. A diferencia de los centrífugos, en los axiales la corriente de aire sigue una dirección sensiblemente paralela al eje del rotor, la velocidad radial es nula y el número de elementos básicos es menor. En este caso, constan de un rotor (imagen anexa) y un estator del motor.

La compresión del aire se produce en las sucesivas etapas del rotor y el estator. El aire que pasa a través del compresor aumenta su presión y temperatura. En los motores modernos existen dos y hasta tres etapas de compresor unidas cada una de ellas por un eje con su turbina correspondiente, produciéndose diversos grados de presión de aire en cada etapa. Usualmente se denomina N_1 al aire comprimido a baja presión y N_2 al de alta presión (N_3 en algunos casos). Es habitual realizar los sangrados de aire de alta presión para algunos sistemas y de baja presión para acondicionamiento del avión.

- Difusor post-compresor

Es la parte del motor comprendida entre la descarga de aire del compresor y las cámaras de combustión. Su misión es reducir la velocidad de salida del aire para facilitar la atomización del combustible con el aire en las cámaras.

- Cámaras de combustión

En ellas se produce el ciclo de combustión. El núcleo suele estar recubierto por un material cerámico, y la parte exterior por metales de gran resistencia. Tienen inyectores y llama para encender la mezcla. El aire que sale del compresor a alta velocidad y presión pierde velocidad en el difusor del compresor mezclándose con el combustible expulsado por los inyectores y encendiéndose con el calor producido por la llama o por la chispa de los sistemas de ignición.

- Turbinas

Son elementos situados a la salida de las cámaras de combustión y están formados por una serie de álabes cuyo número, tamaño e inclinación dependerá de los resultados que se quieran obtener. Giran a grandes velocidades, lo que requiere una correcta refrigeración. Aprovechan parte de la energía cinética de la mezcla expulsada de las cámaras de combustión y mediante ejes solidarios mueven los diferentes escalones del compresor.

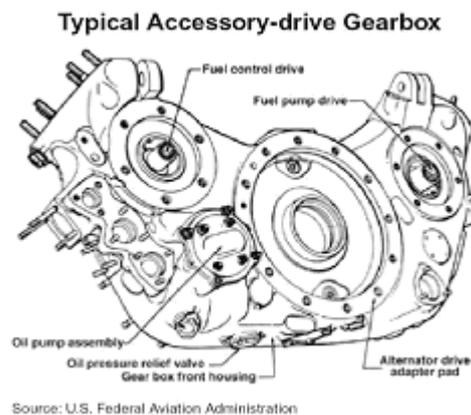
- Toberas de escape

Su función es la de evacuar los gases de salida con la mayor velocidad posible, por lo que su forma adquiere una importante relevancia, siendo las más eficientes las que expulsan los gases a mayor velocidad.

Sistemas auxiliares de motor

En todo motor turbo-reactor se encuentran una serie de elementos que ayudan al funcionamiento del mismo y otros que sirven a los diversos sistemas de la aeronave.

Figura 30.



Entre los sistemas típicos del motor encontramos la caja de transmisiones, los sistemas de combustible, de arranque, de lubricación, de encendido, de anti-hielo, de refrigeración, de conraincendios y de sangrado.

Además, como hemos indicado anteriormente, existen sistemas de las aeronaves alimentados o impulsados por la energía del motor. Los enunciaremos al finalizar este punto.

- **Caja de transmisión para los sistemas accesorios y sistemas del avión.** Situada normalmente, en la parte de abajo de los motores, existe una caja de transmisión engranada a uno de los ejes de los rotores de los compresores que impulsa, mediante desmultiplicaciones, a un gran conjunto de bombas y elementos auxiliares que son movidos mecánicamente. Algunos dan potencia a sistemas del avión y otros a sistemas del propio motor, tales como los de arranque de motor, bombas de combustible y controles de combustible del mismo.
- El **sistema de arranque** es el sistema que se encarga de hacer girar el rotor para que adquiera velocidad y se pueda iniciar el ciclo. Esta acción requiere gran potencia y puede ser realizada por motores eléctricos, turbinas de aire o turbinas de gas. Los más corrientes en la aviación comercial son las turbinas de aire y las

turbinas de gas, pudiendo adoptar estas turbinas la forma de grupos neumáticos instalados en tierra o motores a reacción denominados unidades de potencia auxiliar (APU). Además, el sistema de arranque puede ser utilizado para asistir, en caso de ser necesario, a un re-arranque del motor en vuelo.

- El **sistema de encendido** es el encargado de encender la mezcla en la cámara de combustión. Puede ser de corriente continua y gran cantidad de energía eléctrica, o de corriente alterna y pequeña cantidad de energía eléctrica. Para tener redundancia suficiente, los sistemas de ignición suelen tener dos cajas de ignición y dos bujías o sistemas de chispa.
- El **sistema de lubricación** tiene como objeto disminuir el rozamiento entre las piezas mecánicas, mejorar el rendimiento evitando calentamientos localizados y reducir el desgaste de las piezas. Habitualmente, el rotor de N1 tiene dos cojinetes al igual que el de N2. Dentro de este sistema existen bombas de aceite, depósitos, sistemas de recuperación, filtros, intercambiadores de calor (ceden calor al combustible), detectores de sobrecalentamiento, detectores de partículas y sistemas de drenaje.
- El **sistema de combustible** proporciona combustible a presión desde los tanques principales y, mediante bombas arrastradas por motor o bombas eléctricas, llevan el combustible hacia unos pulverizadores situados en las cámaras de combustión. Dentro de este sistema existen bombas, controles de presión, pulverizadores, filtros, intercambiadores de calor con el aceite, drenajes y sistemas de presurización. Todos estos componentes, excepto los pulverizadores, son externos al motor. En los turboreactores modernos existen controles de combustible dependientes de un sistema integrado de control de motor denominado FADEC, que veremos más adelante.
- El **sistema de protección anti-hielo**. Un turbo-reactor instalado en un avión que vuela a altitudes elevadas, necesita protección contra la formación de hielo en la admisión del motor y un método para deshacerlo en caso de que se forme. Estos motores están equipados con un sistema que, sangrando aire caliente y a presión del compresor, dirige un flujo de aire caliente hacia los conductos de entrada de aire en el motor a los planos y otras superficies para prevenir la formación de hielo y deshacer el que ya se hubiera formado. Normalmente, las tripulaciones tan sólo tienen la posibilidad de seleccionar el sistema en encendido o apagado, no pudiendo seleccionar gradualmente la intensidad del mismo. Este sistema reduce la masa de aire que pasa a través del motor para la reacción y, por tanto, reduce el empuje, por lo que el sistema se utilizará sólo en los momentos de necesidad.
- El **sistema de protección contra incendios**. El motor debe ser diseñado para que los conductos de combustible y de aceite que pasen cerca de la zona caliente del motor estén aislados cuidadosamente y que no puedan tener interferencias eléctricas. Los conjuntos y carenados del motor deben disponer de sistemas de drenaje para evacuar cualquier tipo de líquido inflamable. Los sistemas de protección contra incendios, por tanto, deberán disponer de sistemas para:
 - la prevención de incendios, mediante un diseño a prueba de fallos
 - la detección de incendios, formada por detectores dobles de manera que se minimicen las alarmas falsas debidas a vibraciones

- sistemas de contención de incendios, reduciendo estos a una zonas localizadas e impidiendo su propagación
- sistemas de extinción de incendios, mediante agentes extintores contenidos en acumuladores a presión situados en zonas alejadas a las de riesgo de incendios
- detectores de temperatura, como sistemas de alerta previa a los posibles incendios

Un elemento que también consume energía y cada vez más esencial en los motores modernos es un ordenador que controla todo el funcionamiento del mismo y que se denomina FADEC (Full Authority Digital Engine Control) ó EEC (Electronic Engine Control) según los distintos fabricantes. En esencia el FADEC es un ordenador que realiza la gestión completa del motor. Cada motor instalado en los aviones actuales cuenta con una de éstas unidades de control digital que tienen dos canales redundantes: uno activo y otro en modo de reserva. En el caso de fallo del canal activo, el sistema de reserva toma el control automáticamente. Este sistema electrónico, montado en la carcasa del fan del motor, posee una fuente de potencia interna por medio de un alternador magnético, recibe datos del avión -que se utilizan para la gestión del motor a través de unidades de interfaz denominadas EIU (Engine Interface Unit)-, realiza multitud de funciones de control de empuje, de sistema del avión y de vigilancia del mismo, y envía datos a otros sistemas del avión y a la compañía aérea.

Una degradación del funcionamiento del mismo causa en algunos casos penalizaciones importantes en el consumo de combustible. Por contra con su ayuda la utilización de las características del avión (performance) a los distintos niveles de vuelo se acerca al óptimo.

3.2. Sistemas de las aeronaves

En la práctica, la mayor parte de los sistemas de la aeronave consumen energía procedente de los motores. A continuación comentaremos brevemente los diversos sistemas del avión y cómo son alimentados.

Los sistemas de la aeronave se clasifican por capítulos según una codificación de la Asociación de Transporte Aéreo (ATA). De este modo, todas las aeronaves tienen sus sistemas divididos según esta codificación, lo que aparece en todos los manuales de las aeronaves.

- El **ATA 21** hace referencia a los sistemas de **aire acondicionado, presurización y ventilación**. Estos sistemas operan con aire sangrado de baja y alta presión del compresor del motor. Tiene múltiples válvulas de control de flujo de aire, válvulas de regulación, sistemas de control y supervisión, válvulas de descarga de aire al exterior, válvulas de seguridad, válvulas de sobre presión y de presión diferencial negativa. La regulación se realiza mediante señales eléctricas y muchos de esos procesos son automáticos, teniendo algunos sistemas de reversión manuales. Mediante estos sistemas del ATA 21 se controla tanto la calidad y cantidad del aire a bordo, como el acondicionamiento en temperatura y humedad así como la presurización de la aeronave en todas las cabinas (de pilotos, de pasajeros y bodegas de carga).
- El **ATA 22** versa sobre el **vuelo automático** y todos los sistemas a bordo que lo hacen posible. Las aeronaves modernas tienen sistemas de ordenadores que

asisten a los tripulantes técnicos en la conducción segura y automatizada del vuelo. Dentro de estos sistemas se encuentran los FMS (Flight Management System) y FMGS (Flight Management and Guidance System). Tienen interfaces de presentación para los pilotos, modos automáticos y manuales, realizan predicciones de navegación, ruta, gestión de combustible, gestión del centro de gravedad, detección de elementos peligrosos para la navegación, de niveles de exactitud en la precisión de la navegación -tanto vertical como horizontal-, de optimización del vuelo, de selección de rutas primarias y alternativas, y de predicciones a campos alternativos con sus características y datos para el aterrizaje, etc. Tienen conexiones con determinados sistemas del avión para captar informaciones de altimetría, velocidad, peso, sensores de posicionamiento y navegación, etcétera. Los FMS/FMGS generan datos de salida a instrumentos para la tripulación técnica, para la tripulación auxiliar y pasajeros, así como para los sistemas de control de tráfico aéreo y para las unidades en tierra que realizan el seguimiento a distancia de los vuelos de cada compañía.

- El **ATA 23** recoge todas las **comunicaciones** a bordo de las aeronaves, tanto internas como externas. Las comunicaciones hacia el exterior tanto en VHF (Very High Frequency), como en HF (High Frequency), los sistemas de comunicación -de voz y de datos-, vía satélite y los registradores de datos de vuelo y de comunicaciones, así como los sistemas de emergencia y de seguimiento y control de la operación (ACARS: ARINC Communications Addressing And Reporting System, conocido también en Europa como AIRCOM, es un sistema digital de transmisión de datos que permite el intercambio de datos y mensajes entre un avión y un centro de operaciones con base en tierra). La energía necesaria para la operación de todos los equipos de este ATA, se obtiene de las barras de corriente continua y alterna del sistema eléctrico del avión.
- El **ATA 24** engloba todo el **sistema eléctrico** de una aeronave, tanto la generación eléctrica a bordo, como las conexiones de la aeronave con fuentes de energía externa. En la mayor parte de las aeronaves comerciales existe un generador de corriente alterna arrastrado por cada uno de los motores. Además de estos, existen otros generadores auxiliares como el de la APU, otros de emergencia accionados por hélices desplegadas o por potencia hidráulica. Todos los sistemas eléctricos del avión son abastecidos desde las barras de corriente alterna conectadas a los generadores o desde las barras de corriente continua alimentadas a su vez por las anteriores mediante transformadores. La corriente sufre multitud de transformaciones para acomodarse a las necesidades específicas de cada elemento e instrumento instalado a bordo.
- El **ATA 26** trata de los **sistemas de protección contra incendios** instalados en toda la aeronave, tanto en motores y APU como en los compartimentos de aviónica, lavabos, bodegas, sistemas de entretenimiento de los pasajeros y los alojamientos del tren de aterrizaje. La mayor parte de este sistema tiene controles eléctricos que dependen del sistema eléctrico del avión.
- El **ATA 27 mandos de vuelo**. Los mandos de vuelo de los aviones modernos son accionados mecánica o eléctricamente, y movidos mediante martinets hidráulicos y eléctricos. Los modernos aviones con sistemas de control "Fly by Wire" suelen estar controlados eléctricamente y actuados hidráulicamente. Algunos de sus elementos pueden ser controlados también mecánicamente. En estos casos no existe control directo de los pilotos sobre las superficies de mando, ya que las acciones de estos sobre los mandos son interpretadas por los

ordenadores que mueven los mandos de vuelo como sea necesario para seguir las órdenes del piloto. En algunos modelos de avión (Airbus), existen unas denominadas “leyes de vuelo” que proporcionan protecciones en la envolvente de vuelo del avión, evitan maniobras excesivas y acciones que sobrepasen los límites de seguridad, cualesquiera que sean las acciones de los pilotos. Con los sistemas del ATA 27 se mueven las superficies aerodinámicas del avión (alergones, timón de dirección, timón de profundidad), o elementos estructurales como el estabilizador horizontal de cola o superficies hipersustentadoras, de borde de ataque (Slats), o de borde de salida (Flaps). Se accionan, además, otras superficies que sirven para control y coordinación de viraje (Spoilers) y los aerofrenos.

- El **ATA 28** hace referencia al **sistema de combustible** del avión. El almacenamiento del combustible en los aviones se realiza habitualmente en los planos. En algunos aviones con determinadas cargas de combustible se llenan también depósitos en la parte central del fuselaje junto a los planos y en el estabilizador horizontal de cola. Este sistema utiliza energía eléctrica neumática y mecánica de los motores para su funcionamiento; almacena, controla y suministra el combustible a los motores y al APU; realiza transferencias de combustible para controlar el centro de gravedad del avión; controla el sistema de repostado, hace recircular el combustible en intercambiadores de calor aceite/combustible y, en algunos aviones, permite el lanzamiento de combustible al exterior para una rápida reducción de peso en caso de contingencia o emergencia.
- El **ATA 29** contempla el sistema hidráulico del avión. Este sistema dotado de bombas, depósitos, tuberías de transmisión de líquido hidráulico a presión y actuadores, obtiene su energía de bombas accionadas por los motores y bombas eléctricas auxiliares. La presión nominal de funcionamiento es de 3.000 psi (libras por pulgada cuadrada), casi de manera generalizada. Habitualmente se utiliza para actuación de mandos de vuelo, tren de aterrizaje, frenos, etcétera. En algunos aviones en fase de certificación tales como el Boeing 787, en aras de la eficiencia de combustible y de restar menos carga a la caja de engranajes del motor, se están sustituyendo las bombas hidráulicas actuadas por el motor por otras de actuación eléctrica.

Hasta aquí, hemos desarrollado, de manera individualizada, los sistemas que mayor consumo de energía presentan. Sin embargo, existen otros muchos sistemas, con sus capítulos ATA correspondientes, que también consumen energía, los cuales mencionaremos de manera somera a continuación:

- El **ATA 30** trata de los sistemas de protección contra hielo y lluvia. Utilizan energía del aire sangrado a presión de los motores y energía eléctrica.
- El **ATA 31** instrumentos de vuelo, que utilizan esencialmente energía eléctrica, tanto alterna como continua de características diversas.
- El **ATA 32** tren de aterrizaje, que utiliza energía hidráulica y eléctrica para la operación de los ciclos de salida y entrada del tren, así como para los frenos y los controles de accionamiento y supervisión.
- El **ATA 33** trata de las luces tanto internas como externas, utilizando esencialmente energía eléctrica.

- El **ATA 34** recoge todos los elementos de navegación y utiliza básicamente energía eléctrica aunque recibe información de instrumentos estáticos (sondas estáticas utilizadas para altimetría etc), y de presión dinámica (sondas pitot) y de sondas de temperatura eléctricas.
- El **ATA 35** controla el oxígeno a bordo, tanto de pasajeros como de tripulantes, y utiliza energía eléctrica para su activación y control.
- El **ATA 36** hace referencia al sistema neumático del avión. Controla los sangrados de motores y APU, así como los de los equipos auxiliares de tierra. Esencialmente utiliza energía eléctrica para el control y la supervisión. Pese a ser un sistema discreto, sangra potencia del motor para entregarlas a otros sistemas que son consumidores de aire como los de anti hielo, ventilación, presurización y acondicionamiento. En algunos aviones modernos (Boeing 787) se están sustituyendo los sangrados de motor por compresores operados eléctricamente.
- El **ATA 38** actúa sobre las aguas y residuos a bordo. Utilizan aire a presión y energía eléctrica.
- El **ATA 49** trata de las unidades de energía auxiliar (APU). Genera energía eléctrica y neumática como veremos a continuación.
- El **ATA 52** lo hace de las puertas, que utilizan energía eléctrica y pequeños martinets neumáticos.
- El **ATA 70** es, dentro de los sistemas de una aeronave, el que se ocupa de los motores.

Mención aparte merecen las Unidades de energía auxiliar (APU) del ATA 49. Normalmente situadas en un compartimento en el cono de cola de los aviones, las unidades de energía auxiliar -que son esencialmente un motor a reacción-, están concebidas para proporcionar energía eléctrica y neumática en las fases iniciales anteriores al vuelo que sirvan para el arranque de los motores, suministro de aire a presión para utilizaciones varias dentro del avión y para mover accesorios hidráulicos o eléctricos. El arranque del APU se hace habitualmente mediante un motor eléctrico integrado en la misma unidad con energía procedente de las baterías del avión o de una fuente externa. En ocasiones se arrancan en vuelo para proporcionar energía eléctrica y neumática para arranque de motores o para usos varios a bordo del avión.

En la actualidad está ganando una importancia esencial en el transporte aéreo, y es causa de competencia entre las compañías, el sistema de entretenimiento al pasaje que genera un consumo, habitualmente de energía eléctrica, considerable. En algunas aeronaves el IFE (In Flight Entertainment System) tiene controles y cabinas separadas de actuación en la cabina de pasaje.

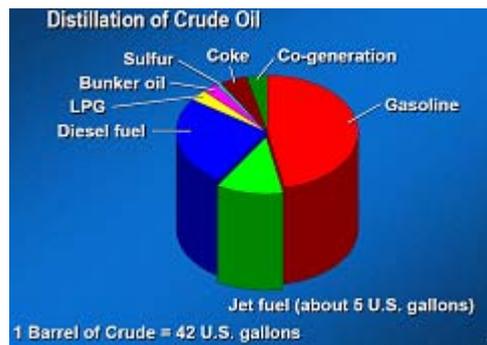
Otro de los elementos de elevado consumo de energía eléctrica son los sistemas de los Galleys o cocinas a bordo utilizados por los tripulantes auxiliares para la atención de los pasajeros y tripulación.

3.3. Combustibles y lubricantes

Aunque la cadena de distribución de los combustibles de aviación ya ha sido documentada traeremos aquí solo algunas de las características específicas de este tipo de combustibles siguiendo un esquema y presentación de la compañía Boeing (Jet Fuel Characteristics. Performance Engineering Operations. May 2002).

De cada barril de crudo que entra en la refinería apenas un 11,9 % se destina al consumo como combustible para reactores.

Figura 31.



Hay, como sabemos, dos tipos fundamentales de combustibles para aviación la gasolina de aviación (AvGas) y los combustibles para reactores de aviación.

La gasolina de aviación la utilizan los motores de émbolo, tienen un octanaje que varía entre los 80/87, 100/13, 115/145 e incorpora colorantes rojos, azules y púrpuras. La especificación comercial de los mismos es ASTM D 910.

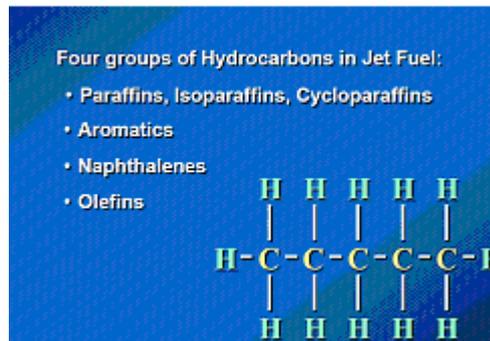
Los combustibles comerciales más utilizados son el queroseno (Jet A-1) en la aviación civil, y el JP-4 en la militar.

En la aviación civil está generalizado el uso del combustible Jet A-1, aunque también existe uno denominado Jet B (denominado Wide Cut) que, debido a su composición más ligera, es más peligroso de manejar y está restringido, casi exclusivamente, a regiones en las que las extremadamente bajas temperaturas lo hacen necesario.

El queroseno es un producto obtenido de la destilación del petróleo en la gama de 177 a 266 °C; tiene un peso específico medio de 0,8363 (densidad a 15 °C: 0,8075 Kg/l); un poder calorífico de 10.133 Kcal/Kg; el punto de congelación a -47 °C; y una temperatura máxima de combustión de 980 °C; el punto de auto-ignición está a 210 °C; el punto de inflamación a 38 °C.

La composición química la podemos apreciar en la figura siguiente.

Figura 32.



Este combustible contiene un gran número de aditivos, entre otros, antioxidantes, agentes antiestáticos, inhibidores de la corrosión, inhibidor de la congelación y bactericida.

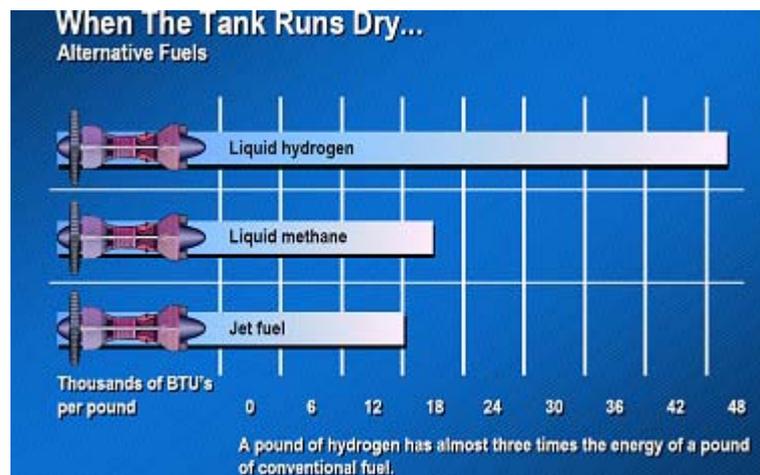
Los motores reactores para usos militares utilizan combustibles del tipo JP. El que más se asemeja al combustible utilizado en la aviación civil es el JP-8. El JP-4 es similar al Jet B civil. Existen otros como el JP-5 (punto de ignición más alto), JP-6 y JP-7 desarrollados para aviones específicos.

En algunos aeropuertos hay suministradores que disponen de gasolina para aviación de 100 octanos, que podría utilizarse -en pequeñas cantidades-, para la aviación comercial. Su uso está generalizado en la aviación general y de trabajos aéreos en aquellas aeronaves que utilizan motores de explosión.

En la actualidad se están estudiando nuevos combustibles, derivados del petróleo, con menores emisiones de gases nocivos para el medio ambiente y realizando pruebas con algunos biocombustibles. Aunque existe un creciente interés en el uso de los biodiesel para su uso aeronáutico y del desarrollo de motores de hidrógeno, no se ha generalizado el uso de estos combustibles ni se han adaptado los motores para el funcionamiento con los mismos. Habrá que esperar casi una década para ver desarrollos efectivos en este campo. No obstante se repiten las experiencias que resultan muy mediáticas en vuelos de prueba con aeronaves comerciales, sin pasaje, como el realizado por un B-747 de Virgen Atlantic, desde Londres a Ámsterdam, en el que se usó, en uno de sus motores, una mezcla del 20% de aceites de coco y de babasu a finales de febrero de 2008 y la de un vuelo de 20 minutos de avión experimental muy ligero (un solo piloto) en Ocaña realizado por un equipo de Boeing con un motor de pila de hidrógeno en abril de 2008.

Según el estudio de Boeing algunas alternativas tienen una capacidad triple en la generación de energía por unidad quemada en comparación con los combustibles fósiles actualmente utilizados.

Figura 33.



En cuanto a los lubricantes, se ha producido un desarrollo diferenciado de los iniciales, que compartían características con los usados en los motores alternativos. Los lubricantes utilizados hoy en día son lubricantes sintéticos que proporcionan un óptimo funcionamiento de los motores con un control exhaustivo de los depósitos, manteniendo los sistemas de aceite limpios, extendiendo la vida útil de los motores y sus accesorios y reduciendo las paradas para su mantenimiento. Se utilizan aceites de baja viscosidad para vuelos a gran altura y bajas temperaturas y otros, de baja volatilidad, para bajas condiciones de presión y altas temperaturas de funcionamiento. Constan esencialmente de una base formada por aceites sintéticos, a las que se añade un paquete de aditivos químicos que les permiten un funcionamiento efectivo desde los -40°C hasta los 204°C .

3.4. La combinación motor-avión

No todos los aviones de la misma casa constructora montan en sus alas los mismos motores. Cada compañía aérea escoge el proveedor que considera más adecuado y obtiene un trato diferenciado del mismo. Así, cada fabricante determina un listado de motores que han sido certificados para cada aeronave y las compañías escogen los que mejor se adaptan a sus líneas de negocio.

Traeremos aquí como ejemplo sacado de un página del ATA 70 Motor de una aeronave Boeing 777 con los motores que puede montar y la característica más notable de los mismos su empuje en libras a potencia de despegue y a nivel del mar.

Tabla 1.

Pratt and Withney	General Electric	Rolls Royce Trent
PW 4074 (74,500)	GE90-76B (76,000)	RR Trent 875 (73,400)
PW 4077 (77,200)	GE90-77B (77,400)	RR Trent 877 (76,900)
PW 4084 (84,000)	GE90-85B (85,000)	RR Trent 884 (84,000)
PW 4090 (90,000)	GE90-90B (90,000)	RR Trent 892 (90,000)
PW 4098 (98,000)	GE90-94B (94,000)	RR Trent 895 (93,400)
	GE90-110B1 (110,000)	
	GE90-115B (115,000)	

En este caso los motores Pratt and Withney y los General Electric (GE) son reactores de doble rotor axial de alta compresión e índice de derivación. El rotor de N1 consiste en un fan, una sección de compresor de baja presión y una sección de turbina de baja presión en un eje común. En el otro eje encontramos el rotor de N2 con una sección de compresor de alta presión y una turbina de alta presión. Ambos ejes son mecánicamente independientes.

Los motores Rolls Royce Trent certificados para este avión son turbo-reactores de triple rotor axial de alta compresión y elevado índice de derivación. El rotor de N1 consiste en un fan y una turbina de baja presión. El rotor de N2 está compuesto por una sección de compresor intermedia y una turbina también intermedia en un eje común mientras que el N3 engloba al compresor de alta y la turbina de alta en un mismo eje.

Todos estos motores son controlados por un EEC (FADEC) cada uno que controla el empuje automático y los inputs de la tripulación a través de los mandos de gases para controlar automáticamente los motores.

Mientras que en los aviones actuales la compañía que quiere operarlos debe indicar al fabricante qué motor ha escogido y el producto, una vez salido de fábrica, no suele cambiar en la combinación avión-motor, algunos aviones de última generación (B-787) están diseñados para que las compañías puedan cambiar a voluntad durante la vida útil del mismo el proveedor de motores, entre todos los certificados para ese avión, con mínimos cambios.

4. VUELO AUTOMÁTICO Y SISTEMAS DE GESTIÓN Y CONTROL

Antes de comenzar a desarrollar los elementos que hacen factible el vuelo automático estableceremos las distintas fases en las que podemos dividir un vuelo y qué entendemos por las características específicas en las actuaciones de una aeronave (performance).

4.1. Fases del vuelo

A la hora de determinar las fases en las que se divide un vuelo, desde la puesta en marcha de los motores hasta que la aeronave se detiene en el aparcamiento y cesa la actividad dentro de la misma desenergizando por completo sus sistemas, nos encontramos con al menos dos clasificaciones en virtud de que se hable de un vuelo ordinario desde un aeropuerto a otro sin incidencias y la clasificación a la que han llegado los equipos de Seguridad de la Aviación Comercial y la OACI para definir de manera inequívoca las fases de un vuelo a la hora de estudiar, explicar y difundir recomendaciones de seguridad para cada una de esas fases del vuelo ya sea normal o con incidencias.

4.1.1 Definiciones de uso común

Para evitar duplicidades y extensión en los contenidos de esta sección tan solo describiremos las fases al uso en un vuelo ordinario dejando las definiciones de las mismas para el apartado siguiente en el que el objetivo es una definición comúnmente aceptada para diferenciar las diferentes fases en los estudios de seguridad con lo que se incluyen fases de vuelo común aumentadas con algunas que se presentan tan solo en ocasiones de incidencias o emergencias.

Una descripción de las fases de un vuelo común podría ser:

- Inspección interior y exterior y preparación de cabina
- Puesta en marcha de motores.
- Remolque hacia atrás
- Rodaje
- Alineamiento en pista
- Despegue
- Ascenso
- Crucero
- Descenso
- Aproximación
- Aterrizaje
- Rodaje

- Parada de motores
- Listas de desenergización del avión

4.1.2 Definiciones de seguridad en la aviación civil

La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) y el Equipo de Seguridad de la Aviación Comercial (CAST), que incluye funcionarios gubernamentales y dirigentes de la industria aeronáutica han constituido conjuntamente el Equipo de Taxonomía Común CAST/OACI (CICTT). Al equipo se le encargó elaborar taxonomías y definiciones comunes para los sistemas de informes de accidentes e incidentes de aviación. Las taxonomías y definiciones comunes están dirigidas a mejorar la capacidad de la comunidad aeronáutica para enfocarse en temas comunes de seguridad. El CICTT incluye expertos de varias aerolíneas, fabricantes de aeronaves, fabricantes de motores, asociaciones de pilotos, autoridades reguladoras, juntas de seguridad de transporte, la OACI, y miembros del Canadá, de la Unión Europea, de Francia, Italia, Japón, Holanda, del Reino Unido, y de los Estados Unidos de América. El CICTT está presidido conjuntamente por un representante de la OACI, y la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio de los Estados Unidos de América (representando al CAST).

La intención de este trabajo de normalización no es que los gobiernos, organizaciones internacionales y corporaciones cambien inmediatamente los sistemas de datos o definiciones existentes sino la de proporcionar taxonomías y definiciones ‘meta’ que, a medida que las organizaciones vayan planeando y poniendo en práctica nuevos sistemas de seguridad, vayan siendo adoptadas.

Entre las definiciones de las Fases del Vuelo que aparecen a continuación se incluyen fases operacionales amplias de un vuelo ordinario más otras “Desconocidas”. La mayoría de las fases tienen sub-fases. Las organizaciones que usan estas definiciones pueden usar las fases amplias, las sub-fases más detalladas o una combinación de las dos. Esta versión está enfocada a la operación de aeronaves de alas fijas terrestres y aeronaves de alas rotatorias (helicópteros, etc.).

Para propósitos de este documento, fase de vuelo se refiere a un período dentro de un vuelo. El vuelo comienza cuando cualquier persona aborda una aeronave con la intención de volar y continúa hasta el momento en que todas las personas han desembarcado. [OACI Anexo 13]

Fase de parada (STD)

Antes del empuje o rodaje o después de la llegada, en la puerta, la rampa o el área de estacionamiento, mientras la aeronave está estacionada.

Esta fase de vuelo incluye las siguientes sub-fases:

- Motor(es) no Funcionando
- Arranque de motor(es)
- Motor(es) Funcionando
- Apagado de motor(es)

Notas de uso: Se considera apagado del motor desde el comienzo de la secuencia de apagado hasta que el motor cesa de girar.

Fase de Empuje en retroceso/remolque (PBT)

La aeronave está en movimiento en las áreas de puerta de salida, rampa, o estacionamiento, ayudada por un vehículo de remolque [remolcador].

Esta fase de vuelo incluye las siguientes sub-fases:

- Motor(es) no Funcionando, con ayuda
- Arranque de Motor(es), con ayuda
- Motor(es) Funcionando, con ayuda
- Apagado de Motor(es), con ayuda

Notas de uso: El movimiento sin ayuda en el área de la puerta o la rampa se incluye en la fase de RODAJE. Se considera apagado del motor desde el comienzo de la secuencia de apagado hasta que el motor cesa de girar.

Fase de Rodaje (TAXI)

La aeronave se mueve sobre la superficie del aeródromo con fuerza propia antes de despegar o después de aterrizar.

Esta fase de vuelo incluye las siguientes sub-fases:

- **Rodaje hacia la Pista:** Empieza cuando la aeronave comienza a moverse con su propia potencia alejándose de la puerta, rampa, plataforma, o área de estacionamiento y termina al llegar a la pista de aterrizaje.
- **Rodaje a la Posición de Despegue:** Desde que entra a la pista hasta que llega a la posición de despegue.
- **Rodaje desde la Pista:** Empieza al salir de la pista de aterrizaje y termina al llegar a la puerta, rampa, plataforma, o área de estacionamiento, cuando la aeronave deja de moverse por su propia potencia.

Notas de uso: En este documento, el término pista o área de aterrizaje es utilizado en su sentido más amplio e incluye pistas de aterrizaje, pistas sin pavimentar, vías fluviales, áreas de aterrizaje sin afirmar, y plataformas de aterrizaje, (que pueden incluir plataformas en alta mar, techos de edificios, caminos, barcos, y campos), u otras áreas designadas para aterrizar.

Rodaje incluye rodaje aéreo para aeronaves de alas giratorias.

Fase de Despegue (TOF)

Desde la aplicación de potencia de despegue, durante la rotación y hasta una altitud de 35 pies por encima de la elevación de la pista.

Esta fase de vuelo incluye las siguientes sub-fases:

- **Despegue.** Desde la aplicación de potencia de despegue, durante la rotación y hasta una altitud de 35 pies por encima de la elevación de la pista o hasta selección de tren a posición de retraído, lo que ocurra primero.
- **Despegue Abortado.** Durante el despegue, desde el punto donde la decisión de abortar ha sido tomada hasta que la aeronave comienza a rodar fuera de la pista.

Nota de uso: Un aterrizaje forzoso durante la operación de una aeronave de alas giratorias es considerado un despegue rechazado (abortado).

Fase de Ascenso Inicial

Desde el final de la sub-fase de Despegue hasta la primera reducción de potencia prescrita, o hasta alcanzar los 1000 pies por encima de la elevación de la pista o del circuito VFR, lo que ocurra primero.

Fase En Ruta (ENR)

Diferenciaremos aquí dos tipos en virtud del vuelo que se realiza: un vuelo por referencia a los instrumentos sean cuales sean las condiciones atmosféricas o un vuelo que se realice mediante reglas de vuelo visual.

- **Reglas de Vuelo por Instrumentos (IFR):** Desde que se termina el Ascenso Inicial pasando por la altitud de crucero hasta la conclusión del descenso controlado a la Posición Inicial de la Aproximación (IAF).
- **Reglas de Vuelo Visual (VFR):** Desde la conclusión del Ascenso Inicial, pasando por crucero y descenso controlado a la altitud del circuito VFR o a 1000 pies por encima de la elevación de la pista, lo que suceda primero.

Esta fase de vuelo incluye las siguientes sub-fases:

- **Ascenso a Crucero:** IFR: Desde la conclusión del Ascenso Inicial hasta llegar a la altitud inicial de crucero asignada. VFR: Desde la conclusión del Ascenso Inicial a la altitud crucero inicial.
- **Crucero:** Cualquier segmento de vuelo horizontal después de alcanzar la altitud crucero inicial hasta comenzar el descenso al punto de destino.
- **Cambio del Nivel de Crucero:** Cualquier ascenso o descenso durante el crucero después del ascenso inicial a crucero, pero antes del descenso al punto de destino.
- **Descenso:**
 - IFR: Descenso desde crucero hasta la Posición Inicial de la Aproximación (IAF) o de entrada al circuito VFR.
 - VFR: Descenso desde crucero hasta entrar al circuito VFR o 1000 pies por encima de la elevación de la pista, lo que suceda primero.
 - **Espera:** Ejecución de una maniobra predeterminada (usualmente un circuito de pista de carrera oval) que mantiene a la aeronave dentro de un espacio aéreo específico mientras espera autorización adicional. El descenso durante la espera está incluido en esta sub-fase.

Fase de Maniobras (MNV)

Operaciones a baja altitud/vuelo acrobático

Esta fase de vuelo incluye las siguientes sub-fases:

- **Acrobacia Aérea:** Cualquier maniobra intencional que exceda los 30 grados de ángulo de inclinación longitudinal, los 60 grados de inclinación lateral, o ambos, o la aceleración anormal (generalmente asociada con exhibiciones aéreas, vuelos militares, o con vuelos de entrenamiento afines).

- **Vuelo a baja altitud:** El vuelo intencional a baja altitud no relacionado con un aterrizaje o despegue, usualmente en preparación para o durante tareas de observación, demostración, trabajos de fotografía, aplicación aérea, adiestramiento, excursiones, demostración ostentosa, u otra actividad similar. Para aeronaves de alas giratorias, esto también incluye vuelo estacionario (no asociado con aterrizaje o despegue) y maniobrar cargas externas.

Fase de Aproximación

- **Reglas de Vuelo por Instrumentos (IFR):** Del punto de Posición Inicial de la Aproximación (IAF), hasta el comienzo del alineamiento para aterrizar.
- **Reglas de Vuelo Visual (VFR):** Del punto de entrada al circuito VFR, o 1000 pies por encima de la elevación de la pista hasta el comienzo del alineamiento con la pista para aterrizar.

Esta fase de vuelo incluye las siguientes sub fases:

- **Aproximación Inicial (IFR):** De la IAF a la Posición Final de la Aproximación (FAF).
- **Aproximación Final (IFR):** Desde la FAF hasta el comienzo del alineamiento para aterrizar.
- **Patrón de Circuito - Viento de Cola (VFR):** La trayectoria de vuelo (normalmente 1,000 pies sobre la pista) que comienza en ángulo recto con el extremo de salida de la pista y corre paralela a la pista en dirección opuesta al aterrizaje, y termina al iniciar el giro hacia el tramo base.
- **Patrón de Circuito - Base (VFR):** Del comienzo de la vuelta al terminar el tramo de viento de cola hasta el comienzo de la vuelta final.
- **Patrón de Circuito - Final (VFR):** Desde el comienzo de la vuelta para interceptar el eje extendido de la pista, normalmente al final del tramo base, hasta el comienzo del enderezamiento para aterrizar. Incluye aproximaciones directas VFR.
- **Patrón de Circuito - Viento cruzado (VFR):** Una trayectoria de vuelo del patrón de tráfico VFR, que es perpendicular a la pista de aterrizaje, cruza el extremo de salida de la pista y se conecta con el tramo de viento de cola.
- **Aproximación Frustrada/Abortar aterrizaje:** Desde la primera aplicación de potencia luego que la tripulación decide ejecutar una aproximación frustrada o abortar el aterrizaje, hasta que la aeronave vuelve a entrar en la secuencia de un patrón VFR (abortar aterrizaje) o hasta que la aeronave alcance la IAF para otra aproximación (IFR)

Nota de uso: Un procedimiento de espera realizado en la IAF se incluye en la fase EN RUTA

Fase de Aterrizaje (LDG)

Desde comienzo del alineamiento en final para aterrizar hasta que la aeronave sale de la pista de aterrizaje o se detiene en la pista; o cuando se aplica potencia para despegar en el caso de aterrizajes con “toma y despegue”.

Esta fase de vuelo incluye las siguientes sub-fases:

- **Enderezamiento para aterrizar:** Transición de la posición morro-bajo a morro-alto inmediatamente antes de aterrizar, hasta el momento de tocar el suelo.
- **Recorrido de Aterrizaje:** Después del momento de tocar el suelo hasta que la aeronave salga de la pista de aterrizaje, o se detenga, lo que ocurra primero.

Nota de uso: Para aeronaves de alas giratorias, incluye tanto aterrizajes verticales como horizontales.

Las fases que se enuncian a continuación se utilizan únicamente para fines de evaluación y estudios de seguridad.

Fase de Descenso de Emergencia

Un descenso controlado durante cualquier fase en el aire en respuesta a una situación percibida de emergencia.

Descenso fuera de control

Un descenso durante cualquier fase en el aire en la cual la aeronave no mantiene el vuelo controlado.

Fase Post-impacto

Cualquier porción del vuelo que ocurre después del impacto con una persona, objeto, obstáculo o terreno.

Nota de uso: Aunque no se trata de una Fase de Vuelo en sí, esta fase ha sido agregada para permitir una secuencia exacta de reconstrucción del evento en el caso de sucesos. Por ejemplo, incendiarse después del impacto.

Fase Desconocida (UNK)

Fase de vuelo que no figura en la información disponible.

4.2. Performance de una aeronave

En los manuales de vuelo de un avión se contemplan capítulos que determinan, de manera precisa mediante gráficas y tablas, las determinadas actuaciones del un avión (performance) en todo tipo de circunstancias y fases del vuelo.

Así existen, en la parte denominada de performance de una aeronave (habitualmente en el Manual de Operaciones parte B capítulo 4 o en el FCOM Flight Crew Operations Manual) las denominadas:

- Performance de certificación
- Operaciones Especiales
- Performance en Vuelo
- Performance con un motor inoperativo
- Performance con dos motores inoperativos (en el caso de tener más de dos)
- Limitaciones de peso en aeropuertos.

4.2.1 Performance de certificación

Una aeronave, para poder conseguir un certificado de aeronavegabilidad, debe realizar en su fase de prueba (aeronaves que se construyen a partir de un diseño, en un número indeterminado que suele ser superior a cuatro unidades, para demostrar todas las especificaciones que aparecerán posteriormente en los manuales de las aeronaves de línea) una serie de vuelos en todo tipo de circunstancias para probar, en vuelos y pruebas estáticas y dinámicas reales la resistencia y las actuaciones del mismo en todo el rango de temperaturas, presiones, altitudes y condicionantes meteorológicos.

De acuerdo con el certificado de aeronavegabilidad expedido por la Autoridad Aeronáutica (DGAC en España), un avión está autorizado a despegar de cualquier aeropuerto siempre que su peso total le permita cumplir con las performance de despegue, en ruta y aterrizaje que se incluyen en el capítulo de performance de certificación. Para estas actuaciones se considera que la atmósfera de comporta según lo establecido en la convencional Atmósfera Estándar Internacional, que las performance se consideran relativas a maniobras con velocidad de pérdida a 1 g de aceleración, que la velocidad del viento se mide a una altura de 10 metros sobre la pista y que se respetan las limitaciones que aparecen en el capítulo correspondiente.

Así de manera tabular, gráfica y ordenada se explicitan las actuaciones del avión con cualquier peso, a cualquier altitud de vuelo y de despegue, con cualquier longitud de pista (en la que pueda operar), con los obstáculos que se puedan encontrar en la senda de despegue o de aterrizaje, a cualquier temperatura ambiente, con cualquier configuración de los sistemas hipersustentadores (Slats y Flaps), con ajustes de potencia total o reducida, con pista seca o mojada, la senda neta que se puede obtener en despegue con un motor inoperativo, en ruta con dos motores inoperativos, etc.

4.2.2 Operaciones Especiales

En determinadas ocasiones las compañías se pueden ver obligadas a la realización de operaciones denominadas especiales por fallos de sistemas o por condicionantes externos que, sin ser suficientes para perder el certificado de aeronavegabilidad o imposibilitar la operación, requieren de procedimientos y reservas especiales y, en determinados casos, una autorización especial para su realización.

Entre este tipo de operaciones encontramos las que se realizan:

- En pistas contaminadas con agua, nieve, barro, etc.
- Con los frenos inoperativos
- Con los spoilers de tierra inoperativos
- Vuelos con el tren abajo
- La operación en aeropuertos entre 8000 y 12500 pies de elevación
- El vuelo con la cabina despresurizada
- Vuelo Ferry con tres motores

- Vuelo (de duración determinada) sobre zonas montañosas

4.2.3 Performance en vuelo

En este capítulo se presentan en forma tabular y gráfica las actuaciones para despegue, subida, crucero (altitudes máximas y óptimas), circuitos de espera a diferentes velocidades, descenso, motor y al aire en el caso de no poder aterrizar, y el vuelo para proceder al alternativo. Se presentan también las tablas de aterrizaje (distancias reales con configuraciones varias de dispositivos hipersustentadores) así como unas tablas para comprobaciones rápidas en crucero para cálculos rápidos del combustible y el tiempo desde cualquier punto en el crucero hasta el aterrizaje.

4.2.4 Performance con un motor inoperativo

Desarrolla las condiciones esperadas y las estrategias para el descenso en ruta en virtud de que se esté sobrevolando una zona montañosa o terreno llano para el descenso, si es necesario, hasta una altitud en la que el avión pueda mantener unas condiciones de vuelo óptimas para proceder a destino o a un alternativo. Se establecen las condiciones de empuje máximo a mantener, los niveles óptimos de vuelo, los condicionantes y los cálculos si es necesaria la realización de circuitos de espera, el descenso óptimo y los condicionantes de un vuelo al alternativo de no poder efectuar la toma en el destino. Se establecen también tablas de conversión tierra-aire a las velocidades y altitudes óptimas.

4.2.5 Performance con dos motores inoperativos

En aquellos aviones que tienen más de dos motores se incluyen capítulos con tablas y cálculos para el caso de parada de dos motores en vuelo. Es habitual que un avión que opere con dos motores parados (si tiene 3 ó más) sufra importantes reducciones en sus performance.

Por ello las tablas y cálculos que se presentan establecen las estrategias a seguir en cuanto a velocidades y techos de operación, los techos de operación máximos que se pueden conseguir, los cálculos óptimos para el descenso en ruta y las posibles circuitos de espera, los cálculos para el descenso, la aproximación y la toma y sus condicionantes con dos motores inoperativos. Se elaboran patrones específicos para la aproximación y toma y tablas de referencia rápida para utilización durante el vuelo de conversión de distancias tierra-aire.

4.2.6 Limitaciones de peso en aeropuertos

Se establecen las limitaciones de peso en los aeropuertos en tablas y gráficas de entrada múltiple en las que, conociendo las condiciones de empuje y sangrado que se aplicarán a los motores, se determinarán las velocidades de operación en virtud de la temperatura exterior, la elevación del aeródromo, las condiciones de la pista y los obstáculos del entorno.

Se establecen también las condiciones en configuración de aproximación en cada aeropuerto para el caso de realización en el mismo de una aproximación frustrada o un motor y al aire en final.

Todos estos datos y gráficas se encuentran introducidos en forma electrónica en las bases de datos de performance de los FMS y FMGS de los modernos aviones.

En ocasiones los aviones disponen de sensores que interpretan cuando un motor se ha parado o cuando existen problemas que hacen necesario el cálculo de performance degradadas.

En algunas ocasiones los ordenadores FMGS requieren de la tripulación de determinadas instrucciones o datos de partida para generar cálculos a partir de unos condicionantes previamente establecidos. Tal es el caso de las velocidades de operación en despegue, que son introducidas por la tripulación y los pesos máximos con combustible cero y el centro de gravedad con combustible cero. Esos últimos, junto con el combustible total a bordo, también introducido por la tripulación, les sirven como dato de partida a los sistemas FMGS del avión para el cálculo en cada momento del combustible remanente, del centro de gravedad actual y de las necesarias transferencias de combustible de un depósito a otro para poder mantener en un valor óptimo el centro de gravedad del avión.

El disponer de estos sistemas de gestión ayuda a mantener en un nivel óptimo la carga de trabajo de la tripulación, supervisan de manera eficiente y redundante los sistemas y las características de la operación y proponen alternativas que mejoran los cálculos y decisiones de la tripulación tanto en operación normal como en algunas emergencias o contingencias. En operación normal gestionando de manera automática y eficiente el centro de gravedad, proporcionando valores óptimos de velocidades, niveles de vuelo, autonomía, cálculos complejos, etc. y en determinadas situaciones de fallo, contingencia o emergencia proponiendo planes de vuelo al alternativo, cálculo de las performance degradadas etc..

4.3. Vuelo automático

La mayoría de los aviones comerciales en servicio en nuestro país disponen de dispositivos que les permiten realizar muchas de las fases del mismo de forma automática.

En general los mayores automatismos se concentran en aeronaves comerciales de últimas generaciones de corto, medio y largo radio. La aviación regional y la general están más limitadas en este campo.

La mayor concentración de sistemas y mecanismos para el vuelo automático se encuentra en los modernos aviones fly-by-wire. En estos hasta las órdenes que se transmiten por los pilotos a las superficies aerodinámicas pasan por un ordenador y por una secuencia lógica predefinida. No hay, por tanto, actuación directa sobre las superficies de control.

Entre los sistemas de ordenadores instalados en un avión para realizar actuaciones en los distintos sistemas existe uno que se destaca como el que mayor número de funciones control acumula y el que más decisivo resulta para la conducción del vuelo. Su denominación genérica es FMS (Flight Management System) y en la terminología Airbus FMGES (Flight Management, Guidance and Envelope System). Seguiremos en este apartado la terminología del FMGES de Airbus (específicamente el instalado en el Airbus A-340) por ser este fabricante el que mayor número de aeronaves comerciales de todos tipos y familias concentra en nuestro país. Los sistemas instalados en las aeronaves Boeing tienen similares características.

El Sistema de Guiado, Gestión y Envolvente de vuelo (FMGS ó FMGES) es un sistema interactivo con el piloto, que realiza las siguientes funciones principales:

- Navegación.
- Predicción y optimización de las performance
- Gestión del Plan de Vuelo
- Presentación de la información
- Control del AP (Piloto Automático) / FD (Director de Vuelo) y del A/THR (Auto Thrust o control automático del empuje del motor)
- Cálculo de la envolvente de vuelo y de las velocidades

Sin pretender ser exhaustivos pero para dar una idea más completa de las funciones que realiza este ordenador principal describiremos las que realiza cada una de sus cuatro partes principales.

La función Flight Management (FM), o de Gestión del Vuelo, controla:

- Navegación
- Gestión de la planificación del vuelo (hora de llegada y altitud en cada punto del vuelo)
- Predicción y optimización de las performance.
- Gestión de las radio ayudas realizando una selección automática de las más próximas o de las necesarias en cada momento.
- Gestión de las pantallas de presentación

La parte denominada de Flight Guidance (FG) o del Guiado del Vuelo, proporciona:

- Control del Piloto Automático (AP)
- Control del Director de Vuelo (F/D)
- Control del Empuje Automático (A/THR)

La parte Flight Envelope (FE) o de la envolvente de vuelo, proporciona:

- Cálculo de datos para la envolvente de vuelo y funciones de velocidad
- Vigilancia de los parámetros utilizados por las partes de FG y FE
- Detección de ráfagas y cizalladura de viento en el plano vertical asociadas con turbulencias graves (Windshear) y de centro de gravedad trasero
- Cálculo de peso total (GW) y de información de posición (en porcentaje) del centro de Gravedad.

La parte de Fault Isolation and Detection System (FIDS) o Sistema de Detección y Aislamiento de Fallos que proporciona:

- Adquisición y concentración de datos de mantenimiento
- Interface con el Ordenador Central de Mantenimiento (CMC)

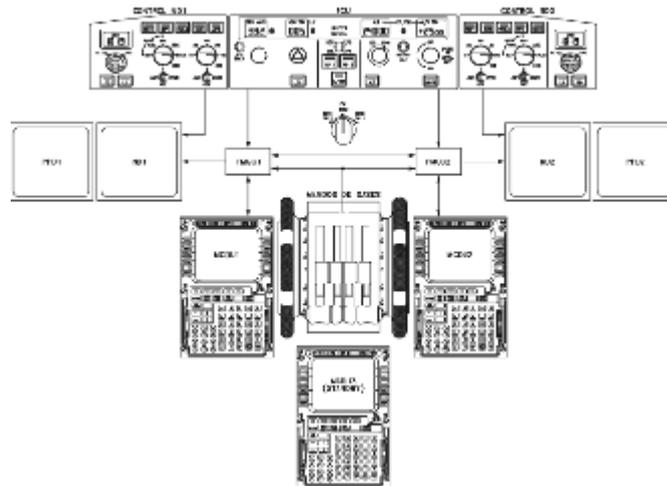
Figura 35.



Este ordenador está en permanente contacto con otros sistemas en tierra de la compañía mediante los sistemas de comunicaciones digitales del avión y puede recibir e integrar vía data link (uplink), tanto planes de vuelo y datos de vientos a los

distintos niveles de vuelo, remitidos por los departamentos de operaciones de la compañía, como de datos de progresión del vuelo que se remiten de forma periódica (downlink) y automática así como fallos de sistemas o fallos menores que se transmiten en tiempo real mediante un programa preformateado a las distintas estaciones de control y seguimiento de la compañía en su base principal de operaciones y mantenimiento.

Figura 36.

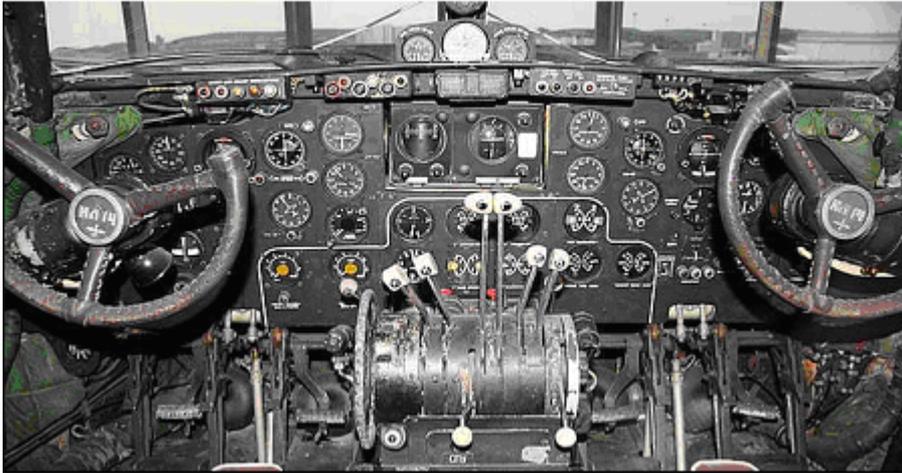


La tripulación realiza el seguimiento del vuelo y puede observar los distintos parámetros principales del mismo en unas pantallas digitales que presentan la actitud, velocidad, rumbo etc. del avión en una pantalla y los datos de navegación en otra. La versatilidad de la forma de presentación de los datos en este tipo de pantallas hace que sea posible integrar un gran número de informaciones en una sola de ellas donde antes requerían de un instrumento específico para cada dato. Se pueden también sumar (caso de algunas pantallas Boeing) datos de navegación y de actitud en la misma pantalla.

En la figura que acompaña a estas líneas presentamos los sistemas de interfaz y de relación de los pilotos con este sistema automático en un Airbus A-340.

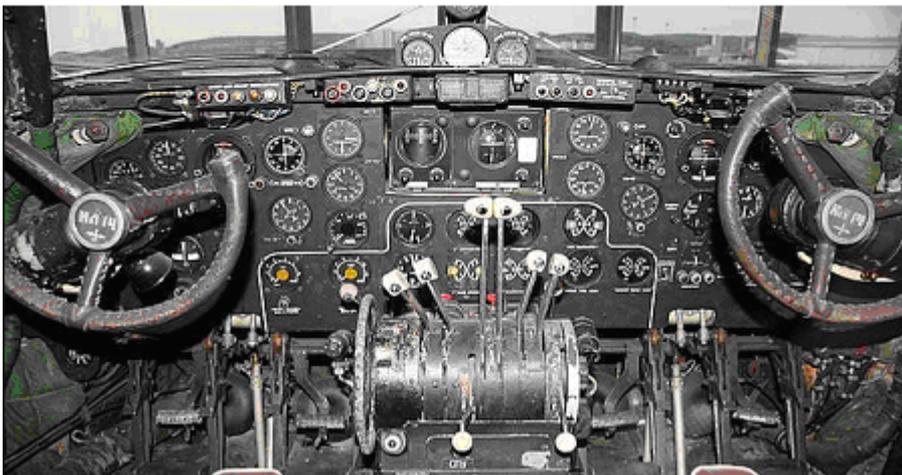
En las fotografías que siguen presentamos, de manera gráfica, dos instrumentaciones: la clásica mediante instrumentos analógicos aún en uso en algunos aviones como el Ilyushin de la fotografía siguiente y la actual de un Embraer con pantallas de rayos catódicos o de LCD.

Figura 37.



Fotografía tomada en un avión de transporte estatal ruso tipo Ilyushin Il-14T Zúrich en 2008

Figura 38.



Fotografía de la cabina de un avión regional Embraer ERJ-190-100LR 190LR tomada en 2008.

Como hemos comentado en los temas anteriores un elemento esencial para la realización eficiente de un vuelo es un control efectivo, durante el mismo, del centro de gravedad. En aviones altamente automatizados, como el Airbus A-340, existen ordenadores que ejercen de manera constante un control y vigilancia del sistema completo de combustible. Así existen dos concentradores de datos de combustible (FDC) que proporcionan a los Ordenadores de Control y Vigilancia del Combustible (FCMC) los datos siguientes:

- Volumen de combustible en los depósitos
- Densidad del combustible
- Características eléctricas del combustible
- Temperatura de combustible

Con esos datos los ordenadores denominados FCMC, que controlan el sistema completo:

- Miden la cantidad de combustible y la indican en los instrumentos de los pilotos
- Calculan el Centro de gravedad y el peso total de la aeronave basándose en los datos insertados por la tripulación al inicio del vuelo de peso con combustible cero (ZFW) y centro de gravedad calculado sin combustible (ZFCG)
- Controlan la transferencia de combustible a los depósitos interiores para alimentación del motor
- Controlan la transferencia de combustible (del depósito en la cola a los de los planos y de estos al primero y entre las distintas partes de los depósitos de los planos para prevenir daños estructurales) para el control en todo momento del centro de gravedad del avión.

El sistema, por tanto, está durante todo el vuelo realizando transferencias de combustible de unos depósitos a otros para mantener el centro de gravedad dentro de los niveles óptimos calculados para un mejor y más eficiente consumo de combustible y manejo del avión.

En los modernos aviones comerciales de transporte de corto, medio y largo radio es usual que la aeronave y las tripulaciones que los pilotan estén capacitados para la realización, en todo tiempo y condición meteorológica, y utilización de los automatismos para todas las fases del vuelo excepto (de momento) de las de movimiento en tierra (Taxi), entrada en pista para despegue y despegue. Es habitual en las compañías aéreas españolas la utilización de aproximaciones automáticas con Autoland (aterrizaje y parada en pista automáticas) en condiciones de visibilidad casi nula.

Este tipo de aproximaciones requieren de las preceptivas autorizaciones por parte de la Autoridad aeronáutica, un estado de mantenimiento muy exigente de los instrumentos de a bordo que se utilizan, unos equipo en los aeropuertos muy precisos y unas tripulaciones habilitadas y entrenadas periódicamente en ese tipo de maniobras.

5. TIPOS DE COMPANÍAS AÉREAS Y TIPOS DE AERONAVES

5.1. Tipos de Compañías Aéreas

La Dirección General de Aviación Civil (DGAC) española distingue dos tipos de compañías aéreas¹

- Compañías tipo A.
- Son aquellas a las que la citada Dirección General les otorga Licencias tipo “A”: Permiten la explotación de servicios aéreos de pasajeros, de carga y/o de correo, a cambio de remuneración y/o pago de alquiler. El listado, a finales de mayo de 2008, incluye a un total de 30 compañías como veremos a continuación.
- Compañías tipo B.
- Son aquellas a las que les otorgan Licencias tipo “B”: Permiten la explotación de servicios aéreos de pasajeros, de carga y/o de correo, a cambio de remuneración y/o pago de alquiler, exclusivamente con aviones de peso máximo al despegue inferior a 10 Tm. y/o menos de 20 asientos.

Son compañías tipo A, a finales de mayo de 2008, las siguientes (un total de 30):

Tabla 2.

Aerolíneas de Baleares, S.A. (AEBAL)	Air Comet, S.A.
Air Europa Líneas Aéreas, S.A.	Air Nostrum; líneas Aéreas del Mediterráneo, S. A.
Audeli, S.A.	Baleares Link Express, S.L. (Hola Airlines)
Binter Canarias, S.A.	Bravo Airlines, S.A.
Clickair, S.A.	Corporación Ygnus Air, S.A. (Sólo carga)
Flightline, S.L.	Futura International Airways, S.A.
Gadair European Airlines, S.L.	Gestión Aérea Ejecutiva, S.L.
Iberia LAE, S.A.	Iberworld Airlines, S.A.
Islas Airways, S.A.	Lagun Air, S.A.
LTE International Airways, S.A.	Navegación y Servicios Aéreos Canarios, S.A. (NAYSA)
Pan Air Líneas Aéreas, S.A. (Sólo carga)	Privilege Style, S.A.
Pullmantur Air, S.A.	Servicios Aéreos Integrales, S.A. (FLYANT) (Sólo carga)
Spanair, S.A.	Swiftair, S.A.
Tag Aviation España, S.L.	Top Fly, S.L.
Visig Operaciones Aéreas, S.A. (Air Class Airways)	Vueling Airlines, S.A.

Fuente: .

http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/AVIACION_CIVIL/COMERCIAL/TRANSPORTE/

En el listado de compañías aéreas tipo B se encuentra un gran número de compañías de trabajos aéreos, formación, vuelos ejecutivos, etc.

Vemos que no existe, si atendemos al número y tipo de operaciones y el tipo de actividad que desarrollan las compañías listadas tanto las del grupo A como las del B, una homogeneidad que nos permita una clasificación. Esta que realiza nuestra Administración sólo sirve a efectos administrativos.

La típica y antigua división entre aviación regular y chárter tampoco es, a día de hoy, una clasificación que incluya todos los tipos de actividades dentro del transporte aéreo. Así pues, dado que no es posible una clasificación “ortodoxa” realizaremos una aproximación a las posibles clasificaciones de las líneas aéreas que actualmente operan en nuestro país.

Si atendemos a la actividad podemos dividir las regulares y chárter. Las regulares realizarán vuelos con una periodicidad fija entre dos destinos. Las chárter realizarán vuelos punto a punto con grupos de personas que han conseguido su título de transporte comercializado, de manera habitual, a través de un tour operador. Las aerolíneas de bandera de los países suelen ser líneas regulares.

Así la Autoridad reguladora estadounidense la FAA, pionera en aspectos legislativos y regulatorios de la actividad aérea tiene bien definidos los estándares aplicables a las compañías en virtud de su actividad.

- Las compañías que realizan actividad de Aviación General se rigen por la norma FAR 91.
- En la FAR 119 se describen los procesos de certificación para transporte aéreo comercial y los operadores aéreos (compañías de líneas aéreas) para operaciones aéreas comerciales de aeronaves con una capacidad de transporte superior a los 20 asientos y más de 6.000 lbs. de peso al despegue).
- En la FAR 121 que establece los criterios para las líneas aéreas regulares comerciales de su país
- En la FAR 125 Se establecen los procesos de certificación y operación para aeronaves certificadas con una capacidad de 20 o más asientos y 6000 lbs. o más de peso al despegue.
- En la FAR 135 se establecen los criterios operacionales para los conmuter (aviones pequeños y medianos que unen dos destinos secundarios) y líneas chárter.

En nuestro país coexisten todos los modelos de transporte aéreo comercial desde las pequeñas empresas de paquetería (Air Courier) tales como SEUR, las compañías de carga dependientes de grupos empresariales dedicados al transporte aéreo en casi todas sus facetas como CYGNUS Air (transporte de carga en B-757 para IBE). Esta última empresa dependiente del Grupo Gestair forma parte de un grupo de empresas que incluyen:

- La formación de pilotos mediante la empresa Gestair Flying Academy
- La carga aérea mediante la empresa CYGNUS Air para Iberia Carga
- La aviación Ejecutiva y de negocios mediante Gestair Private Jets
- El transporte aéreo regular como Wet-lease de IBE en destinos nacionales (puente aéreo) como intercontinentales (con aeronaves Airbus A-340 a Rio de Janeiro, La Habana y Santo Domingo)
- Otras actividades de mantenimiento y operaciones aéreas.

Existen compañías de actividad mixta como Air Europa (AEA) que realizan una buena parte de su actividad como línea regular y otra parte importante como chárter.

Otras como Spanair con una actividad fundamentalmente regular para traer pasaje a los Hubs de las compañías de su alianza la Star Alliance.

Otras que hacen su actividad casi en exclusiva para el mercado chárter como Futura, Iberworld, Air Comet, Air Pullmantur, etc.

Otras, que han nacido con vocación de emular a las compañías de bajo coste, con vuelos punto a punto y que en ocasiones hacen aporte a los Hubs de las compañías que forman parte de su accionariado como Vueling y Clickair.

Vemos por tanto que en la actividad aérea comercial de nuestro país están representados todos los modos de transporte aéreo actualmente en vigor en el mundo.

Así, hay actividades de:

- Aviación General con algún componente comercial (pequeñas empresas de paquetería con aviones ligeros).
- Aviación Regional (Lagun Air, Air Nostrum)
- Aviación Chárter (AEA en parte, Iberworld, Air Comet en parte, Air Pullmantur, etc.)
- Aviación Regular y de Hub (Iberia y Spanair como aporte a las compañías de su alianza)
- Aviación de Carga (Cygnum Air, etc.)
- Aviación Ejecutiva y de Negocios (Gestair, Executive Airlines, etc.)
- Aviación de largo radio Charter y punto a punto (Air Comet, etc.)
- Aviación de Bajo Coste (Vueling, Clickair, etc)

Para añadir una clasificación general, atendiendo a la red de rutas que operan y a las frecuencias en las mismas podemos distinguir entre:

- **Líneas Aéreas Regionales** que operan aviones de capacidad media o baja, en rutas cortas o con baja demanda o con frecuencias altas. Realizan vuelos domésticos o internacionales de corto recorrido. La mayoría de los operadores de bajo costo (Vueling, Clickair, etc), las líneas regionales (Air Nostrum, Binter, Naysa, etc) y alguna línea nacional general en parte de su operación (Spanair) entrarían en este grupo.
- **Líneas Aéreas de Red.** Operan una flota de aeronaves amplia con distintos tipos y muchos tamaños, desde aviones regionales hasta aviones de alta capacidad tipo A-340 o B-747 para vuelos intercontinentales. Su característica es la del trabajo en red con aporte de pasajeros y carga desde diversos destinos de pequeña entidad en aviones regionales, de corto y medio radio a un Hub o centro de distribución desde donde se concentran en aviones de grandes dimensiones que sirven a destinos internacionales e intercontinentales y el proceso inverso. La mayoría de las aerolíneas de bandera de los distintos países se incluirían en este tipo.
- **Líneas Aéreas de Gran Escala.** Son líneas aéreas creadas para realizar vuelos entre destinos muy distantes, de larga y ultra larga duración y de gran densidad de pasaje y carga. Ejemplos de este tipo son Virgin Atlantic, Singapore Airlines etc. Algunas compañías chárter españolas (Air Pulmantur, Iberworld, Air Comet podrían formar parte de este grupo)

En el pasado (antes de la liberalización del transporte aéreo) existían compañías estatales, compañías de bandera, propiedad de los gobiernos (aún existe alguna en Europa) y otras totalmente privatizadas. Esto, que en sí mismo era una diferenciación y división clara entre los modelos de compañías, ha producido una gran distorsión en el tráfico aéreo comercial y en la competencia entre las distintas compañías en una economía de libre mercado. Aún hoy los efectos de la existencia de estos modelos y los acuerdos bilaterales de navegación establecidos entre los países para protegerlas están en este momento de crisis y de alza de los precios del combustible en continua revisión esperando abolir definitivamente esos sistemas de protección.

5.2. Tipos de Aeronaves

Si atendemos al tipo de aviones que usamos podemos hacer tantas distinciones como tipos de aeronaves. Veremos a continuación los tipos de aeronaves de acuerdo con distintos sistemas de clasificación y los tipos de operación que con ellos se realizan.

Si nos fijamos en las dimensiones de las aeronaves que se tienen en cuenta para la construcción de los aeropuertos nos encontramos con una división como la que realiza la FAA norteamericana para el diseño de los aeropuertos, que es copiada en todo el mundo y que aparece en la tabla siguiente.

Figura 39.

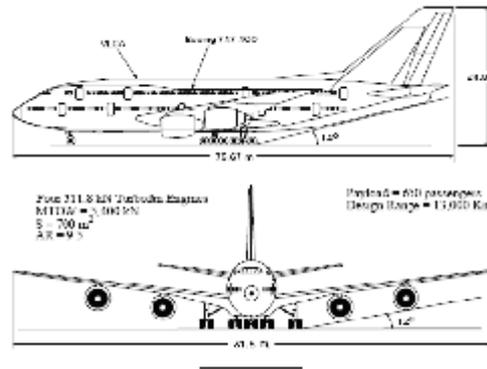
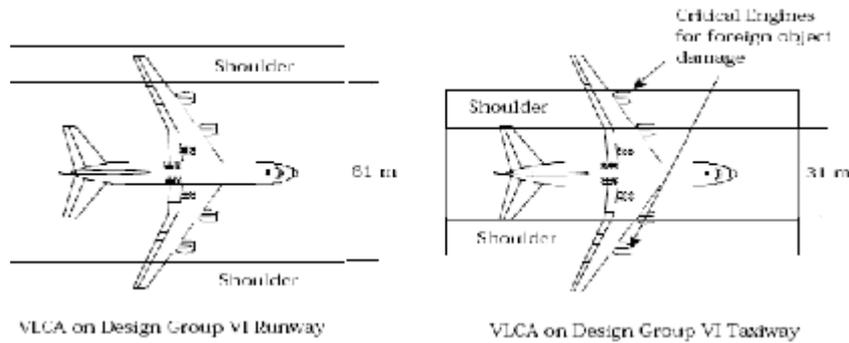


Tabla 3.

Grupo de Diseño	Envergadura en ft.	Ejemplos de aeronaves
I	< 49	Cessna 152-210, Beechcraft A36
II	49-78	Saab 2000, EMB-120, Saab 340 Canadair RJ-100
III	79-117	Boeing 737, MD-80, Airbus A-320
IV	118-170	Boeing 757, 767, Airbus A-300
V	171-213	Boeing 747, Boeing 777, MD-11, Airbus A-340
VI	214-262	Airbus A-380 y otros VLCA en fase de diseño

Esta clasificación es muy útil a la hora de diseñar los tamaños, dimensiones y separaciones entre las calles de rodaje y las pistas de aterrizaje y despegue en los aeropuertos. Algunos VLCA (Very Large Capacity Aircraft) como el A-380 han hecho rediseñar algunas rodaduras en aeropuertos e incluso la tabla de clasificación de la OACI.

Figura 40.



El equivalente OACI a este sistema de clasificación de la FAA, ya desfasado con la entrada en servicio de los VLCA, es el que se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 4.

Grupo de Diseño	Envergadura (m)	Anchura entre las ruedas exteriores del tren principal (m)	Ejemplos de aeronaves
A	<15	<4,5	Todos los monomotores ligeros y algunos aviones ejecutivos
B	15 hasta < 24	4,5 hasta <6	Aviones regionales y algunos ejecutivos grandes (EMB 120, Saab 2000, Saab 340)
C	24 hasta <36	6 hasta <9	Aviones de corto radio comerciales B-737, MD-80, A-320
D	36 hasta <52	9 hasta <14	Aeronaves de medio radio B757, B767, A-300
E	52 hasta <65	9 hasta < 14	Aviones pesados y de largo radio B747, MD-11, A-340

Como curiosidad en los criterios de diseño de los VLCA se tienen en cuenta los impactos que crean tanto en la reglamentación, como en la construcción de espacios de aparcamiento específicos dentro de los aeropuertos ya construidos, en la zona del área de movimiento de los mismos para permitir su operación sin interferir con el tráfico actual, como en la utilización de calles de rodaje específicas limitando el movimiento de otras aeronaves etc. En la ilustración vemos, en comparación con un B747-400 las dimensiones de los nuevos VLCA (tipo Airbus A-380) en diseño y producción.

Si atendemos a la clasificación de la IATA según el número de asientos tendremos los siguientes tipos de aeronaves.

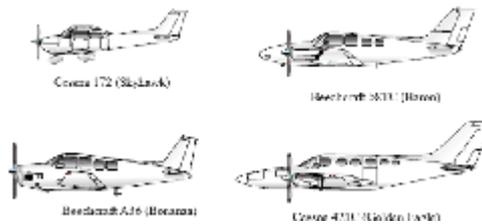
Tabla 5.

Categoría	Número de asientos	Ejemplos de aeronaves
0	<50	Embraer 120, Saab 340
1	50-124	Boeing 717, Canadair RJ 900
2	125-179	Boeing 737, Airbus A-320
3	180-249	Boeing 767-200, Airbus A-300-600
4	250-349	Airbus A-340/300, Boeing 777-200
5	350-499	Boeing 747-400 Airbus A340/600
6	>500	Boeing 747-400 Hig Density Seating, Airbus A-380

Una clasificación general de acuerdo con el uso que se le pretenda dar a las aeronaves las organiza en:

- **Aviación General.** Suelen ser aviones mono motores y bimotores de hélice con un peso máximo al despegue que no supera las 14.000 lbs.

Figura 41.



- **Aviación Corporativa y de Negocios.** Turborreactores y turbohélices con dos o más motores y con un peso máximo que no suele superar los 41.000 kg.

Figura 42.



- **Aviación Regional** con aviones bimotores o poli motores de reacción o turbohélices con un peso inferior a los 31.818 kg (70.000 lbs.)

Figura 43.



- **Aviación de Transporte según el alcance (datos estimativos)**

- De corto alcance (entre unos minutos y 4 horas y un peso máximo de menos de 150,000 lbs.)

Figura 44.



- De medio alcance (entre horas y 8 horas y en recorridos de menos de 3000 NM y con un peso máximo no superior a las 350.000 lbs.)

Figura 45.



- De largo alcance (entre 8 horas y 14-16 horas utilizados en vuelos intercontinentales de rutas superiores a las 3.000 NM e inferiores a las 6.000 NM y con un peso máximo superior a las 350.000 lbs.)
- De ultra largo alcance (más de 16 horas con aeronaves derivadas de las anteriores B-777/300 ER, A-340/500 y capaces de servir distancias de más de 6.000 NM)

Figura 46.



Figura 47.



En la fotografía un Boeing B-777-367/ER de la compañía Cathay Pacific.

Si nos fijamos en las velocidades de aproximación de las aeronaves en corta final en los aeropuertos, una clasificación muy usada a diario en las aproximaciones instrumentales y que determina los mínimos meteorológicos a utilizar, la separación entre las aeronaves en final e incluso el procedimiento mismo a utilizar tenemos una clasificación como la que aparece en la tabla siguiente.

Tabla 6.

Grupo	Velocidad de aproximación expresada en kt. al peso máximo al aterrizaje	Ejemplos de aeronaves
A	< 91	Monomotores y aviones ligeros de hélice
B	91-120	Aviones regionales de hélice Dash 8 400
C	121-140	Aviones reactores de corto y medio radio y alguno de largo radio tipos B737, B757, MD-80, A-340/300
D	141-165	Aviones pesados y aviones sin Slats tipo A340-600, B747, Canadair RJ 900
E	< 166	Algunos aviones militares y el antiguo Concorde.

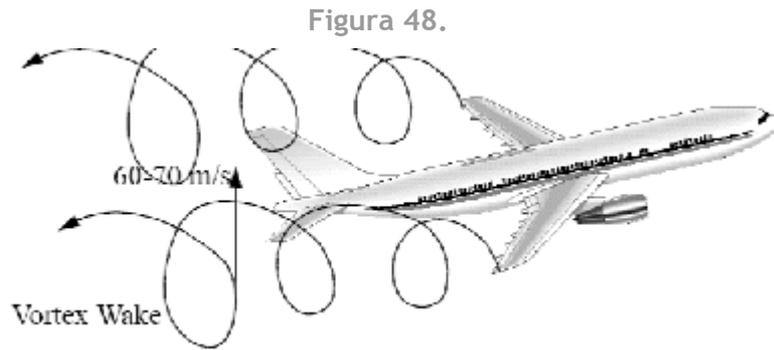
Si atendemos a la categoría de estela turbulenta que crean en el aterrizaje y que se debe disipar antes de que otra aeronave opere detrás tenemos una clasificación del tipo que aparece en la tabla siguiente

Tabla 7.

Grupo	Peso Máximo al despegue (lbs.)	Ejemplos de aeronaves
S, Small (Ligera)	<41.000	Aeronaves ligeras, algunos bimotores de hélice regionales y muchos aviones ejecutivos
L, Large (Media)	41.000-255.000	Aviones de corto y medio radio tipo A-320, MD-80 y B737
H, Heavy (Pesada)	> 255.000	Aviones pesados, de largo radio A-340, B-747 y algunos de corto y medio especiales (B-737 NG, B-757)

Como observamos en la tabla anterior se consideran a los Boeing B-737 NG (Next Generation como los que opera la compañía Air Europa) y los Boeing B-757 aeronaves con estela turbulenta H - Pesada (Heavy) en la reglamentación aplicable en nuestro país a las aeronaves a los efectos de separación en corta final. Esto es debido a la estela potente que crea en punta de plano tanto el Boeing 737 con un winglet pronunciado (B-737NG) como el B-757.

Se realizan además clasificaciones de aeronaves según los niveles de ruido que producen al paso lateral, por encima y en el suelo. La clasificación está basada en una escala internacional de cuatro “capítulos” que son:



- Sin clasificación. A ella pertenecen las primeras generaciones de aviones a reacción a los que se les ha prohibido el vuelo mediante acuerdos internacionales (con raras excepciones) tales como el Boeing B-707 usado aún en nuestro país para transportes militares.
- Capítulo 2. Los más viejos y ruidosos aviones comerciales en servicio a los que se les puso un límite en el año 200 y que han debido ser actualizados con dispositivos anti ruido para poder seguir volando tipo Boeing B-727, Boeing B-737/200 etc.
- Capítulo 3. Aviones más modernos y silenciosos tipo Boeing 757, Boeing 737-300 y posteriores Airbus A-310 etc.
- Capítulo 5 Los modernos aviones de hélice

En la actualidad los modernos Boeing B- 777 y B-787 en fase de producción tendrán niveles de ruido inferiores a los especificados en el capítulo 3.

Aunque existen muchos otros sistemas de clasificar las aeronaves mencionaremos, por último, aquél de la OACI que relaciona el peso de las aeronaves con la resistencia de los pavimentos de las pistas de aterrizaje para poder resistir su operación.

Así deben ser dos clasificaciones que hagan comparables el peso de una aeronave (por eje) con la resistencia estructural de una pista y su área de movimiento adyacente. La OACI define en el Capítulo XIV. "Aeródromos", en su punto 2.6.2, que la resistencia de un pavimento que se vaya a usar para la operación de aeronave de peso superior a 5700 kg se debe expresar usando el método ACN(Aircraft Classification Number)-PCN (Pavement Classification Number). De tal manera que, según la OACI un avión sólo puede operar en un aeropuerto de manera segura si su ACN es menor o igual que el PCN del aeropuerto.

Existen tablas publicadas en las que se determinan esos valores para cada aeronave y tipo de pavimento. Como curiosidad el ACN depende del peso y de la presión de inflado d las ruedas del tren de aterrizaje.

6. LA REDUCCIÓN EN EL PESO Y EL CONSUMO EN EL TRANSPORTE ÁEREO

Hemos hablado de los pesos en los aviones desde la perspectiva legal de los reglamentos. Así hemos definido los estándares aplicables a los pesos mínimos con combustible cero, pesos máximos al despegue y al aterrizaje y los pesos limitados por obstáculos en el área de despegue y los debidos a las necesarias precauciones para prever contingencias. En este tema subrayaremos los esfuerzos que se realizan en la industria para aligerar las cargas fijas que se transportan optimizando la capacidad de transporte de la carga de pago (pasaje más carga) con un menor consumo energético. Todas estas estrategias van dirigidas a un ahorro de combustible y la consiguiente factura que lastra las cuentas de resultados de las empresas que se dedican a este tipo de transporte.

Analizaremos los esfuerzos coordinados por minimizar las cargas fijas en las aeronaves y la opción por una aviación más respetuosa con el medio ambiente en una serie de elementos que hacen que converja la rentabilidad en la operación con la modernización de los sistemas y el respeto por el entorno. Nos detendremos en las formas de decrementar los pesos fijos (“Menos peso y distintos servicios”), por aligerar la estructura de las aeronaves (“Volaremos en aviones de plástico”), la reducción al mínimo de los vuelos en vacío (“Vuelos de posición: un elemento en extinción”). En un punto aparte se desarrollarán los elementos negativos que afectarán a la performance de las aeronaves incrementando su consumo y en otro los esfuerzos por desarrollar una aviación con una participación menos negativa en el cambio climático (“Aviación y cambio climático”).

6.1. Menos peso. Distintos Servicios

Es un tema constante la publicación en toda la prensa especializada mundial los esfuerzos que realizan las aerolíneas para aligerar la carga que transportan. Los vuelos llevan ahora menos peso y el servicio a bordo se aligera para ahorrar combustible².

Especialmente significativo es lo que reportan las líneas aéreas americanas. El refresco ya no se ofrece en vasos en la mayoría de los vuelos de US Airways. En Delta los asientos son más estrechos y livianos. Si se atraviesa los Estados Unidos en JetBlue, una compañía líder de Bajo Coste, recibirá una sabrosa bolsa de patatas fritas de cien calorías en vez del refrigerio original de galletas dulces, galletas saladas y queso de untar. El sector ha tenido dificultades para mantenerse a flote. Las empresas han aumentado las tarifas, reducido la capacidad, abandonado el uso de los aviones que consumen mucho combustible, cobrado a los clientes que llevan una segunda maleta, eliminado personal y presionado a la mayor cantidad posible de pasajeros para que usen los servicios de facturación automatizados. El año pasado, American Airlines reemplazó los cubiertos en la clase de negocios y primera clase con vajilla fabricada con un metal más liviano. Incluso las cosas más pequeñas ayudan,

² Chris Kahn. Associated Press. 29 de marzo de 2008. **Aerolíneas aligeran la carga que llevan.**

especialmente en una aerolínea como American Airlines, que realiza más de 750 mil vuelos cada año.

Con los precios del combustible para reactores en aumento, las aerolíneas no tienen más remedio que examinar los aviones buscando maneras de aligerar la carga. No hay lugar para ningún tipo de peso muerto, desde luces redundantes en las alas a cables adicionales en las paredes. Se han eliminado en los últimos años hornos, soportes para revistas y compactadores de basura que no se usaban. Otras compañías (Jet Blue entre ellas) eliminaron los manuales impresos de la cabina e instalaron información de navegación y sistemas de a bordo en formato electrónico. Los fabricantes también están usando materiales más livianos para construir los aviones. El consumo de combustible es el mayor gasto de operación de las aerolíneas, habiendo superado a los sueldos del personal hace ya tres años en esa posición 3. Por primera vez en esta industria el gasto en combustible se ha erigido como el mayor valor unitario para la industria en el globo. En un estudio sobre los informes financieros de las 45 mayores líneas aéreas de pasajeros el gasto por consumo de combustible se situó en un 25,5% del total de los costos operacionales mientras que el de personal que fue del 24,2 en 2005 cayó a un 23,3 % en el 2006 y siguió cayendo en el 2007.

Tabla 8.

	Norteamérica		Europa		Asia-Pacífico		Todas las principales compañías	
	2001	2006	2001	2006	2001	2006	2001	2006
Laborales	36,2%	25,2%	27,2%	25,8%	17,2%	17,2%	28,3%	23,3%
Combustible	13,4%	26,6%	12,2%	20,5%	15,7%	30,4%	13,6%	25,5%
Arendamientos aeronaves	5,5%	3,7%	2,9%	3,1%	6,3%	2,4%	5,0%	3,5%
Depreciaciones y amortizaciones	6,0%	4,9%	7,1%	6,7%	7,4%	7,3%	6,7%	6,0%
Otros	38,9%	39,6%	50,6%	43,9%	53,4%	42,7%	46,4%	41,7%

Porcentaje de participación en los costes operacionales de las principales compañías según sus informes. Informe económico de IATA de Junio de 2007

Este informe económico reciente (publicado en junio de 2007 con datos de 2006) ha sido pulverizado por las alzas del combustible en el último año. Si bien se consideraba un hito fundamental en la industria el cambio en la escala de los costes siendo el pago de salarios el segundo en importancia ahora se reducen esos gastos a apenas un 20% de la factura total de la compañía. Si observamos las declaraciones del director financiero de la primera compañía aérea nacional el pasado 29 de mayo de 2008 “El coste del combustible supone ya el 30% de los gastos operativos, el doble que el de personal y el triple que el alquiler de aviones. Además, ese incremento “brutal” del combustible coincide por primera vez con una crisis económica global, de modo que habrá que ver hasta dónde es capaz el mercado de aceptar el incremento de precio para mantener la demanda...”

Estos ahorros se trasladan a todas las actividades de las compañías. En los despachos de vuelos se buscan alternativos más próximos al de destino para aligerar el combustible de reserva legal (caso de la compañía IBE que utiliza ahora como alternativo habitual para sus vuelos con destino Madrid el aeropuerto de Zaragoza después de utilizar durante décadas Barcelona o Valencia, más lejanos aunque con mejores conexiones para los pasajeros). Algunas compañías como la israelita El Al utilizan la técnica de cargar en sus vuelos de larga distancia 1000 kg menos del combustible necesario para el vuelo hasta unos minutos antes de la puesta en marcha, momento en el que, con los datos exactos de la carga de pago y pasaje embarcados, se completa la carga de combustible para optimizar la cantidad del mismo a bordo de manera que no sobre ni un litro. Las compañías deben estudiar y perfeccionar sus procesos, ya muy afinados, para ahorrar cada kilo transportado que suponga un incremento en el consumo aunque sea mínimo y no produzca beneficios directos. En muchas ocasiones esos cambios afectan al servicio proporcionado a bordo y a las facilidades que se dispensan a los pasajeros (menores espacios en cabina, menores posibilidades de facturación de equipajes, menos catering a bordo, etc.).

6.2. Aviones “de plástico”

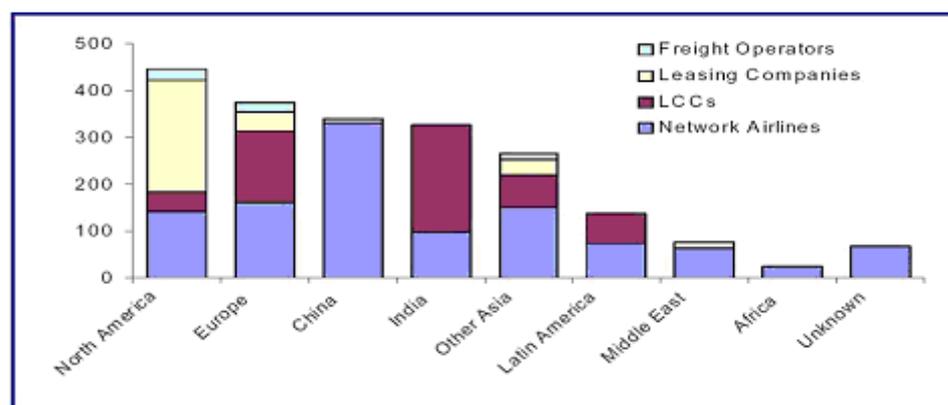
Una forma de aligerar el peso es la de sustituir aeronaves más pesadas y de menor eficiencia energética en el consumo de combustible por otras construidas con materiales más ligeros y que incorporen motores de última generación, más eficientes.

En el entorno occidental esta dinámica se ha hecho especialmente evidente en los últimos años con la subida del precio de los carburantes ya que se está produciendo una intensiva renovación de la flota por parte de las principales compañías.

Así en el informe de la IATA de febrero de 2006 se aprecia esta tendencia. En la gráfica siguiente se evidencian las órdenes de compra recibidas por los dos grandes proveedores mundiales de aviones comerciales (Airbus y Boeing) en el año 2005 por regiones del mundo y por tipo de operación de las compañías.

También podemos observar en la gráfica cómo son las compañías arrendadoras de aeronaves las más activas en este mercado, seguidas de cerca por las compañías de bajo coste (LCC) superando incluso a las compañías de red (IBE, LH, BAW, AMR, etc.). A estos pedidos deberíamos sumar una significativa cantidad de aeronaves regionales suministradas por los dos principales proveedores: Bombardier y Embraer.

Figura 49.



Source: Boeing, Airbus

La renovación prevista con respecto a la flota existente (a primeros de enero de 2006) en las distintas regiones del mundo alcanzará en los próximos años hasta un 48% (caso de Asia) y más del 30% en el caso de Europa.

Tabla 9.

	Aircraft Firm Deliveries as a % of Jan 2006 Existing Fleet							Options as % of Fleet
	All	2006	2007	2008	2009	2010 or later	TBD*	
Africa	14.0%	3.5%	1.8%	1.0%	0.7%	5.3%	1.7%	7.6%
Asia	48.0%	9.8%	8.0%	8.2%	6.1%	15.8%	1.1%	16.0%
Australasia	11.5%	4.8%	1.6%	1.6%	1.0%	2.5%	0.0%	101.3%
Europe	30.4%	6.0%	6.9%	4.8%	2.7%	9.7%	0.3%	26.6%
Latin America	25.3%	4.7%	5.8%	5.3%	3.4%	5.0%	1.1%	23.4%
Middle East	34.5%	6.7%	5.8%	7.2%	4.5%	9.5%	0.8%	22.9%
North America	19.2%	3.7%	3.8%	3.4%	2.4%	5.2%	0.7%	29.2%
Total	29.0%	5.7%	5.5%	4.8%	3.2%	8.6%	1.2%	26.1%

Source: Airclaims

*TBD = Delivery Date yet to be decided

Los objetivos que se pretenden con esta profunda renovación son: contar con aviones modernos que den mayor prestigio a la operación de las compañías, que sean más eficientes en cuanto al consumo energético y a las emisiones y que den una adecuada capacidad a las rutas que han de operar las aerolíneas. Según la IATA la flota total de las compañías a enero de 2006 era de 14.375 aeronaves. Contando órdenes de compra en firme (4.174) y opciones de compra (3.746) en el periodo 2006-2012 se renovará una parte muy importante de la flota mundial.

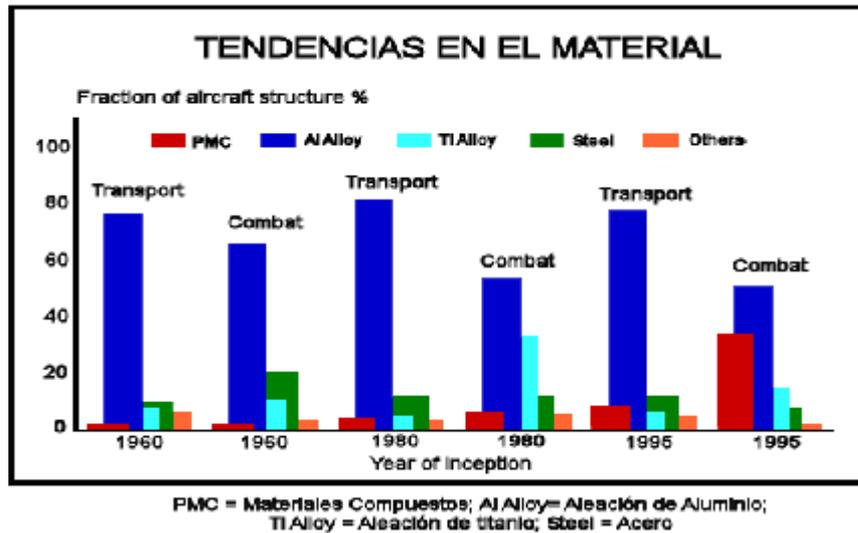
Una buena parte de esos aviones serán comprados por compañías arrendadoras. Como dato anecdótico la más activa del mercado mundial ILFC (International Lease Finance Corporation) es la firma que más aeronaves Boeing del modelo 777 posee del mundo (97). Más que ningún otro cliente de Boeing o alguna línea aérea.

En nuestro país esa tendencia al abandono de aeronaves poco eficientes se ha hecho especialmente evidente en el último mes de mayo. En palabras del primer directivo de Iberia, este año 2008 es “Un año dramático para las aerolíneas, por el precio del petróleo, la competencia y la desaceleración económica. El precio del barril está por encima de los 130 dólares y eso crea una situación dramática para el sector”. Ha anunciado que “se adelantará la retirada de los once MD80 que aún quedan en su flota para octubre, teniendo en cuenta su elevado gasto de combustible”. (Junta General de Accionistas 29 de mayo de 2008)

Es evidente, por tanto, la profunda renovación en el sector. Pero intentaremos aclarar una de las claves en esta reducción del peso de las aeronaves por la vía de aligerar su estructura intentando dar respuesta a los interrogantes: ¿de qué están hechos los aviones que ahora se sustituyen y cuales son los materiales más ligeros que se usan en la actualidad?

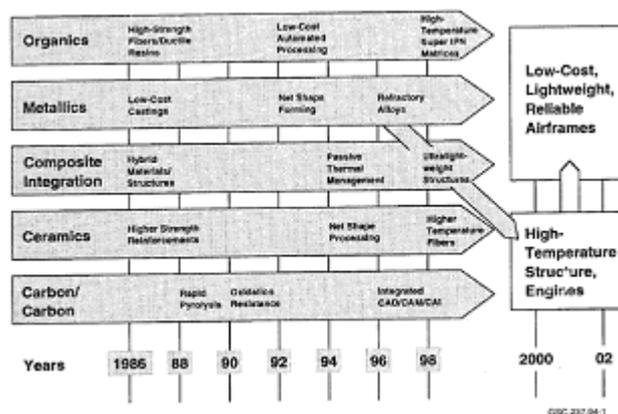
En la gráfica siguiente observamos las tendencias de construcción de las aeronaves en el periodo 1960-1995.

Figura 50.



Estos avances han desencadenado una auténtica competencia comercial a escala global. Así, con el objetivo de seguir manteniendo el liderazgo de su país en la construcción y certificación de aeronaves, el Departamento de Transporte de los Estados Unidos⁴ publicó, en Noviembre de 1994, un plan para la implementación, progresiva introducción y los métodos de certificación de materiales compuestos en la aviación comercial. Se estudiaron las evoluciones realizadas en los materiales utilizados hasta la fecha y las incorporaciones previstas en los años venideros.

Figura 51.



Se identificaban entonces como los más adecuados los Compuestos de Matriz Polimérica (PMC), Compuestos de Matriz Metálica (MMC), compuestos

⁴ DOT/FAA/CT-94/106. "Program Plan Aircraft Advanced Materials Research and Development". US Department of Transportation. FAA Technical Center. Atlantic City Airport, New Jersey 08405

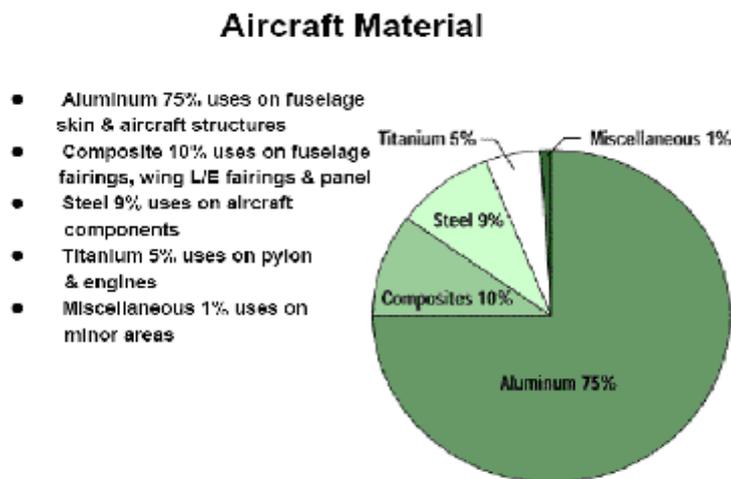
Figura 56.



Consecuentemente, en las presentaciones realizadas del nuevo modelo en construcción de Boeing, finalmente denominado B-787, se determina que este modelo, en comparación con otros de tamaño similar, será más eficiente en consumo de combustible en un 20%, menos ruidoso, reducirá las emisiones que producen contaminación e incrementará el confort de los pasajeros, tendrá un alcance mayor (unos 15.000 km. con una promedio de 210-250 pasajeros) y tendrá una velocidad de crucero más elevada debido sobre todo a su nivel tecnológico y a los materiales empleados en su construcción . En su estructura se utilizarán más de un 50% de materiales compuestos.

Según afirman los estudios de la Princeton University, del coste total de una aeronave, un tercio viene determinado por el coste de la célula y la aeronave propiamente dicha, el otro tercio los motores y sus sistemas auxiliares y el otro tercio por la aviónica embarcada. La mayoría de los aviones comerciales ahora en servicio están construidos con una cantidad relativamente pequeña de materiales. Los motores fundamentalmente de PMC, aleaciones de Titanio y aleaciones con base de Níquel y Cobalto. Las células y el interior de los aviones de aleaciones de aluminio, de titanio y de materiales compuestos (PMC). La aviónica embarcada de los mismos materiales que la electrónica de consumo.

Figura 57.



En la actualidad se está abandonando el uso del acero en la estructura de las aeronaves debido a los problemas de corrosión que presenta y a su elevado peso. Usualmente se utilizan materiales compuestos en las alas y superficies de control así como en los empenajes de la cola (estabilizadores vertical y horizontal, y timones). También se utilizan aleaciones de acero y de titanio para los largueros de la estructura interna de la aeronave y, en las alas, se utilizan aleaciones de titanio, que son mucho más livianas y flexibles. Los suelos de las cabinas están hechos con una estructura sandwich (una capa de madera liviana entre dos capas de aluminio). Muchos paneles interiores y piezas no estructurales se hacen con estructuras denominadas Honeycomb (que tienen la forma de un panel de abejas) de fibras de vidrio y carbono con diferentes resinas.

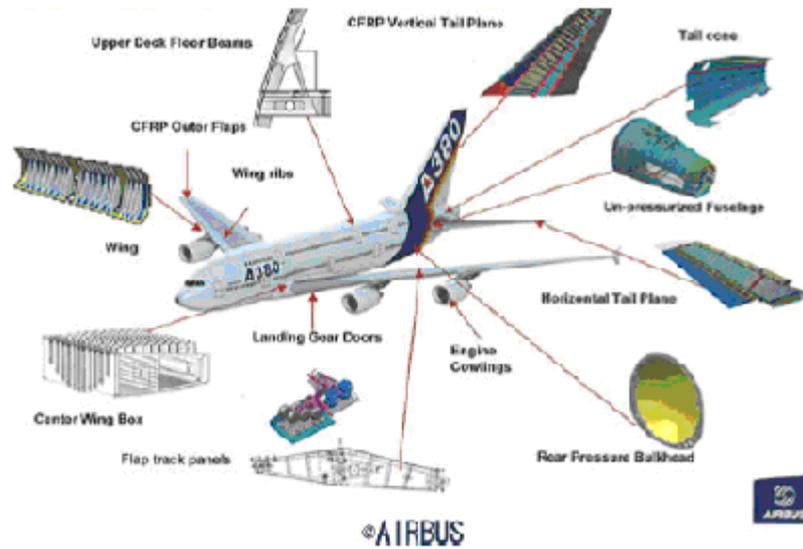
Así pues en los aviones actualmente en servicio podremos decir que:

- En los elementos estructurales, que son los resistentes y le dan rigidez a la estructura, se utilizan en su mayoría aleaciones metálicas que incluyen principalmente titanio y acero
- En las superficies de control y partes del fuselaje (superficies de las alas y planos de cola) se utilizan íntegramente materiales compuestos, la mayoría fibra de carbono (nuestro país es líder en este tipo de fabricación).
- En los recubrimientos del fuselaje y partes de las alas se utilizan casi íntegramente aleaciones de aluminio.
- En los interiores del fuselaje, cabinas, y compartimientos de alojamiento de equipos técnicos se utilizan materiales muy variados y principalmente ignífugos. Cabe destacar que se incorporan grandes extensiones de cableados, elementos eléctricos y electrónicos en los que se utiliza cristal líquido, pantallas de diferentes tipos con componentes que incorporan mercurio y cuarzo para los indicadores analógicos, etc. Los neumáticos de los trenes de aterrizaje son de una clase especial de caucho de alta resistencia al impacto, rozamiento y temperatura. Existen, en los frenos de algunos aviones, elementos de ciertos tipos de materiales cerámicos.

También se utilizan vidrios templados y plásticos (el parabrisas de cabina es una estructura sándwich compuesta por vidrio flotante de alto impacto y plásticos o acrílicos balísticos para evitar astillados y perforaciones rápidas).

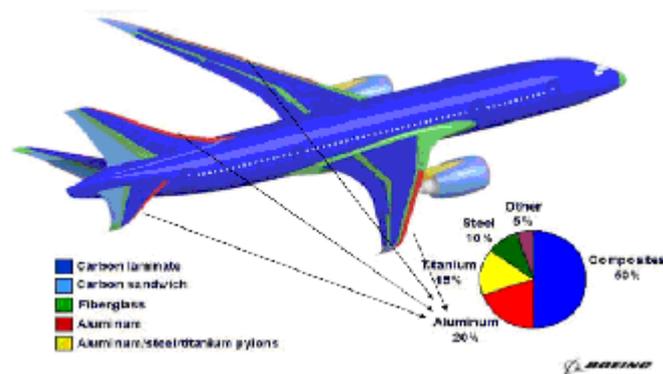
En las aeronaves Airbus la estructura de la aeronave permanece predominantemente compuesta por aleaciones de aluminio. En el A-380 el 61% de la estructura está hecha con aleaciones de aluminio, el 22% con materiales compuestos, el 10% en aleaciones de titanio y acero y un 3% de Glare (Glass Fibre Reinforced Laminate, un laminado de fibra de vidrio) y se está experimentando con nuevas aleaciones de Aluminio y Litio (las primeras presentaban problemas de ductilidad y de fracturas y las actuales presentan tratamientos termo-mecánicos óptimos).

Figura 58.



En el nuevo Boeing B-787, como se puede apreciar en la ilustración siguiente, la casa constructora ha publicitado que se han utilizado un 50,5 % de materiales compuestos, un 20% de aluminio, un 15% de titanio, un 10% de acero y un 5% de otros materiales. Por volumen un 80% de materiales son compuestos entre los que figuran 35 toneladas de materiales plásticos reforzados con 23 toneladas de fibra de carbono.

Figura 59.



Aunque pueda parecer curioso y, parafraseando al periodista de la noticia sensacionalista, nos encaminamos al vuelo en aviones “de plástico”

6.3. Vuelos de posición: un elemento en extinción

Tradicionalmente en la operación de aeronaves por parte de las compañías se consumían recursos importantes y horas de vuelo en cuestiones que, aunque no resultaban productivas en sí mismas:

- situaban a la aeronave en lugares en los que comenzar una actividad lucrativa (vuelos en posición propiamente dichos),
- servían para entrenar y experimentar a sus tripulaciones y con ello alcanzar mayores ratios de eficiencia y seguridad (intangibles que ahora se sustituyen masivamente por el uso de simuladores de vuelo)
- las compañías y sus tripulaciones técnicas experimentaban con el nuevo material para evaluar prestaciones y capacidades (construcción de manuales, procedimientos normales y de emergencia..etc.)
- o recuperaban a base aeronaves con averías para su reparación en las mejores instalaciones.

Los motivos para los vuelos en posición (sin pasaje ni carga) en el caso del transporte aéreo serían vuelos posicionales o de entrenamiento del tipo:

- Vuelos de entrega de avión.
- Vuelos de prueba.
- Vuelos en Ferry.
- Vuelos de Mantenimiento (llevar un avión a auxiliar a otro averiado).
- Vuelos de entrenamiento de tripulaciones.

Estos vuelos, denominados vuelos en posición o situacionales, y su incidencia en el conjunto de la operación han caído en picado. Dado que en el argot técnico se distinguen distintos tipos de vuelos posicionales recurriremos a lo determinado en los manuales básicos de operaciones de las compañías para definir estos tipos de vuelos⁶:

Un vuelo en situación es, de acuerdo con el documento 9626 de la OACI, todo vuelo de pago o no, regular o no, efectuado para situar una aeronave que se utilizará para servicios de pago. Incluye los vuelos a aeropuertos para realizar tareas de mantenimiento.

Se considera un vuelo Ferry cuando no cumple, o no se ha demostrado que cumple con las especificaciones de certificación aplicables. Se puede llevar un avión en vuelo Ferry a un aeropuerto donde se pueda reparar adecuadamente siempre y cuando el vuelo se pueda llevar a cabo de manera segura. Para la realización de un vuelo Ferry es necesario la autorización de la Autoridad Aeronáutica específica para ese vuelo.

Se consideran vuelos posicionales técnicos:

6 MO(A) Iberia Págs. 8.7.0. de 28 de enero de 2008.

- Los vuelos de situación en los que las condiciones de aeronavegabilidad no están afectadas (falta de equipos de emergencia, luces de emergencia, puertas y rampas, etc.) y cuya finalidad es la de llevar el avión a un aeropuerto donde se pueda reparar adecuadamente, siempre y cuando no se incumpla ningún límite establecido en la MEL/CDL correspondiente (MEL: Minimum Equipment List o Lista de Equipo Mínimo requerido para poder operar con normalidad y CDL Configuration Deviation List o lista de desviaciones con las que se puede operar en determinadas circunstancias).
- Los vuelos con un avión cuya avería esté directamente relacionada con un ítem incluido en la MEL sin estar explícitamente contemplada en la misma y cuya condición de seguridad se asegura a través de una aprobación de aeronavegabilidad emitida por el fabricante del avión o del motor.

Figura 60.



Boeing 787 en su fase final de montaje. Fuente Boeing News Media

Una parte importante de los vuelos “en vacío” que realizan los aviones en su fase de desarrollo son los vuelos de prueba realizados en las casas constructoras cada vez que se diseña y se pone en servicio un nuevo tipo de avión. Aunque el número de horas de vuelo que se emplean en esta actividad y el número de unidades que se construyen no suelen ser publicitadas por las casas constructoras (y son muy reacias a dar datos ciertos para cada nuevo modelo que ponen en funcionamiento) cada vez son más reducidas en tiempo y en recursos. El uso masivo de simulaciones y de programas de ordenados para evaluación de esfuerzos de los distintos materiales sustituyen a los valiosos recursos que se ponen a prueba cada vez que un prototipo sale a una nueva misión de vuelo.

Como regla general se construyen cinco prototipos de cada avión nuevo y se utilizan para las pruebas de resistencia y cálculo de performances en tierra y en vuelo durante un periodo que no suele superar los dos años y con un consumo de horas indeterminado. Hemos de tener en cuenta que deben ser probados en todo tipo de climas, de altitudes y con todas las condiciones de presión, temperaturas y esfuerzos para poder construir un sistema de datos tabulares y gráficos que sirvan para la construcción de los cálculos de performance de certificación y de posibles contingencias para el uso en línea.

No obstante las horas empleadas en este tipo de actividades se diluyen si se comparan con el número de unidades vendidas de cada modelo por las casas fabricante y el número medio de horas que realizan cada unidad en las líneas aéreas que los operan.

En nuestro país hemos consultado a las principales compañías el número de vuelos realizados “en vacío” en el año 2007 por los motivos expuestos más arriba y tan solo dos de ellas nos han remitido el número y proporción de los mismos.

En el caso de compañías que realizan un “mix” de vuelos chárter y regulares (tipo Air Europa, AEA) los datos para el año 2007 son:

- 772 vuelos posicionales
- para un número total de vuelos de 62.000 vuelos en el año 2007
- Lo que arroja un porcentaje de 1,25% de los vuelos.

En el caso de una compañía de red en la que la práctica totalidad de los vuelos son regulares como Iberia (IBE) los resultados son:

- Realizados en el año 2007 un total de 505 vuelos posicionales sin pasaje ni carga
- De un total de 217.366 vuelos
- Lo que arroja un porcentaje del 0,23% de los vuelos

De los 505 se realizaron:

- 18 vuelos de prueba de avión
- 4 vuelos en Ferry
- 418 vuelos de situación y
- 65 vuelos de entrenamiento

La diferencia es debida fundamentalmente a que las compañías que realizan vuelos chárter en determinados periodos de cambio de programación de flotas (invierno/verano) existe un número de vuelos necesarios para posicionar los aviones en los lugares desde los que se iniciarán los transportes vacacionales.

7. EL DETERIORO DE LAS PRESTACIONES (PERFORMANCE) DE LAS AERONAVES

Las casas fabricantes de aeronaves, las de motores para aviación y las de componentes, siguiendo las recomendaciones de la industria aeronáutica en su empeño por determinar los factores que pudieran degradar las prestaciones (performance) de las aeronaves con el paso del tiempo, realizan estudios pormenorizados de los consumos adicionales que se producirán en el caso de que se acumulen, por el uso, factores que puedan afectar a la aeronavegabilidad de sus productos, sin deterioro de la seguridad.

Existe una gran cantidad de informes publicados, desde los genéricos realizados por centros científicos que estudian la vida operacional de algunos componentes (“Performance deterioration modeling in aircraft gas turbine engines” <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=2226255>) hasta los publicados con motivo de encuentros internacionales para cuestiones específicas (“Analysis of aircraft performance during lateral maneuvering for microburst avoidance” <http://www.aiaa.org/content.cfm?pageid=406&gTable=mtgpaper&gID=63522>).

La OACI en sus reuniones internacionales fomenta el estudio y la difusión de los trabajos relacionados con estos factores. Así en los grupos de trabajo internacionales que se realizan, cada vez con una periodicidad mayor, para el estudio de la reducción de las emisiones y el consumo de combustible, se pueden encontrar de manera recurrente presentaciones múltiples sobre este asunto. Un ejemplo del mismo lo tenemos en la presentación realizada en nombre de un constructor de motores, Pratt y Whitney, en el panel OACI celebrado en la ciudad de Ottawa en Noviembre de 2002 denominado “Engine deterioration and on wing procedures to recover performance” http://www.icao.int/env/workshop/ottawa_2002/rob_owens.pdf). Son también destacables los esfuerzos de investigación de la NASA para la determinación del deterioro de las actuaciones de aeronaves en algunas condiciones de operación específicas.

Las principales casas fabricantes de aeronaves publican periódicamente unos estudios de las afecciones más frecuentes que se presentan en sus modelos, entendidos como un todo, atendiendo a las diferentes partes y sistemas. Así Boeing ha publicado un gran número de estudios relativos al tema. Traeremos aquí sólo dos ejemplos: el primero de una publicación destinada al seguimiento de las performance en crucero (http://www.icao.int/env/workshop/ottawa_2002/rob_owens.pdf.) y otro que hace referencia a las tendencias observadas en el deterioro de las performance http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/AERO_Q406.pdf). Airbus ha publicado un manual (“Getting Hands on Experience with Aerodynamics Deterioration. A Performance Audit Wiew”. October 2001. Issue 2) que nos servirá de referencia y guía para desarrollar este punto.

En ese documento se establece que se espera que una aeronave incremente su resistencia al avance (drag) en un 2% en los primeros 5 años de uso.

Pese a ese dato medio, algunos elementos aerodinámicos pueden añadir una resistencia adicional y, su efecto acumulativo, puede dar como resultado un incremento significativo en el consumo de combustible y aumentará la factura de combustible que deberá asumir la línea aérea.

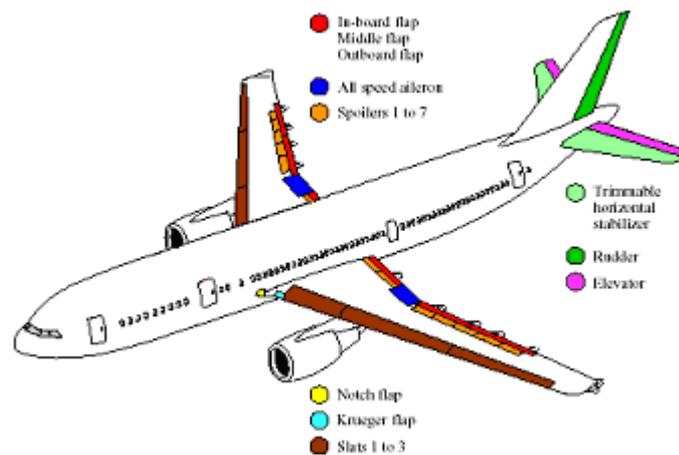
Si una compañía decidiera adoptar de manera sistemática medidas correctoras para reparar esos pequeños desajustes cada vez que se producen estas acciones podrían suponer unos costes excesivos en mantenimiento por lo que es necesario establecer, en cada momento, un análisis de coste beneficio para determinar si son aceptables esas medidas o no.

Así el documento preparado por Airbus ayuda a las líneas aéreas a determinar la manera más eficiente de manejar sus programas de mantenimiento para poder efectuar un balance positivo entre las acciones que sean necesarias para realizar tareas correctivas y la cuantificación del gasto extra de combustible de las que no se efectúen de manera que no se disparen los costes en mantenimiento.

Las penalizaciones en el consumo de combustible vienen inducidas por un deterioro y un incremento en la resistencia debidas a una inadecuada condición general de la célula del avión. El deterioro normal de una aeronave en un periodo de uso determinado viene dado por factores tales como una retracción incompleta de las superficies móviles, sellados dañados en las superficies de control, rugosidades en la célula de la aeronave, deformaciones en la misma debidas a choques con pájaros, tormentas, daños causados por vehículos de apoyo a la operación en los aeropuertos, pérdidas de pintura, puertas que no cierran adecuadamente y tienen desajustes, etc. Estos pequeños desajustes conducen a un incremento de la resistencia lo que induce, como hemos indicado, un incremento en el consumo de combustible.

Los incrementos precisos en la cantidad de combustible consumida por esta causa se determinan en túneles de viento y mediante técnicas analíticas y se traducen en incrementos porcentuales en el consumo de combustible en galones USA por año y por aeronave. Los cálculos a los que se hace referencia en el estudio de Airbus (año 2001) están calculados para un precio del barril de referencia de 60 US \$ por barril. En la actualidad (mayo 2008) se duplica con creces ese valor.

Figura 61.



La penalización en el consumo dependerá fundamentalmente de la posición de esa “rugosidad” o deficiencia y de la extensión del problema. En esta publicación se estudian las repercusiones en cada una de las “familias” de aeronaves de la factoría Airbus. En la figura adjunta se aprecian, para mayor claridad de los datos que a continuación se relacionan, las partes significativas de una aeronave que resultan influidas por rugosidades o discontinuidades.

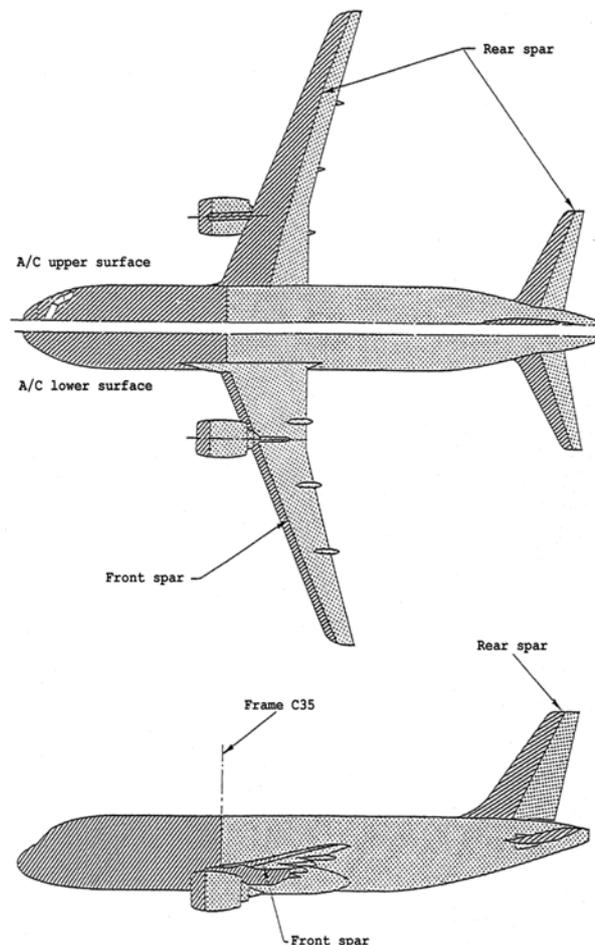
Las diferentes partes de un avión tienen una afección distinta en el caso de que resulten degradadas y alteran de distinta medida la “suavidad” con la que ese avión

se desliza en la masa de aire que lo circunda. Así podemos determinar diferentes grados de “sensibilidad” en las aeronaves. Airbus incluye esta clasificación para cada una de sus familias y tipos de aeronave. Distingue tres zonas en función de que, un deterioro en esa zona, afecte más o menos al aumento de la resistencia general del avión.

Se determina como Zona 1 a aquella que requiere mayor “suavidad” aerodinámica debida a que en ella se desarrollan flujos locales de aire de alta velocidad y “capas límite” especialmente delgadas que la hacen muy sensible a perturbaciones locales. Se la denomina también como zona de alta sensibilidad.

Zona 3 será aquella que es menos sensible las irregularidades y excrecencias estructurales. Las velocidades de los flujos sobre esas áreas son menores y las capas de aire en contacto con esas superficies son más gruesas. Se denomina zona de baja sensibilidad.

Figura 62.



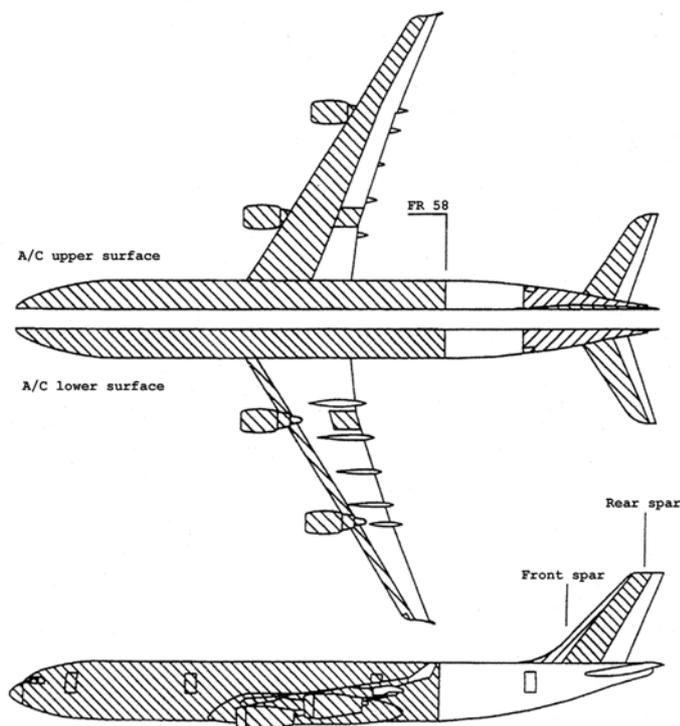
Las consideradas como Zonas 2 son las intermedias entre ambas. Se denomina también zona de sensibilidad media.

Traemos en este estudio para su representación gráfica y dar mayor claridad a nuestra exposición los estudios realizados en el manual de Airbus para una aeronave tipo A-320, para una tipo A-340 y la localización de las zonas respectivas en las mismas.

Vemos en la figura adjunta la diferenciación de zonas para un A-320 en la que se distinguen sólo dos zonas (como en la mayoría de las aeronaves de peso ligero y medio). La más oscura la de la zona 1 y la más clara la de la zona 2. En la figura en planta, la parte superior hace referencia a la superficie superior del avión y la inferior a la superficie inferior del avión.

En la figura siguiente, donde se identifican las zonas de “sensibilidad” de un avión de peso elevado, tipo A-340, se evidencian tres zonas: la zona 1 en la práctica totalidad de las zonas de ataque del avión, la zona 2, sin rayar en algunas partes de la estructura trasera del fuselaje y del cono de cola y la zona 3 en algunas partes del estabilizador vertical y la parte superior del cono de cola.

Figura 63.



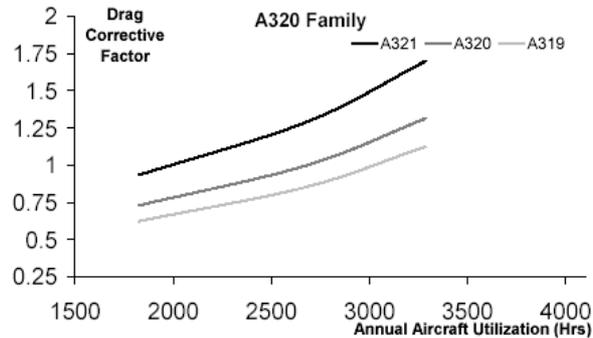
Como norma general cuanto mayor y más intensivo es el uso de una aeronave por una compañía, en suma cuantas más horas haga el avión en un año, mayor será el efecto del deterioro de su superficie en el consumo de combustible.

En los estudios realizados por Airbus, de los datos que le han proporcionado las compañías que operan sus aviones, se podría establecer unas medias de uso anual para las distintas flotas.

- Para la familia A319/A320/A321 de 2.700 horas de vuelo por año y por avión.
- Para los A300 de unas 2.200 horas de vuelo por año y un consumo nominal de 12.450 GAL USA
- Para los A-310 de unas 3200 horas de vuelo por año y un consumo nominal de 14.600 GAL USA.

- Para los A300/600 de 2.600 horas año y un consumo nominal de 13.700 GAL USA por año.
- Para los A330 de 2.900 horas por año y un consumo de 19.500 GAL USA y
- Para los A-340 de 4.700 horas por año y un consumo de 35.700 GAL USA.

Figura 64.



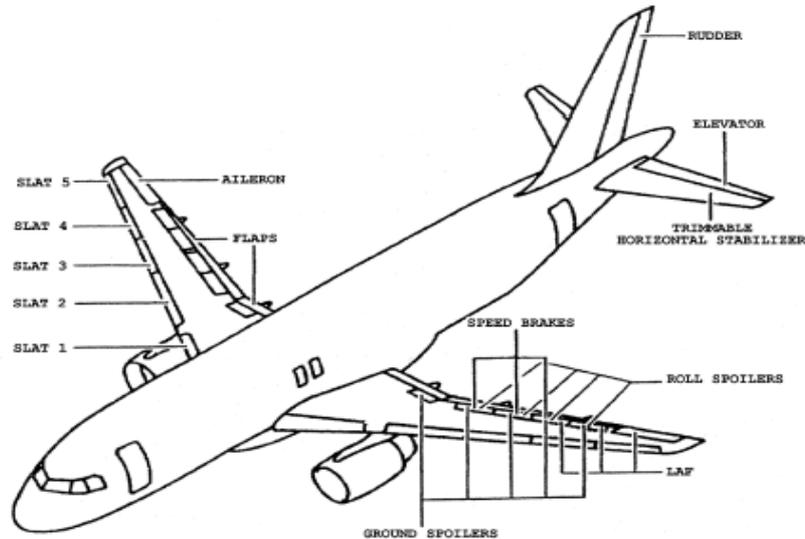
Se establece además un factor de corrección para poder establecer las penalizaciones asociadas a un uso más intensivo de una aeronave por encima de la media. Se observa, en la gráfica adjunta, un crecimiento geométrico del factor de corrección en función de la mayor utilización de las aeronaves.

Traeremos a continuación algunos ejemplos expuestos en este manual sobre los efectos que tiene la pérdida de determinadas superficies aerodinámicas, de la rugosidad en las mismas, de la falta o rugosidades en la pintura de las superficies y otros extremos estudiados.

En principio expondremos las afecciones para un determinado tipo de aeronaves de la familia A319/A320/A321 en el entendimiento de que también existen los datos referenciados a las distintas familias.

Las partes del avión objeto de estudio que hacen referencia a superficies aerodinámicas, para esta familia de aeronaves, se describen en la figura siguiente y corresponden a una aeronave del tipo A320.

Figura 65.



En la tabla siguiente podemos apreciar los datos calculados que hacen referencia a las superficies de control y su estado. Se considera en este estudio el combustible a un precio de 0,60 US\$ por galón (ahora casi el triple) y un precio medio de la hora de mantenimiento de 50 US\$ por hora.

Tabla 10.

Control surface	Penalty in US gallons per year			Penalty in US \$ per year			AMM reference	Corrective action		
	5mm height	10mm height	15mm height	5mm height	10mm height	15mm height		Men	Manhours	Cost
Slat 1	3,420	5,510	8,940	\$ 2,050	\$ 3,300	\$ 5,360	27 84 61	2	5	\$ 250
Slat 2, 3	5,100	8,230	13,340	\$ 3,060	\$ 4,940	\$ 8,000		2	5	\$ 250
Slat 4, 5	8,160	13,165	21,350	\$ 4,900	\$ 7,900	\$ 12,810	27 84 62	2	5	\$ 250
Flap	550	1,110	1,660	\$ 330	\$ 670	\$ 1,000	27 51 00	2	7	\$ 350
Spoiler	2,500	5,750	8,660	\$ 1,500	\$ 3,450	\$ 5,200	27 64 00	1	2	\$ 100
Aileron	520	1,010	1,530	\$ 310	\$ 610	\$ 920	27 14 00	1	3	\$ 150
Rudder	1,360	2,280	2,950	\$ 820	\$ 1,370	\$ 1,770	27 24 00	2	3	\$ 150
Misalignment at flap track fairing	640	1,280	1,600	\$ 380	\$ 770	\$ 960	05 25 30	2	4	\$ 200

Si lo que se ha deteriorado son los sellos de caucho (y otros materiales) entre las superficies los datos nos conducen a una tabla del tipo siguiente:

Tabla 11.

Control surface	Penalty in US gallons per year	Penalty in US \$ per year	AMM reference	Corrective action		
				Men	Manhours	Cost
<i>Slat 1 (spanwise seal)</i>	1,630	\$ 980	27 84 61	1	2	\$ 100
<i>Slat 2, 3 (spanwise seal)</i>	2,428	\$ 1,450	27 84 62	1	2	\$ 100
<i>Slat 4, 5 (spanwise seal)</i>	3,880	\$ 2,330	27 84 62	1	2	\$ 100
<i>Flap (chord-wise seal)</i>	5,250	\$ 3,150	27 54 61 27 54 62	1	2	\$ 100
<i>Wing surface-to-flap seal</i>	2,120	\$ 1,270	27 50 00	1	3	\$ 150
<i>Aileron (chord-wise seal)</i>	5,250	\$ 3,150	57 60 00	1	1	\$ 50
<i>Fairing and rubber seal missing from fin/fuselage junction</i>	5,840	\$ 3,500	27 21 00	1	2	\$ 100

También se estudian y se detallan en tablas los efectos de alguna pieza que se haya arrancado o perdido tales como tapas de accionadores de cierre y apertura de las puertas de carga, registros de paneles de combustible, etc.

Si por el contrario lo que se ha deteriorado es el sellado de una puerta de entrada de pasaje o de carga para un daño de 5 cm del sellado tenemos unos daos como los de la tabla siguiente:

Tabla 12.

Item	Penalty in US gallons per year		Penalty in US \$ per year		AMM reference	Corrective action		
	Sides	Top or bottom	Sides	Top or bottom		Men	Manhours	Cost
Forward passenger door	340	170	\$ 200	\$ 100	52 11 18	2	7	\$ 350
Aft passenger door	200	100	\$ 120	\$ 60	52 13 18	2	7	\$ 350
Emergency exit	110	60	\$ 70	\$ 40	52 22 00	2	6	\$ 300
Forward cargo door	270	140	\$ 160	\$ 80	52 31 18	2	10	\$ 500
Aft cargo door	220	120	\$ 130	\$ 70	52 31 18	2	10	\$ 500

Si lo que se aprecia es una rugosidad de 0,3 mm de alto en un área de 1 m² en la zona 1 tenemos unas penalizaciones como las que se determinan en la tabla siguiente.

En todos los casos se parte de una situación considerada estándar en la fecha en la que ve la luz el manual finales de 2001, de unos costes calculados del Galón USA de combustible a 0,60 US\$ y el coste de la hora de mantenimiento de 50 US\$ la hora). Hoy esta situación es radicalmente distinta.

Si observamos, en la tabla siguiente, la información semanal publicada por la IATA denominada “Jet Fuel Price Monitor” (extraída del proveedor de información energética mundial Platts) para la última semana del mes de mayo de 2008, en la que se recoge el precio medio pagado -en la refinería- por el combustible para aviones reactores podremos actualizar, a precio de hoy, los datos mostrados en las tablas anteriores.

Tabla 13.

Sensitive area	Penalty in US gallons per year		Penalty in US \$ per year		Maintenance reference	Corrective action		
	Zone 1	Zone 2	Zone 1	Zone 2		Men	Manhours	Cost
Leading edge slat	2,830	1,740	\$ 1,700	\$ 1,040	Repair of paint damage	1	8	\$ 400
Wing skin - upper	1,770	1,090	\$ 1,060	\$ 650	AMM 51 75 12 SRM 51 75 12	1	8	\$ 400
Wing skin - lower	710	710	\$ 430	\$ 430		1	8	\$ 400
Tail	540	400	\$ 330	\$ 240		1	8	\$ 400
Fuselage	350	200	\$ 210	\$ 120		1	8	\$ 400

Tabla 14.

					Percentage change vs.		
30-May-08	Index*	\$/b	cts/gal	\$/mt	1 week ago	1 month ago	1 year ago
Jet Fuel Price	439.2	160.7	382.6	1266.5	-6.5%	12.6%	90.0%

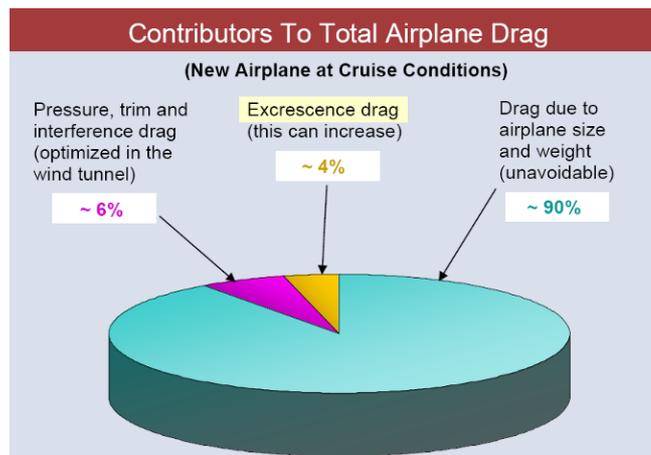
Sourced from [Platts](#) * 100 in 2000 (87 cts/gal)

La parte positiva de este manual establece que todos los deterioros mencionados, por lo general, son fácilmente detectables en tierra mediante inspecciones de la aerodinámica del avión.

Es decisión de las líneas aéreas, conectoras de la repercusión en incrementos de consumos de combustible que pueden tener esas pequeñas deficiencias, su reparación o la asunción de sus consecuencias hasta un momento más favorable para su arreglo.

La mejor práctica, recomendada por el fabricante, es la de una inspección constante de la eficiencia aerodinámica del avión y un eficaz mantenimiento preventivo para evitar consumos excesivos de combustible.

Figura 66.



También Boeing, en una presentación destinada a las líneas aéreas en la que se documentan todas las alternativas posibles para la reducción del consumo de combustible (Fuel Conservation, Flight Operations Engineering. Boeing Commercial Airplanes. Nov. 204) establece las penalizaciones que se producen por un pobre mantenimiento de una aeronave. Así en la figura adjunta observamos en porcentajes los distintos aportes a la resistencia general al avance debidos a distintos factores. Define como “Excrecence Drag” a la resistencia (Drag) adicional de una aeronave debida a la suma de todas las desviaciones de una superficie externa sin rugosidades (smooth) y bien sellada. Se enfatiza que con un mantenimiento adecuado se puede evitar esa resistencia adicional inducida.

En la figura siguiente apreciamos las zonas de especial sensibilidad para un Boeing B747. Como podemos apreciar en la fotografía es más importante su efecto en las áreas críticas:

- Las partes delanteras del fuselaje y de los motores
- Los bordes de ataque de los planos y del timón

Figura 67.



En ellas el coeficiente de presión (C_p) es el más alto. En este informe también se pone de relieve que un mantenimiento regular minimiza el deterioro. Se cometa el informe con una descripción pormenorizada y fotográfica de las principales irregularidades y su efecto cuantitativo en términos de porcentaje en el incremento de consumo y en dólares.

8. LA AVIACIÓN Y EL CAMBIO CLIMÁTICO

En este capítulo presentaremos los esfuerzos realizados por la industria en general para dotarse de herramientas que sean capaces de definir, en formato numérico utilizable por computadores a bordo de las aeronaves y en tierra, índices de costes totales para su uso en la operación diaria, los esfuerzos combinados de todos los implicados en la actividad aérea para desarrollar técnicas más eficientes que permitan el ahorro de combustible y la reducción de las emisiones de residuos de la combustión en la alta atmósfera y la unión de esos esfuerzos con los paneles de cambio climático en el marco de las Naciones Unidas.

8.1. Herramientas para un consumo eficiente: el Cost Index

En el día a día del transporte aéreo y en un entorno altamente competitivo es imprescindible, para las líneas aéreas, establecer métodos que controlen los costes operacionales en todas las facetas de su actividad. Esta necesidad se ha visto acrecentada de manera dramática en los últimos meses con el incremento diario del precio del combustible. Para ello se deben tener en cuenta todos los aspectos, considerando la seguridad operacional como el primero de los mismos, desde los puramente económicos, la gestión del marketing, las programaciones de las tripulaciones, la operación de vuelo, las cuestiones de ingeniería, el mantenimiento y el estado técnico de las aeronaves.

Las casas constructoras han publicado manuales en los que se explicitan vías y formas de afrontar esta cuestión con herramientas que tienen en cuenta estos aspectos equilibrando consumos de combustible y tiempo volado. Históricamente las líneas aéreas comenzaron a desarrollar sistemas de ahorro de combustible en los años 70 con las primeras subidas del crudo. La adopción generalizada de sistemas de gestión del vuelo de manera automática, FMS (Flight Management Systems), a principios de la década de los 80 del siglo pasado, permitió a las líneas aéreas introducir más factores de ahorro en la ecuación, incluyendo elementos de ahorro relacionados con los costes asumidos y el tiempo volado.

Además de las funciones de navegación, los nuevos FMC (Flight Management Computers) proporcionaban cálculos de optimización de las performance en tiempo real lo que redundaba en mejoras en la economía de la operación no sólo en términos de consumo de combustible (menor) sino en términos de mejora en los costes directos atribuibles a la operación estableciendo:

- Controles de las velocidades de ascenso, crucero y descenso como en función de los requerimientos de cada área de la operación (altitudes, hora de llegada...etc.)
- Optimizaciones para unos mínimos consumos de combustible, tiempo o costes.

Figura 68.[20]

$$\text{Cost Index} = \frac{\text{Cost of } \img alt="stopwatch icon" data-bbox="608 131 654 174}}{\text{Cost of } \img alt="jet engine icon" data-bbox="608 198 675 223} \times \frac{[\text{kg}/\text{min}]}{[\text{lbs}/0,01\text{hr}]}$$

Así la casa Airbus ha publicado manuales, como el que nos servirá de guía para aclarar la herramienta “Cost Index” y que se denomina “Getting to grips with the Cost Index” publicado, en su segunda edición, en 1998. En este manual se exponen de manera pormenorizada los distintos cálculos para cada fase del vuelo y para cada “familia” de aeronaves de la flota Airbus de las compañías. Expondremos, en este punto, tan sólo algunos de los elementos iniciales de esta herramienta.

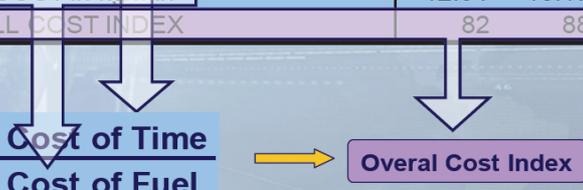
Como definición, el Cost Index, es un valor que pone en relación el conseguir un coste por vuelo mínimo mediante una correlación entre los costes operacionales por hora de vuelo y el consumo de combustible.

En esencia se usa para establecer una relación entre los costes de consumo de combustible y tiempos de operación. Y esta idea, expresada en términos y algoritmos numéricos es la que se introdujo los computadores de datos de performance de las aeronaves, precursores de los sistemas de gestión de vuelo actuales (FMS ó Flight Management Systems).

En sus presentaciones Airbus establece que es un sistema muy adecuado para el cálculo de los costes de la operación de las líneas aéreas y aún más cuando estas se encuentran en dificultades (Capítulo 11 o de quiebras en la legislación norte americana) y deciden recurrir a este método para trabajar con el Departamento de Transportes de su país, como vemos en el gráfico siguiente. Este gráfico, obtenido de datos reales de compañías en esas circunstancias, se determinan los costes internos para poder realizar servicios de transporte aéreo entre pares de ciudades.

Figura 69.

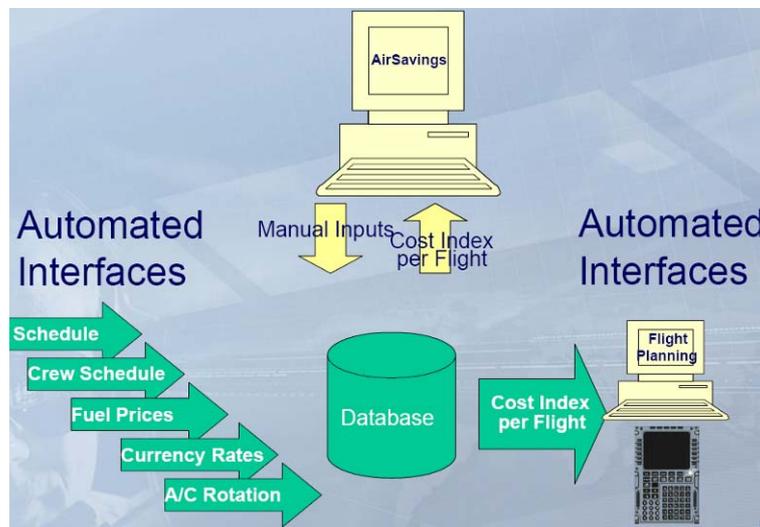
	2000	2001	2002	2003	2004	2005
GALLONS/TOTAL BLOCK HOUR	785.73	757.51	796.59	800.53	847.15	804.49
(\$OPERATING-FUEL EXPENSES)/ASM	13.03	13.89	14.23	14.37	13.97	13.08
SCHEDULED YIELD (CENTS/RPM)	17.37	15.52	14.15	14.34	13.38	13.28
FUEL COST (\$ PER GALLON)	0.94	0.81	0.73	0.86	1.07	1.61
AVERAGE STAGE LENGTH (SM)	594	610	614	667	679	680
\$COST PER HOUR (CREW+MAINT)	1,013.4	893.1	982.3	693.4	684.6	653.6
\$FUEL COST in kg/r/min	12.34	10.17	9.7	11.43	15.13	11.43
OVERALL COST INDEX	82	88	86	46	45	57



Las compañías estudian todos estos parámetros y determinan para cada vuelo el Cost Index más apropiado. Se expresa de forma numérica y se introduce por la tripulación al principio de cada vuelo en la MCDU (Multipurpose Control and Display Unit) que les sirve de interface con el FMGS (Flight Management and Guidance System) para la introducción de datos y características de cada vuelo en particular (Pista en servicio, ruta, Salida Instrumental, vientos en ascenso, crucero y descenso, condiciones meteorológicas del aeropuerto de destino, rutas alternativas, contingencias previstas, etc.).

Este proceso se retroalimenta y va teniendo en cuenta las circunstancias cambiantes del “ambiente” en el que se desarrolla la operación. El cálculo de un Cost Index para cada vuelo es por tanto un proceso complejo en el que deben ser tenidos en cuenta todos los factores que afecten al costo en las operaciones, como vemos en la ilustración siguiente.

Figura 71.



8.1.1 Coste de un vuelo

En términos generales podemos decir que el coste de un vuelo específico depende de una suma de costes fijos y variables que estableceremos en forma de ecuación de la manera siguiente:

$$C = C_F * \Delta F + C_\tau * \Delta T + C_C \quad [21]$$

En donde:

C_F , Coste del kilo de combustible

C_τ , Coste por minuto de vuelo

C_C , Coste fijo independiente del tiempo

ΔF , Combustible del vuelo

ΔT , Tiempo del vuelo

Para hacer mínimo el valor de C necesitaremos reducir el valor del coste variable, es decir del peso específico de $C_F * \Delta F + C_\tau * \Delta T$

Para un determinado sector y un periodo de tiempo (en la actualidad con precios cambiando de forma diaria esta afirmación debería ser estudiada) el valor del precio del combustible se podría considerar como fijo.

Consideraremos una función del coste τ de la manera siguiente:

$$\tau = C/C_F = \Delta F + C_\tau/C_F * \Delta T \quad [22]$$

En donde:

$$C_\tau/C_F = CI \text{ ó Cost Index}$$

En un tramo de un vuelo ΔS esto significa que:

$$T(1 \text{ milla náutica}) = 1/SR + CI * 1/V \quad [23]$$

En donde:

SR ó Specific Range (Alcance específico) considerando el peso, altitud y otras consideraciones. $SR = \Delta S/\Delta F$ (millas náuticas por kilo).

V es la velocidad sobre el suelo para recorrer el tramo ΔS expresado en millas náuticas considerando el viento $V = aM + Vc$ (Vc como una media de la componente del viento en cola o en cara)

Para un sector dado, el mínimo coste del vuelo se conseguirá cuando se adopte una velocidad operacional que haga un balance adecuado entre los costes del combustible a consumir y el tiempo a emplear.

Para un Cost Index determinado las variaciones en la velocidad expresadas como Número de Mach (MN) compensarán las fluctuaciones en el viento relativo.

8.1.2 Costes relacionados con el tiempo de vuelo

Los costes relacionados con el tiempo de vuelo comprenden la suma de muchos factores:

- El coste de cada hora de mantenimiento (excluyendo los costes cíclicos)
- Los costes de tripulantes técnicos y auxiliares por hora de vuelo
- Depreciación marginal de las aeronaves o costes de leasing por cada hora extra de vuelo.

En la práctica esos costes se suelen denominar como marginales, son aquellos en los que se incurre por cada minuto u hora extra de vuelo.

Además de los costes marginales expuestos se pueden añadir otros debido a sobrepasarse los límites de actividad reglamentaria de las tripulaciones, las disconformidades del pasaje, sobreventas de pasaje o pérdidas de conexiones de los mismos. Estos costes son característicos de cada línea aérea y cada una puede hacer un cálculo preciso de las estimaciones en los costes. Es posible establecer la relación entre los costes y los tiempos de llegada y calcular según ese cociente un número para el Cost Index.

En relación con esta gama de coste cuanto más rápido se vuela un avión, más millas se recorren en las que se utilizan los componentes que tienen una relación con el tiempo y las inspecciones del material que caducan por tiempo de vuelo se realizan con más millas voladas. Pero existe un lastre importante en este proceso: la cantidad de combustible extra que se consume para alcanzar esa alta velocidad. Para evitar

un consumo excesivo de combustible el avión debe volar más lento (LRC o MRC como veremos en el punto siguiente). Para resolver ese dilema los FMS utilizarán ambos ingredientes y serán capaces de efectuar un balance de ambos para conseguir la velocidad óptima.

8.1.3 Cálculo del Cost Index.

Figura 72. [24]

$$C_I = \frac{C_{\text{Time}}}{C_{\text{Fuel}}}$$

Como hemos establecido, se busca una fórmula matemática que relacione el coste por tiempo de vuelo con el coste debido al gasto de combustible. Es dato en forma numérica será introducida en los FMS. En los distintos FMS se introduce de una manera diferente siendo en la actualidad un valor que varía entre CI = 0 hasta CI = 99.

La unidades se suelen expresar en Kg/min o alternativamente en 100 Lb/h.

Así nos encontraremos que un CI = 0, ó prácticamente ese valor, es cuando el valor de C_T queremos que sea pequeño y C_F muy grande; estaremos hablando de un valor conducente a un consumo mínimo de combustible (Minimum Fuel Mode ó Maximum Range MRC) que será el caso en el que el coste del combustible sea el primer factor a considerar.

Cuando utilicemos un CI = MAX buscamos un C_T grande y un C_F pequeño con lo que se producirá un vuelo de tiempo mínimo a la velocidad máxima (MMO-0.02 = M 0.82 para un A300-600 y para un A-310, M0.80 para la familia de aeronaves A320, y M0.84 para los A330/340). (en donde MMO es la velocidad máxima operacional expresada en número de Mach y M 0.82 es un 0.82 de la velocidad de 1 Mach o velocidad del sonido)

El CI proporcional una herramienta flexible para controlar el combustible consumido o el tiempo de un vuelo entre esos dos extremos.

Figura 73.

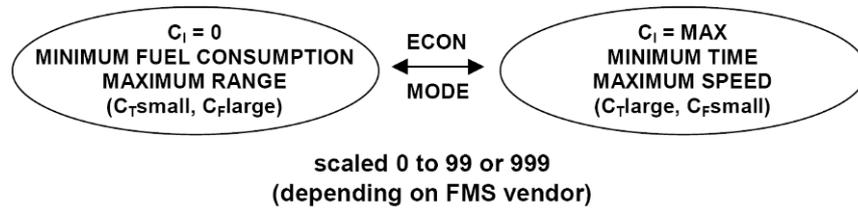
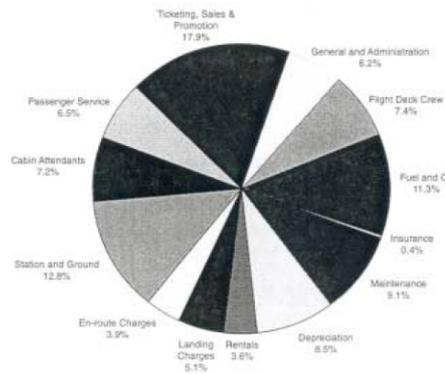


Figura 74.

Figure 2. Distribution of operating costs



En la figura siguiente observamos un gráfico de la IATA en el que se aprecia la distribución de los costes operacionales para una compañía. Estos datos han sufrido un cambio apreciable en el último año ya que los costes debidos al combustible han pasado a suponer una parte muy importante (más del 30% de los costes totales de explotación de una compañía aérea).

El uso que cada una de ellas da al valor del Cost Index depende de su estructura de costes y de sus prioridades como empresa.

En virtud de esas prioridades y de su estructura de costes cada empresa elabora para cada tipo de aeronave unas tablas en las que se determina un valor para cada uso específico.

Traeremos aquí las tablas de referencia para dos “familias” de aeronaves las A319 a A321 (izquierda) y las A330/340 (derecha) de Airbus.

Figura 75.

TIME COST (US\$/min) FUEL COST (US\$/USG)	LOW	MEDIUM	HIGH
	< 10	10 < to < 15	> 15
LOW < 0.7	40	60	80
MEDIUM 0.7 < < 0.9	30	45	60
HIGH > 0.9	25	40	50

TIME COST (US\$/min) FUEL COST (US\$/USG)	LOW	MEDIUM	HIGH
	< 20	20 < to < 30	> 30
LOW < 0.7	90	110	130
MEDIUM 0.7 < < 0.9	70	100	120
HIGH > 0.9	60	80	100

8.1.4 El Cost Index en Boeing

Boeing para una operación eficiente en el consumo del combustible define parámetros como el MRC (Maximum Range Cruise o -velocidad- de crucero de máximo alcance) que es la velocidad a la se recorre el mayor número de millas por unidad de combustible para un peso dado. Es un 1% superior al Long Range Cruise o velocidad de crucero de máximo alcance ya que el volar a la velocidad de LRC el vuelo se vuelve más crítico en caso de turbulencias etc. Al comparar ambas velocidades LRC y MRC establece que:

- LRC= MRC + 1% de consumo de combustible
- Se produce un significativo aumento en la velocidad a MRC con una penalización de un 1% en el recorrido en millas
- Se aumenta la estabilidad en velocidad
- Se minimizan los ajustes de potencia necesarios

Al hablar de otros ajustes de velocidades para un vuelo, utilizados en la Industria, hace referencia al método del Cost Index determinando que cuando se vuela a Cost Index = 0 se maximiza en número de millas voladas por unidad de peso y de combustible consumido y ese valor es igual al que se obtendría aplicando los ajustes necesarios, por viento, a su proceso de MRC

Añade que el seleccionar para la operación un determinado Cost Index se minimizan los costes.

Figura 76. [25]

$$CI = \frac{\text{Time cost} \sim \$/\text{hr}}{\text{Fuel cost} \sim \text{cents}/\text{lb}}$$

Define el proceso de utilizar el Cost Index como el cociente entre el coste por tiempo expresado en dólares la hora entre el coste en combustible expresado en céntimos por libra.

Las tripulaciones de vuelo introducen, en los FMS, el dato de Cost Index que ha sido calculado para cada vuelo por la compañía.

8.2. El ahorro de combustible según Boeing

Conseguir minimizar el costo total del combustible utilizado en la operación es una tarea que implica a diferentes áreas dentro de una empresa como las políticas implementadas por el departamento de operaciones vuelo y el equipo directivo, así como la formación y el quehacer diario de despachadores, tripulaciones y mantenimiento.

Son muchas las oportunidades para realizar una gestión eficiente del combustible, ejemplos de ello son las reservas de combustible, la carga y centrado del avión, la selección de Flaps, la elección de los niveles de vuelo y velocidades de crucero, la definición de las rutas a volar, la gestión del transporte de combustible como carga de pago o “Tankering”, etc.

Veamos, aunque de manera somera, cómo estos aspectos pueden influir en el ahorro de combustible:

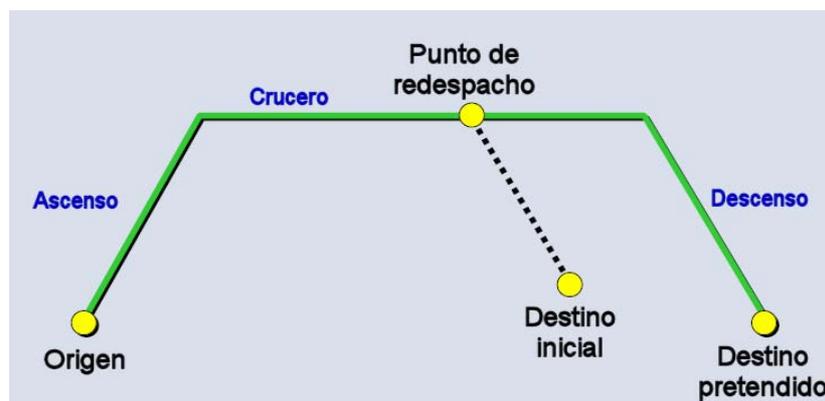
- La carga y centrado del avión, por ejemplo, tiene como consecuencia el centro de gravedad del avión. Dicho centro debe situarse lo más cerca posible del óptimo, puesto que cuanto más se aleje del mismo mayor será la resistencia ofrecida por la aeronave y por tanto mayor será el consumo.
- La selección de Flaps debería ser la menor que cumpla con los requerimientos de performance del despegue, puesto que proporciona menor resistencia al avance y mejores actuaciones de subida, permaneciendo además menos tiempo a altitudes bajas que es donde más se consume.
- La altitud de vuelo debe ser la que nos permita recorrer mayor número de millas por unidad de combustible consumida, para un peso y velocidad determinados. Se deberá volar lo más cerca posible de la altitud óptima, durante el mayor tiempo posible. Para ello se realizan escalones en el ascenso dependiendo de las condiciones atmosféricas y del peso de la aeronave.
- La selección de las velocidades debe ser objeto de estudio por parte de la compañía, que debe valorar, no ya solo el coste de combustible consumido que se minimizaría volando a velocidad de máximo alcance, sino analizando los costes de operación o el valor del tiempo para cada trayecto o tipo de recorrido.

- La elección de la ruta no es tan fácil como escoger el camino más corto entre dos puntos u ortodrómica, puesto que los vientos pueden hacer que una ruta más larga en número de millas sea mucho más corta en tiempo y con un menor consumo.
- El transporte de combustible como carga de pago, es un procedimiento que consiste en transportar más combustible del necesario en un vuelo, con el fin de ser consumido en vuelos posteriores. Los motivos pueden ser, entre otros, por la diferencia de precio de repostado entre aeropuerto de origen y destino, por deficiencias en el servicio, para minimizar el tiempo de escala, etc.
- Otro punto de especial relevancia es el peso al aterrizaje. Veámos este punto con algo más de detalle. El peso al aterrizaje es básicamente el peso operativo de la aeronave en vacío, más la carga de pago transportada, más las reservas de combustible requeridas, más el combustible adicional cargado que no se ha consumido. La reducción del peso al aterrizaje en un 1% da como resultado aproximadamente entre un 0,75% y un 1% de reducción en el consumo del combustible del vuelo. Para conseguirlo, se puede actuar sobre el peso operativo de la aeronave en vacío y sobre el combustible adicional.

Para reducir el peso se pueden evaluar aspectos como los elementos destinados al servicio y entretenimiento de los pasajeros, el transporte de contenedores de mercancía o equipajes vacíos, los posibles equipos innecesarios, el exceso de agua potable a bordo, etc.

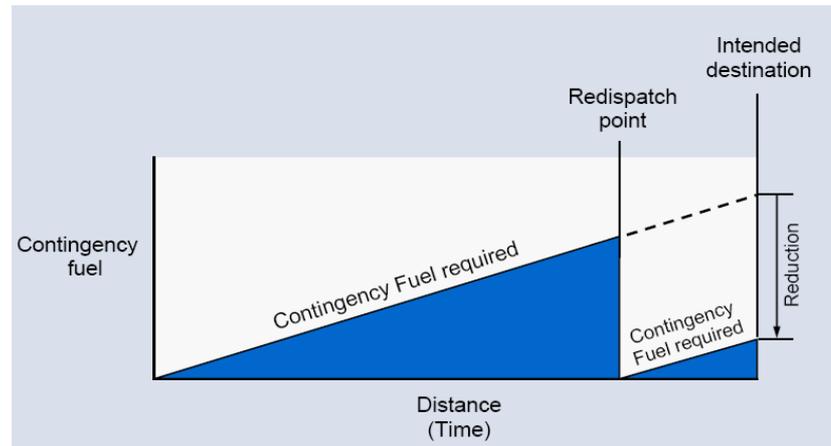
En cuanto al combustible es evidente que no se puede cargar menos de las reservas necesarias para garantizar un vuelo seguro y que cumpla con la normativa establecida. Sin embargo, el combustible que se transporta de más es al final peso extra y consume combustible. Para minimizar la carga se han desarrollado procedimientos específicos como el “redespacho en vuelo”, cuyo objetivo es reducir el combustible necesario de despacho par un determinado vuelo, bien para maximizar la carga de pago o para hacer viable un vuelo, que permite planificar el vuelo a un aeropuerto inicial.

Figura 77.



Llegados a un determinado punto y no habiéndose producido contingencias en el vuelo, se evalúa la cantidad de combustible que, si supera una cantidad determinada, permite dirigirse al destino pretendido en vez de al inicial, con una cantidad menor de combustible de contingencia que si inicialmente hubiésemos despachado el vuelo al aeropuerto pretendido.

Figura 78.



Son múltiples las áreas dentro de una compañía aérea que tienen influencia en el consumo final del combustible, veámos algunos ejemplos de los diferentes implicados en la operación.

Las tripulaciones técnicas pueden gestionar el vuelo en las distintas fases para minimizar en lo posible el consumo. Ejemplos son, asumir las demoras en parking cuando les sea permitido, demorar la puesta en marcha coordinando con el control aeroportuario la hora de despegue, minimizar el uso de APU o unidad de potencia auxiliar, dando preferencia al uso de unidades terrestres para el suministro de energía eléctrica y aire acondicionado. Gestionar los niveles de vuelo óptimos, cálculo del punto de descenso, minimizar el uso del freno aerodinámico, retrasar en lo posible el utilizar superficies hipersustentadoras que aumentan la resistencia en la aproximación, etc.

Los despachadores de vuelo deben tener en cuenta, entre otros, el minimizar el peso al aterrizaje, no cargar más combustible de reserva del requerido, optimizar el centro de gravedad en lo posible, gestionar el plan de vuelo en la ruta, las altitudes y velocidades óptimas, utilizar el “Tankering” cuando sea apropiado, etc.

El personal de mantenimiento tiene que evaluar los beneficios de mantener los sistemas, la célula y los motores del avión con el objetivo de minimizar la resistencia ofrecida en el vuelo. Eliminando superficies rugosas, sucias, con pérdidas, mínimos escalones o desajustes entre paneles, compuertas, registros, etc se puede conseguir disminuir la resistencia ofrecida y por tanto reducir el consumo.

Como hemos visto, ahorros importantes en el consumo de combustible de una compañía aérea son el resultado de la acumulación de pequeñas y múltiples acciones y políticas encaminadas a minimizar el gasto. Son múltiples los aspectos que tienen influencia en el gasto de combustible de una compañía aérea y esta gestión tiene influencia a su vez en otras cuentas de gasto, como de equipos, personal, mantenimiento, etc. Por tanto, cada compañía debe evaluar dichas interrelaciones en aras a conseguir un equilibrio que minimice sus costes de operación.

8.3. La perspectiva de Airbus

Debido a la escalada de precios del combustible y al impacto directo que este coste tiene en la operación, Airbus ha publicado un folleto, “Getting to grips with fuel economy”, publicado, en su tercera edición, en julio del 2004, en el que se daba a los operadores una serie de recomendaciones para el ahorro de combustible.

Estas recomendaciones complementan, en las distintas fases de la operación, el compromiso tiempo-combustible que persigue el uso del Cost Index (ver punto 7.1).

En el contexto actual, las compañías aéreas no sólo buscan el ahorro del combustible sin más. Hay muchos factores que pueden afectar a la cantidad de combustible que se carga para un vuelo concreto, como por ejemplo el precio de dicho combustible en el aeropuerto de salida o destino, el coste que en si mismo tiene el intentar ahorrar combustible, etc.

Hay muchos factores que afectan al consumo, muchos controlados directamente por la compañía, como el mantenimiento que se realiza a los aviones, la planificación que la compañía realiza de un vuelo en función de su estrategia comercial o la misma ejecución de la operación antes, incluso, de que el avión ponga en marcha sus motores. De hecho, la mayor parte de la estrategia de ahorro de combustible se decide y se lleva a la práctica en las fases de preparación del vuelo.

8.3.1 Planificación del vuelo

Lo más importante a la hora de realizar una operación desde el punto de vista del ahorro es precisamente una adecuada planificación del vuelo buscando los perfiles óptimos. Airbus, en sus manuales de operación incluye en uno de sus capítulos todas las tablas de actuación (performance), del avión para poder planificar adecuadamente todas las fases del vuelo, de manera que cuando el avión pone en marcha sus motores, la mayor parte de la estrategia ya ha sido decidida para optimizar el consumo.

Por supuesto, la compañía depende de una correcta información en cuanto a vientos, temperaturas, etc., que ayudarán a un cálculo correcto de las actuaciones del avión. Partiendo de unos datos lo mas exactos posibles, el sistema de planificación ayudará a optimizar la ruta, para que esta se adecue a los criterios económicos de la compañía.

Además, Airbus, no solo proporciona información referente a la planificación del vuelo, sino que a esto le añade un programa de monitorización de las prestaciones del avión, para poder ir observando la posible degradación del mismo en función de su utilización, (ya vimos anteriormente la afección que tiene en el consumo el posible mal estado de las superficies aerodinámicas o de otras partes del avión). Esto ayuda a que el vuelo se ajuste lo máximo posible a lo que se ha planificado y optimizado en tierra.

Además, el fabricante en sus manuales define perfectamente los procedimientos a ejecutar en el vuelo para conseguir mejorar el rendimiento del avión, ya que si la operación se efectúa siguiendo los procedimientos recomendados por el fabricante y se utilizan adecuadamente las herramientas de gestión que incluye el avión, (como el FMGS que se describió en la sección 7.1), la operación será lo más fiel posible al perfil de vuelo óptimo que se planificó en tierra. Mas adelante describiremos las recomendaciones del fabricante para cada fase concreta del vuelo.

8.3.2 Procedimientos pre-vuelo

Además de una adecuada planificación del vuelo, antes del mismo se pueden y deben tomar una serie de medidas encaminadas al ahorro de combustible. Airbus define incluso unas recomendaciones para ahorrar antes incluso de que el avión despegue.

Lo fundamental en esta fase pre-vuelo es precisamente una adecuada carga del avión. Cuando un avión se carga, su peso total es la suma de: el “peso operativo seco del avión” (el avión con todo lo que necesita para realizar el vuelo incluida la tripulación, pero excluyendo el combustible), la “carga de pago” (incluye el peso de los pasajeros, su equipaje, la carga y el correo) y el combustible necesario para hacer el vuelo.

En una adecuada planificación se deberán obtener los pesos más reales de estos tres conjuntos para poder aproximarse al máximo al perfil óptimo. Para ello Airbus desarrolla herramientas para conocer lo más detalladamente posible el peso operativo seco de sus aviones en función de los equipos y requerimientos que cada operador establece para su operación.

Igualmente establece herramientas para que los requisitos de combustible (lo que va a gastar un determinado avión en un vuelo concreto) se ajusten a la realidad lo máximo posible. De esta forma, se pretende que se cargue la cantidad justa para realizar el vuelo según el perfil óptimo, teniendo en cuenta la necesidad de cargar ciertas reservas adicionales según la normativa de seguridad vigente.

Si a esto le añadimos, por parte del operador, una aproximación fiable al peso real de la carga de pago se podrá determinar con más fiabilidad el perfil óptimo según los programas de performance del fabricante y, de esta manera, realizar unas predicciones de consumo lo más ajustadas posibles.

Airbus ha determinado que, en sus aviones, despegar con 100 kilos de peso extra requiere de un incremento en el consumo de 5.000 kilogramos adicionales de combustible por avión al año. Por tanto, cuanto más se pueda ajustar la suma total del peso operativo seco más la carga de pago más el combustible, más ligero será el vuelo y menos consumo final tendrá ya que, además, alcanzará el nivel de vuelo óptimo más rápidamente.

En algunos casos, aunque el mínimo consumo se obtiene de cargar el combustible justo para realizar ese vuelo en concreto, las compañías pueden decidir que es más económico cargar más combustible del requerido. Esto ocurre cuando el precio del combustible en el aeropuerto de destino es más alto que en el de salida. Como el cargar más peso supone un incremento de consumo, hay que determinar cuidadosamente el punto en el que el precio más barato del combustible en el aeropuerto de salida compensa el incremento en el gasto de transportar ese combustible extra, llamado “tankering”. Airbus, por medio de sus programas de planificación también ayuda a encontrar ese punto de equilibrio.

Pero aquí no terminan las recomendaciones de Airbus con respecto a la carga, ya que si despegar con el peso justo ayuda al ahorro, también es imprescindible un adecuado reparto del peso en el avión.

En el caso concreto de los aviones de Airbus, el fabricante ha determinado que repartir la carga de manera que el centro de gravedad quede hacia la parte trasera del avión ayuda a ahorrar combustible.

Esto ocurre porque si el centro de gravedad se adelanta en exceso el avión tiende a bajar el morro. Esto se compensa por medio del timón horizontal, que se ajusta para

que proporcione una menor carga aerodinámica. Al hacer esto el ala tiene que compensar esta falta de carga aerodinámica proporcionando mas carga por si misma, lo que a su vez incrementa la resistencia inducida y por tanto, el consumo se combustible. Al retrasar el centro de gravedad el timón puede “volar más” y así repartirse mejor con el ala la carga aerodinámica, esto le quita carga al ala que al “volar menos” presenta una menor resistencia inducida.

Airbus no sólo ha creado unas herramientas para la correcta distribución de carga y pasaje a bordo, sino que además ofrece en algunos de sus modelos un sistema de “reequilibrado” automático del peso, trasvasando combustible adelante y atrás en función de las necesidades del centro de gravedad.

Una vez que el avión esta listo para el vuelo, todavía quedan aspectos de la fase de antes del despegue en los que Airbus considera que se puede ahorrar combustible.

Todos los aviones van equipados con una pequeña turbina llamada A.P.U. (Auxiliary Power Unit) o Unidad de Potencia Auxiliar, que se encarga de proporcionar al avión en tierra (en ocasiones también en vuelo) tanto energía eléctrica como suministro de aire para acondicionar el avión o poner en marcha los motores, haciendo de esta manera al avión independiente de los equipos de tierra.

Es evidente que el consumo de combustible del A.P.U. es muy poco si lo comparamos con el de los motores, pero Airbus recomienda a sus operadores una serie de pautas para conseguir ahorrar durante las operaciones en tierra.

Su primera recomendación es que durante las paradas nocturnas del avión o durante escalas largas entre vuelos el avión utilice los equipos de tierra (de la propia compañía o del aeropuerto) para los suministro de corriente eléctrica y aire acondicionado.

Sin embargo, para las escalas mas cortas, de unos 45 minutos de media, Airbus recomienda a sus operadores que si el avión pone en marcha el A.P.U., ya no lo desconecte hasta el inicio del siguiente vuelo. El motivo: evitar ciclos de puesta en marcha al A.P.U. que es lo que más desgasta sus componentes y más consumo de combustible tiene. En cualquier caso, hoy en día muchos aeropuertos restringen el uso del A.P.U. a un determinado periodo de tiempo antes de la puesta en marcha de los motores para reducir la contaminación acústica.

Otra manera de reducir el consumo de combustible antes del despegue consiste en gestionar un buen rodaje antes de la salida. El rodaje es la operación de puesta en marcha y carreteo hasta la pista de despegue. Airbus recomienda que se ajuste al máximo posible la puesta en marcha para evitar el estar demasiado tiempo con los motores encendidos antes del despegue, además recomienda que si se trata de aviones con dos motores se ponga en marcha un solo motor y se ruede hasta la pista de despegue de esa manera, para a continuación poner en marcha el segundo motor justo antes de la salida. Esta fase de antes del vuelo ha ido aumentando en duración ya que al ir creciendo el tamaño de los aeropuertos y la congestión en los mismos, los tiempos de rodaje han llegado en algunos casos hasta cerca de una hora desde que se ponen en marcha los motores hasta que el avión es autorizado a despegar.

8.3.3 Procedimientos en vuelo

Desde el primer momento del vuelo, el despegue, se puede ahorrar combustible. Airbus recomienda, para minimizar el consumo, que el despegue se realice siempre quitando el aire acondicionado del avión. Esto se hace en los dos primeros minutos del vuelo y se consigue que, al no tener que incrementar la potencia por el sangrado del aire acondicionado y para alcanzar una altitud adecuada, los motores den sólo la potencia justa para el despegue reduciendo así el consumo. Si además el despegue se realiza con el menor ajuste de flaps, (menos extendidos), también la resistencia será menor y por tanto la potencia necesaria, y el consumo, serán menores.

Durante el ascenso también se puede ahorrar combustible según Airbus, ya que establece que hay que alcanzar un equilibrio entre subir demasiado despacio, lo que requeriría una aceleración mayor una vez alcanzado el nivel de crucero, y subir con demasiada velocidad, ya que esto hace que la senda de ascenso sea más baja y que se necesite más distancia para alcanzar el nivel de crucero (se entiende que será el óptimo). Por tanto se recomienda que en el ascenso se utilicen las velocidades que el FMGS establece como ideales, esto es, dejar que el FMGS gestione el ascenso, lo que en la jerga de Airbus se denomina “modo MANAGED”.

Igualmente, en la fase de crucero, se recomienda que sea el FMGS el que gestione la velocidad de crucero ya que, si tiene una correcta y actualizada información de vientos en altura y gracias al uso del Cost Index, el sistema puede encontrar un compromiso entre el consumo y el tiempo empleado para realizar el vuelo. Hay que tener en cuenta que el crucero suele ser la fase mas larga del vuelo y los ahorros que se consiguen son los más significativos. En esta fase, los dos factores que más afectan el consumo son la velocidad y la altitud. El FMGS calcula un nivel de vuelo óptimo que irá aumentando a medida que el avión se haga más ligero según consume combustible. Airbus recomienda que se suba lo antes posible a este nivel de vuelo óptimo (siempre y cuando el A.T.C. o Control del Tráfico Aéreo lo permita) y que se vuele con la velocidad calculada según el Cost Index.

El descenso también es una fase en la que se puede ahorrar combustible. En principio el FMGS calcula un perfil de descenso en el que los motores llevan potencia de ralentí. Si el descenso comienza demasiado pronto el avión incrementará la potencia hasta alcanzar ese perfil de descenso ideal, lo que aumentará el consumo. Por tanto, Airbus recomienda que se inicie el descenso en el punto calculado por el FMGS en función del Cost Index y que, al igual que el ascenso y el crucero, el descenso se realice en modo MANAGED, (gestionado por el FMGS).

Durante el descenso y antes de la aproximación pudiera ocurrir que el aeropuerto esté congestionado por lo que el A.T.C. puede ordenar al avión que entre en un circuito de espera (ruta en forma de hipódromo) para que el avión espere hasta que le toque el turno para la aproximación. En estos casos se recomienda que, si se sabe con antelación o se prevé que se va a tener que entrar en la espera, se reduzca la velocidad para retrasar la entrada en la misma, ya que es mas ahorrativo hacer un descenso con menos velocidad que volar nivelado en la espera, por el consumo que tienen los motores para mantener el vuelo nivelado.

Si es inevitable volar la espera se recomienda que se vuele a la velocidad en la que la relación sustentación/resistencia es la mejor. Esta velocidad, calculada por el FMGS, es la que permite volar con el menor consumo posible para el vuelo recto y nivelado.

Por último, las recomendaciones que da Airbus para la última fase del vuelo, la aproximación y el aterrizaje, son que se hagan los más estabilizadas posibles, esto es, cumpliendo con los adecuados márgenes de velocidad, altura, etc. Ya que si se entra demasiado deprisa o se extienden los flaps o el tren de aterrizaje más tarde para ahorrar combustible se corre el riesgo de que se excedan los márgenes de seguridad, lo que obligaría a interrumpir la aproximación motivando el tener que volver a ascender y recolocarse para una nueva aproximación. Esto obviamente requeriría un gasto mucho mayor que no compensaría el ahorro producido por el hecho de extender más tarde el tren de aterrizaje o los flaps.

8.3.4 En resumen

Como hemos visto Airbus ha diseñado la operación del avión como un todo, desde la planificación del vuelo hasta la ejecución del mismo, con el ahorro de costes como una de sus principales bazas a la hora de la comercialización de sus aviones. No sólo a la hora de diseñar y construir sus aviones, sino además desarrollando una serie de herramientas informáticas para optimizar la operación del avión cuando éste es entregado a sus clientes, consiguiendo así ahorrar en el consumo de combustible.

8.4. Los consejos de la IATA

La Asociación Internacional del Transporte Aéreo IATA fue creada hace unos 60 años por un grupo de líneas aéreas; en la actualidad, con 230 miembros que representan al 93% del tráfico aéreo internacional, es un referente para la industria de las líneas aéreas en el mundo. Son miembros de la IATA solo las aerolíneas pero sus estándares y sus grupos de trabajo están formados y dirigidos a las líneas aéreas, los aeropuertos, las agencias de viajes y los intermediarios de viajes y de turismo, los agentes de carga y los suministradores de piezas y servicios para la industria aeronáutica en general.

Entre sus objetivos está el de desarrollar estándares comerciales para la industria global del transporte aéreo. Ayuda a las líneas aéreas a simplificar procesos incrementando la satisfacción de los pasajeros, mientras se reducen los costes y se mejora la eficiencia. En el terreno de la seguridad operacional ha creado un estándar denominado IOSA (IATA's Operational Safety Audit o Auditoría de Seguridad según los estándares de IATA) que se está convirtiendo en una medida de necesario cumplimiento para participar en el negocio aéreo.

Sus áreas de actividad se dirigen a las operaciones aéreas, los aeropuertos y los servicios de la Navegación Aérea, la carga aérea, la economía en el transporte, el medio ambiente, las finanzas, los pasajeros, las políticas y reglamentaciones, la seguridad en tierra y en vuelo, la forma de simplificar el negocio y los viajes y el turismo.

Dentro del área de asuntos económicos ("IATA Economics") tienen una especial relevancia su observatorio de los precios del combustible.

Si bien las aerolíneas de manera individual intentan ejercer cierto control sobre los gastos del combustible a través de estrategias de cobertura, una práctica en la que se pone un tope a los precios del combustible con meses o años de anticipación con contratos a largo plazo, como hemos visto en las partes precedente de este trabajo, la IATA colabora con ellas mediante informaciones diversas.

Tiene un observador permanente de los precios del petróleo en todas las regiones del mundo. Dentro de su página web (www.iata.org) tiene un apartado denominado “Observatorio de los precios de combustible para reactores (Jet Fuel Price Monitor http://www.iata.org/whatwedo/economics/fuel_monitor/index.htm)” que toma y actualiza los datos semanalmente de la página del suministrador principal de información energética Platts (www.platts.com).

El índice semanal y los datos de precios muestran en esta información el precio medio pagado en las refinerías por el combustible de aviación para reactores.

Dentro de sus grupos de trabajo uno especialmente activo es el IATA Commercial Fuel Group (CFG) que realiza una supervisión y dirección de los intereses de los miembros en todos los aspectos que hacen referencia a los combustibles en aviación en todas las regiones del mundo.

La organización realiza de forma periódica cursos sobre Aviation Fuel Management (Gestión del Combustible en Aviación) dirigidos a desarrollar las mejores prácticas para la gestión de ese factor.

Publica con cierta regularidad además un manual denominado Guía y Buenas prácticas para la gestión de combustible y medioambiente (Guidance Material and Best Practices for Fuel and Environmental Management) del que hablaremos a continuación.

El 24 de agosto de 2004 alarmados por el progresivo y constante incremento del precio de combustible, IATA lanzó un plan para dirigir, dar respuestas y soluciones a compañías que quisieran reducir la factura de combustible. Estas conclusiones están basadas en el estudio pormenorizado de cada fase del vuelo desde el despacho hasta su gestión por el ATC. En el prólogo se pone de manifiesto que, en ningún caso, estas aportaciones deben conducirse de forma alguna que pueda reducir la seguridad y antepone ésta sobre cualquier ahorro.

Los números macroeconómicos a gran escala son impresionantes, insignificantes reducciones en cada vuelo individual pueden suponer dejar de arrojar a la atmósfera miles de toneladas de gases contaminantes además del consiguiente ahorro financiero.

El despacho de vuelo es especialmente importante, ya que en función de los parámetros escogidos, la cantidad de combustible a cargar puede llegar a ser muy distinta. Estos parámetros son:

- La utilización del Cost Index, parámetro que ya hemos detallado con anterioridad
- Alternativos elegidos, en función del aeropuerto y del tipo de avión puede haber alternativas cercanas o no. En el caso de un A320 con destino Madrid, se pueden considerar 4 aeropuertos alternativos a menos de una hora de vuelo, pero en el caso de un A380 en un vuelo dirigido a una zona despoblada puede ser que el alternativo más cercano se encuentre a horas del destino, con lo que la cantidad de combustible necesario para proceder a un desvío puede, en ocasiones, llegar a limitar el propio vuelo
- Combustible adicional, este parámetro lo dicta la experiencia o la estadística, si lo normal es realizar esperas al llegar al destino, será conveniente tener preparado ese gasto extra para poder gestionar correctamente el combustible a bordo.

- Re-despacho, como en el caso citado de los alternativos, la limitación puede ser tal que sea conveniente realizar un re-despacho, es decir, determinar un punto en la ruta en el que, al sobrevolarlo, se debe tomar la decisión de continuar a destino o desviarse al alternativo si el destino está con condiciones deficientes.
- Tankering, económicamente puede resultar más barato transportar el combustible que comprarlo en el destino para la vuelta.
- Gestión del peso: a bordo de la aeronave se transporta muchas veces material que bien podría quedarse en tierra y que sumado es una cantidad importante. Estamos hablando de prensa caducada, exceso de propaganda a bordo, excesos de venta a bordo, contenedores no usados en galleys y bodegas, suciedad acumulada, exceso de aguas, no vaciar las aguas residuales en cada escala,...
- Gestión del centro de gravedad. Los nuevos tipos de avión son capaces de modificar el centro de gravedad trasladando combustible a/desde depósitos traseros para mejorar hasta un 4% el consumo de combustible optimizando la resistencia generada por la presentación del avión, es decir, su ángulo de ataque.

En la preparación de cabina IATA propone como puntos a tener en cuenta:

- una buena programación de los sistemas gestores de vuelo por la tripulación, la carga de valores de viento y temperatura lo más ajustados a los reales de que se tenga constancia.
- El Cost Index y el nivel de vuelo elegidos deberán ser lo más parecidos a los escogidos en el despacho de vuelos ya que este proceso fue realizado de forma óptima.
- El uso de APU, Unidad de Energía Auxiliar instalada a bordo, debe ser el mínimo posible en favor de los servicios de aire acondicionado y electricidad proporcionados por el aeropuerto, en principio mucho más eficientes.

Durante el rodaje de salida propone rodar sin arrancar todos los motores, especialmente con vuelos bajos de peso. También hay que tener en cuenta las contrapartidas de esta propuesta y reflexionar sobre su uso en determinadas ocasiones más favorables. La velocidad de rodaje debe ser lo mayor posible sin que comprometa la seguridad de la operación, el grupo de expertos decidió que hasta 30Kts puede ser una velocidad razonable. Sería importante poder gestionar el uso de pistas para minimizar los rodajes y los tiempos de vuelo.

El despegue se suele realizar con empujes inferiores a los que el motor puede llegar a dar por así mejorar el consumo y proteger las actuaciones del motor a largo plazo, tras el despegue es conveniente virar lo antes posible en la dirección del destino y acelerar con el objetivo de limpiar el avión y dejarlo aerodinámicamente 'limpio'. Esto contrasta con las rutas establecidas por procedimientos anti-ruido.

En la fase de crucero es importante mantener la ruta lo más acertadamente posible y gestionar los niveles de vuelo óptimos en cada momento. La velocidad juega un papel muy importante, que habrá ya regulado la opción de Cost Index escogida.

En el descenso se prima el planeo completo desde el nivel de crucero hasta la fase final de aproximación sin hacer uso de los motores ni de los frenos aerodinámicos. Los sistemas de gestión de vuelo modernos, integrados en la aviónica de los aviones, son capaces de procesar toda la información y en función de la veracidad de los datos

introducidos tendrán un determinado margen de error que en la mayoría de los casos irá corrigiendo a medida que vaya recalculando el descenso y conociendo los datos reales.

Los pilotos como en cada fase deben comprobar los datos y realizar los cálculos para detectar posibles errores. Como norma general se puede asumir que un avión necesita, con motores en ralentí y sin usar los aerofrenos:

- 1NM para reducir la velocidad 10Knts
- 3NM para descender 1.000 ft.
- La desaceleración y el descenso no son compatibles simultáneamente.
- Las reglas antes citadas deberán ser corregidas por viento, temperatura, peso del avión, uso de sangrado de motores para anti-hielo, restricciones ATC,...

Durante la aproximación final y el aterrizaje se recomienda una ‘aproximación decelerada’. Esta consiste en mantener energía potencial manteniendo el avión a una velocidad tal que no haga falta el uso de potencia de los motores. Si se aprecia que se ha descendido mucho se deberá reducir a la velocidad de mejor planeo, si se aprecia que se han quedado altos se recomienda incrementar velocidad bajando más rápidamente y así generar más resistencia y reducir el tiempo. Se requiere de la tripulación de cabina de pilotaje que en función del tráfico y su posición adecuen el avión para mantenerlo el mayor tiempo posible en configuración limpia y sin usar aerofrenos o motores. La nota final es poder completar la aproximación final en visual ahorrando un tiempo de vuelo precioso y, por tanto, combustible. Es de destacar la colaboración necesaria entre ATC y pilotos para llevar a cabo este tipo de aproximación final visual tan ventajosa.

La reducción del calaje de superficies hipersustentadoras es otro punto a considerar por el ahorro de combustible que supone aunque deben considerarse otros factores que afectan a la seguridad para decantarse por su uso en estas circunstancias.

El uso de reversas en ralentí durante el aterrizaje tiene numerosas ventajas frente a su uso a toda potencia, entre ellas están las que obviamente estamos tratando de reducción de combustible, así como comodidad para pasaje, mantenimiento de motores eliminando picos cortos pero importantes de gran potencia, posibilidad de ingestión de objetos extraños, menor ruido en la operación y menor emisión de gases. Obviamente debe evaluarse en cada momento la idoneidad de su uso por la tripulación.

En la fase de rodaje al aparcamiento se recomienda el rodaje con algún motor apagado.

Adicionalmente la cultura de empresa puede hacer que haya una diferencia de casi un 2% en el ahorro en función de la forma de gestionar el combustible por parte de sus tripulaciones. Así también el mantenimiento de las aeronaves es crucial ya que cualquier defecto que afecte mínimamente la aerodinámica del avión tendrá un efecto importante en el gasto anual de combustible de esa matrícula (sirva como ejemplo un desajuste o falta de sello en una junta, puede suponer casi 40.000 litros anuales extra de gasto de combustible en un solo avión).

El Control del Tráfico Aéreo ATC es responsable también de parte importante del proceso de ahorro de combustible. El programa de la IATA “Ahorra un minuto” pretende concienciar a este colectivo sobre la importancia de su función como

gestores del tráfico aéreo y su efecto en las cuentas de resultados de las compañías aéreas.

Otro dato importante a destacar es la forma de gestionar el tráfico: se ha demostrado que separar aviones por vectores es muy caro, siempre es preferible la separación por velocidad y, en caso de tener que realizar esperas en hipódromo, cuanto más alto se hagan mejor, aunque no tanto que luego, para descender hasta la altitud del aeropuerto, sea necesario hacer uso de los aerofrenos.

Los controladores del ATC pueden mejorar la eficiencia de las operaciones colaborando con las tripulaciones en las peticiones de estas aprobando el uso de pistas favorables, coordinando tramos directos entre puntos de una ruta, autorizar niveles óptimos, usando técnicas de separación por velocidad, dejar volar al avión en valores óptimos imponiendo las menores restricciones posibles, cancelando o acortando las SIDs y STARs para volar la menor distancia posible, etc.

8.4.1 Programa de IATA para la conservación del combustible (IATA Fuel Conservation Programme)

La IATA ha lanzado este programa y se ha planteado como objetivo ahorrar USD 1,5 Billion de USD mejorando rutas, infraestructuras, gestión del tráfico aéreo (Campaña “Ahorra un minuto” Save-One-Minute) y la eficiencia operacional.

En fecha de mayo de 2007 contaba ya con 85 inspectores reconocidos, 51 aerolíneas asociadas e inspecciones realizadas en 838 aeropuertos en un intervalo de 2 años.

Se basa en equipos que tienen como función visitar estas aerolíneas asociadas, que comprenden desde las más pequeñas, de ámbito local y con flotas variadas y reducidas hasta las grandes aerolíneas, llamadas de bandera, todas ellas ubicadas en regiones amplias del mundo.

Actualmente el potencial de ahorro es de USD 1,2 Billion.

Entre las conclusiones se detalla que puede realizarse un ahorro de combustible en varios frentes;

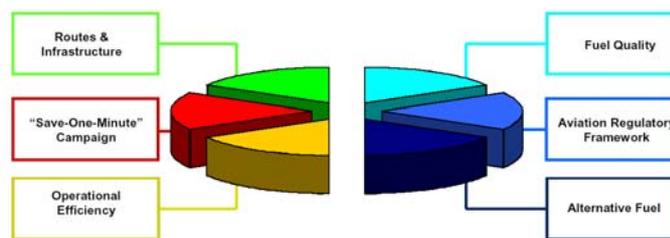
- En la operación de vuelo, si los aviones se aligerasen de elementos superfluos que se transportan cada vuelo sin ser realmente necesarios, con reservas de combustible calculadas con menos conservadurismo, reduciendo el uso de la unidad auxiliar de energía instalada a bordo de los aeronaves en favor del uso de la energía exterior que brinda el aeropuerto, implementando una gestión y seguimiento de los vuelos en muchos casos inexistente.
- Desde el despacho de vuelos se podría mejorar el planeamiento, los procedimientos y las políticas de compañía, incluyendo información más clara y completa, de forma que las variaciones en los consumos de combustible individuales de cada tripulación se homogeneizaran.
- Desde el mantenimiento podría optimizarse la comunicación con los departamentos de operaciones, de este modo podrían valorarse mejor las relaciones entre ahorro de combustible y costes extra de mantenimiento. Además no existen análisis desde las ingenierías de las compañías, que cubran largos periodos, de las actuaciones de las aeronaves.

Prácticamente una décima parte del combustible ahorrado en el periodo comprendido entre 2004 y 2008 ha tenido su origen en las causas y soluciones identificadas por este programa a lo largo de su ejecución.

8.4.2 Campaña de IATA para la eficiencia en el gasto del combustible

Figura 79.

Campaign Elements



A fecha 21 de septiembre de 2006 el aumento del precio de combustible había generado un comprensible interés entre las compañías aéreas por reducir la factura económica de éste. Hoy en día con los dramáticos aumentos del precio esta campaña toma especial relevancia.

Se han puesto en marcha proyectos para buscar soluciones que aboquen a la reducción de consumos en términos macroeconómicos, estos proyectos son la mejora de infraestructuras, el proyecto “Ahorra un minuto” y los equipos para mejorar la eficiencia operacional del programa de IATA para la conservación del combustible.

En el tema de infraestructuras se podría trabajar en conjunto, aerolíneas, gobiernos y proveedores de servicios, para estudiar la mejora de las rutas y su optimización, analizar los espacios aéreos y racionalizar las rutas de aproximación y salida.

Otro apartado donde hay mucho campo que estudiar es el de combustibles alternativos.

A la idea de mejorar la eficiencia del combustible tradicional derivado del petróleo, se unen cada vez con más fuerza, otras opciones como el hidrógeno, combustibles sintéticos y mezclas con biocombustibles. El encarecimiento progresivo del barril está generando en el mercado movimientos a favor del desarrollo de nuevos conceptos, en estado latente hasta ahora y que cada vez más, se hacen atractivos económicamente. Bien es cierto que estos cambios, más que ahorro monetario, están más enfocados a reducir las emisiones a la atmósfera.

8.5. La circular 303 de la OACI

En consonancia con los esfuerzos realizados tanto por la IATA como por los fabricantes en la elaboración de recomendaciones encaminadas al ahorro de combustible, también la OACI ha propuesto una serie de medidas dirigidas a todos los actores involucrados en el transporte aéreo, líneas aéreas, aeropuertos, proveedores de servicios de tránsito aéreo y organismos gubernamentales, para conseguir mitigar el consumo de combustible y, por tanto, la emisión de contaminantes.

La OACI (Organización de Aviación Civil Internacional) es una agencia de las Naciones Unidas con sede en Montreal que se creó con el Convenio de Chicago de 1944 y que tiene como objetivos “desarrollar los principios y la técnica de la aviación aérea internacional y fomentar la formulación de planes y el desarrollo del transporte aéreo internacional”. Para lograrlo, fomenta el progreso de la aviación civil, el diseño y manejo de las aeronaves con fines pacíficos y estimula el desarrollo de rutas y aeropuertos.

La OACI publica cuando la circunstancia lo requiere unos documentos denominados “Circulares” que tienen como propósito el facilitar información especializada de interés para los Estados contratantes de sus convenios y que comprenden estudios de carácter técnico.

Esta circular, la 303, elaborada por el Comité sobre la Protección del Medio Ambiente y la Aviación (CAEP) de la OACI, no pretende ser una base de medidas normativas sino simplemente una sugerencia de cambios en los procedimientos para minimizar el consumo, cambios que deberán de ser aprobados por los operadores, los fabricantes y muy especialmente por las Autoridades Aeronáuticas respectivas. Como veremos son un resumen de las iniciativas ya lanzadas por los grandes fabricantes, las agencias de seguridad y las asociaciones internacionales.

El enfoque de estas propuestas es múltiple ya que las recomendaciones afectan a todos los actores, desde las opciones en tierra de fabricantes, operadores, aeropuertos y proveedores de servicios de navegación hasta las opciones en vuelo para que las tripulaciones puedan operar con total seguridad, máxima prioridad de esta circular, reduciendo el consumo de combustible.

Pero antes de analizar las propuestas en concreto, hay que ver en qué contexto se han decidido.

8.5.1 Antecedentes

LA OACI, desde el Comité sobre la protección del medio ambiente y la aviación (CAEP), y antes desde su predecesor el Comité sobre Emisiones de los Motores de las Aeronaves, siempre se ha interesado en la normativa de emisiones para nuevos motores. En un principio se afrontó el problema de la contaminación cercana a los aeropuertos, es decir, lo relacionado únicamente con las fases de despegue y aterrizaje, pero ahora se ha hecho un esfuerzo por considerar el vuelo como un conjunto, ya que en muchos casos la fase de crucero constituye la mayor parte del vuelo.

Además de la OACI, otros órganos de las Naciones Unidas como la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), se han involucrado en la reducción de emisiones, realizando inventarios nacionales de las fuentes de emisiones. Estos inventarios incluyen los vuelos nacionales, aunque en el caso de los

vuelos internacionales, al no haber un acuerdo entre las partes, se solicita de la CMNUCC, a través del Protocolo de Kioto, que los países reduzcan o eliminen la emisión de gases con la ayuda de la OACI.

La OACI, a través del CAEP, primero se ha centrado en reducir la emisión de los motores, aunque también ha dirigido sus esfuerzos en tratar de comprender que componentes de los gases de escape había que reducir. Para conocer más en profundidad el impacto de la aviación en el medio ambiente se preparó un Informe especial del Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en el que se estimaba que aproximadamente el 3.5% de la fuerza radiante de las emisiones procedentes de la actividad humana, provenían de las aeronaves.

Para tratar de mitigarlas, el IPCC recomendaba avanzar en una mejora de las innovaciones tecnológicas, aunque reconoce que este tema es complejo, ya que aunque los aviones han mejorado significativamente desde hace 40 años, (son en la actualidad un 70% más eficientes que entonces), ciertas mejoras en los motores son complicadas. En cualquier caso, se espera una mejora de la eficiencia de un 20% para el 2015 y de un 40% a un 50% para el 2050.

También el IPCC recomendaba cambios en las medidas normativas con reglamentos más estrictos sobre emisiones y mejoras operacionales, especialmente en la gestión del tránsito aéreo (ATM), que se espera que reduzca las emisiones entre un 8% y un 18%.

Basadas en todas estas recomendaciones la OACI plantea sus propuestas en esta circular.

8.5.2 Recomendaciones

Como ya hemos visto con anterioridad muchas de las recomendaciones propuestas en esta circular son las realizadas por la IATA o los fabricantes, expuestas en capítulos anteriores, y nos limitaremos a citarlas. Trataremos más en detalle ciertas propuestas relacionadas con la mejora de la gestión del tránsito aéreo, elemento clave para OACI en la reducción del consumo de combustible.

Desde el principio de la circular se hace especial énfasis en que, para la OACI, ninguna de las medidas que se proponen pueden comprometer de manera alguna la seguridad operacional, y que hay normas actuales establecidas por los Estados que afectan al consumo (por ejemplo: el despegue con procedimientos de atenuación de ruidos) y que, aunque pudieran reducir puntualmente la contaminación acústica en un aeropuerto con el consiguiente beneficio para los moradores del entorno, aumentan las emisiones ya que fuerzan al motor a quemar más combustible.

Las recomendaciones comienzan en los aeropuertos, ya que sólo la mitad de las emisiones atribuibles a la actividad aérea provienen de las aeronaves, mientras que la otra mitad proviene de la actividad relacionada con el aeropuerto.

Para la OACI un buen emplazamiento del aeropuerto puede suponer un ahorro ya que, coordinando de manera adecuada la utilización de los terrenos circundantes, no harán falta procedimientos anti ruidos que generen más emisiones. Si además el acceso al aeropuerto se hace con transportes públicos, se utilizan de forma habitual los equipos de tierra de aire y electricidad en vez de los de los aviones, se modernizan los vehículos terrestres del aeropuerto utilizando energías limpias y se diseña desde el principio el aeropuerto para reducir los rodajes, (especialmente si estos se realizan con un motor parado), se puede ahorrar una gran cantidad de combustible.

Además, como ya vimos, un adecuado mantenimiento, apoyado por las recomendaciones de los fabricantes, puede mejorar el rendimiento tanto de los motores como de los aviones en sí. Si a esto le añadimos un esfuerzo por reducir la masa del avión se podría reducir también el consumo hasta en un 1%.

Para conseguir reducir la masa del avión se puede examinar si es realmente necesario todo el equipo de seguridad a bordo, o todos los artículos de servicio a bordo, o reevaluar los requerimientos legales en cuanto a las reservas de combustible que hay que llevar.

También se pueden conseguir mejoras si se reducen los vuelos no remunerados, o sea, los requeridos por certificación, pruebas o instrucción, ya que esta última se puede sustituir por vuelos en simuladores que cada vez reproducen con mayor fidelidad la realidad.

Y por supuesto, lo que la OACI determina como el punto fundamental para ahorrar combustible que es la optimización del vuelo. Si el vuelo se realiza con la aeronave más adecuada para cada tipo de perfil, por la ruta, la altitud y con la velocidad más eficiente desde el punto de vista del consumo, es evidente que se conseguirá un gran ahorro de combustible.

La OACI hace un gran hincapié en el aspecto de las rutas y las altitudes mejoradas ya que se estima que con las nuevas herramientas tecnológicas y las mejoras que se han introducido y que en el futuro se van a incorporar en los aviones y sobre todo en los sistemas de comunicaciones, navegación y vigilancia, (conocidos como sistemas CNS/ATM), se espera un ahorro por si solo de entre un 6% y un 12%, que combinado con otras mejoras operacionales que ya hemos comentado, podrían producir un ahorro total de entre un 8% y un 18%.

Hay que hacer notar que en el año 2000 el consumo de combustible en la aviación civil fue de 243 millones de toneladas, y que se espera que este gasto se eleve a 325 millones para el año 2015, por lo que conseguir un ahorro de un 1%, 3.25 millones, supone el evitar la emisión de 10.25 millones de toneladas de dióxido de carbono.

La circular 303 de la OACI, refleja las iniciativas que se han tomado a nivel mundial para, apoyándose en las nuevas tecnologías, mejorar las capacidades de las actuales rutas y altitudes utilizados hoy en día en la aviación comercial.

Con el empleo de nuevos sistemas de navegación como la red de satélites de posicionamiento global GPS, o los sistemas que emplean las últimas generaciones de aviones para transmitir a los demás su posición se ha conseguido doblar los niveles de vuelo que emplean los aviones en sus rutas, permitiendo más capacidad para que los aviones puedan tomar atajos y volar por la ruta más eficiente desde el punto de vista del consumo de combustible.

Igualmente, al no depender más que en una mínima parte de las radio ayudas a la navegación que están basadas en el terreno, se pueden construir rutas que sean más directas o más cercanas a las óptimas para el combustible, (por ejemplo las que tengan una mejor componente de viento en cola). En Europa se estima que el actual sistema de rutas añade un promedio de un 9% a la distancia recorrida.

La circular refleja las iniciativas que han tomado estados como los países que conforman la Conferencia europea de aviación civil (CEAC) o los Estados Unidos para flexibilizar el uso del espacio aéreo.

Una de las consideraciones de la OACI con respecto al ahorro del combustible consistía en el uso que dan los estados sobre su espacio aéreo. En muchas ocasiones los estados se reservaban unas zonas con fines estratégicos o militares. Estas zonas,

frecuentemente infrutilizadas, impedían planificar los vuelos más directos, por lo que en estas zonas del mundo se están haciendo gestiones para poder permitir el paso de aeronaves civiles todo o parte del tiempo, lo que permitirá aproximarse más a la ruta ideal. En el caso concreto europeo, se pretende que los estados “cedan” parte de su soberanía para que los aviones vuelen más directamente, creando un “cielo único” para toda Europa en vez de tener el cielo fragmentado en los diferentes centros locales y nacionales.

Este concepto de “vuelo libre”, donde las aeronaves podrían tener más oportunidades de escoger su ruta ideal, unida a la mejora de las comunicaciones y de los sistemas para evitar colisiones que llevan los aviones permitirían que los aviones alcanzasen más fácilmente su perfil ideal desde el punto de vista del combustible.

8.5.3 En resumen

Como hemos visto la OACI hace toda una serie de recomendaciones dirigidas a todos los integrantes del sistema de transporte aéreo, desde aeropuertos a operadores pasando por fabricantes o agencias reguladoras, en las que se ponen de manifiesto la necesidad de mejorar el ahorro del consumo de combustible y por tanto de la emisión de contaminantes.

Hay aspectos donde las mejoras son difíciles de conseguir por impedimentos técnicos o legales, pero en general, y particularmente en lo que se refiere a la gestión del tránsito aéreo, la OACI encuentra en esta circular muchos aspectos donde aún se puede disminuir el gasto de combustible y en los que hace mayor énfasis.

8.6. Aviación y cambio climático

El 25 de Febrero de 2008, en Montreal, el Presidente del Consejo de la OACI daba la bienvenida a los expertos internacionales que, por primera vez, se reunían en una iniciativa denominada Grupo Internacional sobre la Aviación y el Cambio Climático (GIAAC). Esta reunión obedecía a un mandato de los estados contratantes de la Organización.

La OACI se había ocupado en los últimos 40 años de los diversos problemas medio ambientales relacionados con la aviación. Así, son meritorios los esfuerzos realizados desde 1968 para el control del ruido producido por las aeronaves, ampliado desde 1971 para incluir la repercusión en el medio ambiente de las emisiones de la aviación internacional. En ese año de 1971 se adoptaron las Normas y Métodos Recomendados aplicables al Ruido de las Aeronaves, designadas como Anexo 16 al Convenio de la OACI. En 1983 el Consejo creó el CAEP, Comité sobre la Protección del Medio Ambiente y la Aviación, como un comité técnico del Consejo. En la 36 Asamblea General de la OACI se resolvió la creación de un grupo técnico internacional, el citado GIAAC, con un mandato amplio para que pudiera considerar todas las opciones disponibles al abordar el tema de la contribución de la aviación al cambio climático.

Este grupo es una consecuencia del trabajo realizado por una Unidad Medio Ambiental creada por el Consejo de la OACI en 2004 para coordinar los esfuerzos del CAEP con los diferentes grupos de las Naciones Unidas y otras organizaciones internacionales preocupadas por las cuestiones medio ambientales y el cambio climático.

Entre las opciones que se citaban estaban las mejoras en la tecnología de las aeronaves y los equipos basados en tierra, medidas operacionales más eficientes y

una mayor aplicación de las mismas; mejoras en la gestión del tránsito aéreo para aumentar la eficiencia, acortar las rutas y reducir la congestión; la aplicación de medidas basadas en criterios de mercado, incluyendo incentivos económicos positivos; la incorporación de aeronaves modernas y eficientes en las flotas en servicio; y otras opciones que pueda considerar el grupo.

Se esperaba que de la reunión el Grupo elaborase y recomendase al Consejo un ambicioso Programa de acción basado en el consenso y que reflejase la visión y determinación comunes de todos los Estados contratantes de hacer frente al cambio climático, lo que suponía:

- Elaborar un marco de implantación
- Identificar los medios para medir el progreso alcanzado
- Identificar posibles objetivos a los que se podría aspirar
- Informar de los progresos resultantes de las medidas aplicadas por los Estados contratantes y otras partes interesadas

Se realizaron aportaciones por todos los actores de la industria. Analizaremos aquí tan solo algunas de las aportaciones a ese Grupo, las que tienen una especial relevancia en el trabajo desarrollado de la gestión de la energía en el transporte aéreo, así como los últimos avances en materia de reducción de emisiones y consumos.

8.6.1 Aeropuertos. ACI (Airports Council International)

EL ACI tiene 580 miembros que operan 1647 aeropuertos en 175 países. En 2006 movieron 4.400 millones de pasajeros, 86 millones de toneladas de carga y 72 millones de movimientos de aeronaves; su misión es la de representar los intereses colectivos de los aeropuertos en el mundo y promover la excelencia en la gestión y las operaciones aeroportuarias.

Las mayores preocupaciones de los aeropuertos en el tema del medio ambiente se dirigen a:

- Ruido en el entorno
- Calidad del Aire
- La calidad de las aguas superficiales y de los suelos
- El reciclado y la sostenibilidad
- El cuidado del hábitat y la gestión de la vida salvaje en el entorno

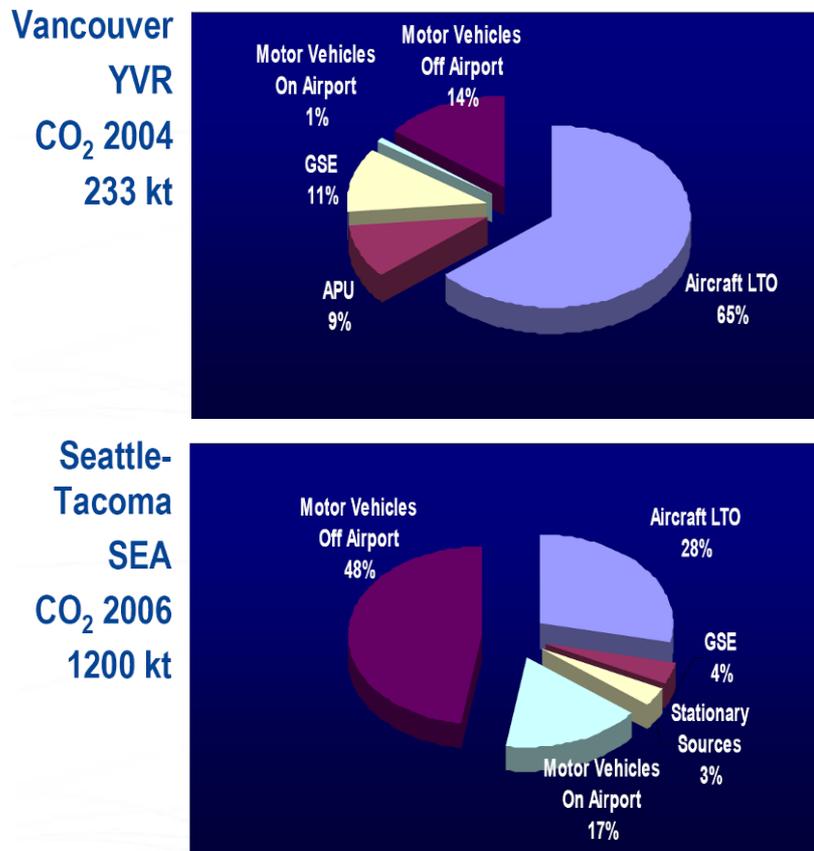
Si bien el IPCC atribuye a la aviación un 2% del total de las emisiones de CO₂ (unas 650 M toneladas por año) los aeropuertos, según ACI, contribuyen con un 5% de esa cifra (unas 30 M toneladas de CO₂ por año). No existe una metodología común para realizar una estandarización de la medición de las emisiones y es preceptivo, por parte de los aeropuertos, el realizar políticas que requieren participación de las entidades locales y la industria del entorno.

Presentamos dos ejemplos de aportación de aeropuertos a las emisiones globales y su fragmentación según los contribuyentes.

Vemos como los diferentes estándares de medida llevan a resultados distintos. La operación de aeronaves en ambas gráficas (Aircraft LTO o aterrizajes y despegues de

aeronaves) no son siempre el principal contribuyente al total de emisiones. Hay un enorme campo en la posibilidad de reducción de las emisiones en los movimientos en superficie tanto de aeronaves como de elementos accesorios a la operación.

Figura 80.



En las conclusiones de esta asociación dentro del grupo GIAAC se detallan los esfuerzos realizados por sus miembros en la introducción de fuentes de energías renovables, y más limpias para las emisiones, como las eólicas (aeropuerto de La Palma), foto voltaica (multitud de aeropuertos), reducción del uso del APU, uso de equipos de tierra tanto para aire acondicionado como electricidad en tierra de las aeronaves, etc.

8.6.2 ATC. Los ANSP. Boeing. OACI.

Las mejoras en la gestión del Control del Tráfico Aéreo son, en palabras de los expertos, las que mayores reducciones en al consumo de combustibles y en la reducción de las emisiones se pueden producir de toda la industria del transporte aéreo.

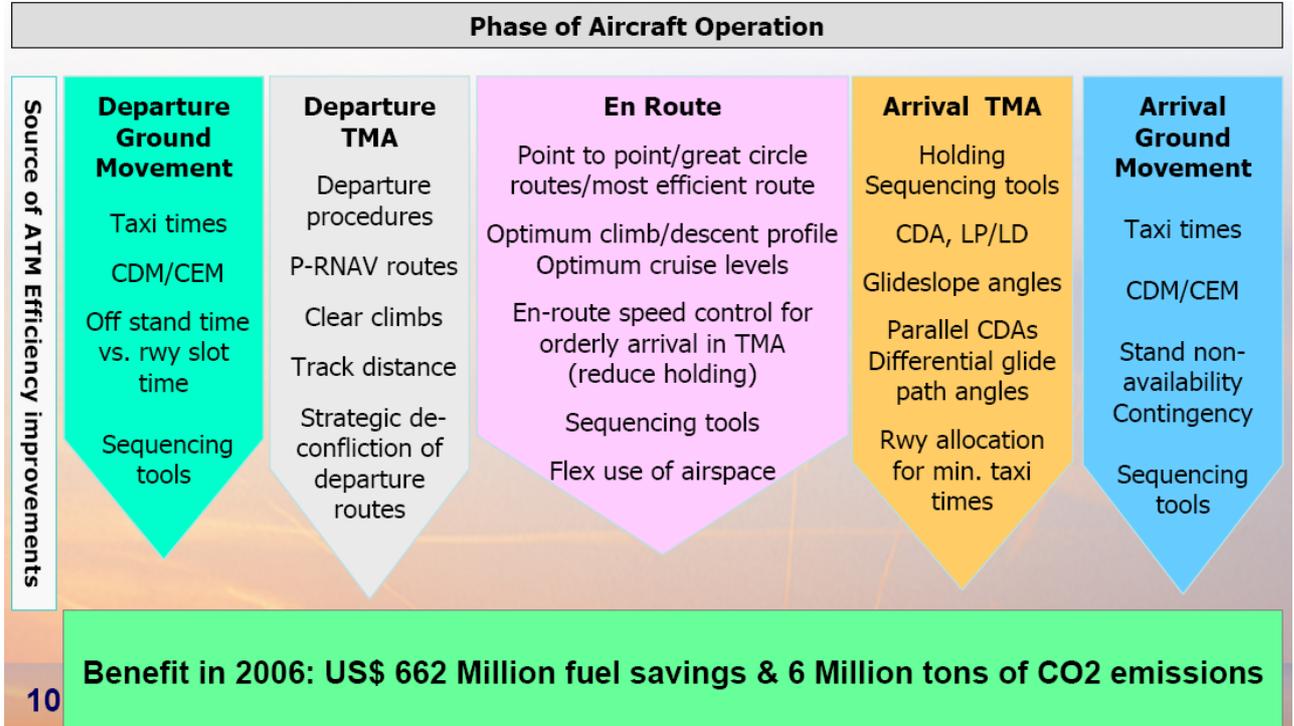
Muchos sin los esfuerzos que se están realizando en este sentido tanto dentro de los paneles de cambio climático como en el esfuerzo continuado de los fabricantes de aeronaves y sus industrias asociadas como es el caso de Boeing.

La presentación del papel que juegan los proveedores de los Servicios de Navegación Aérea (ANSP) dentro del Grupo de GIAAC la realizó la asociación CANSO (Civil Air Navigation Services Organisation) que tiene 48 ANSP y 38 miembros asociados en el

mundo, sirve al 70% del espacio aéreo mundial y controla el 85 % del total del tráfico aéreo en el mundo.

Las mejoras en este campo, las mayores que pueden conseguirse en cuanto a

Figura 81.

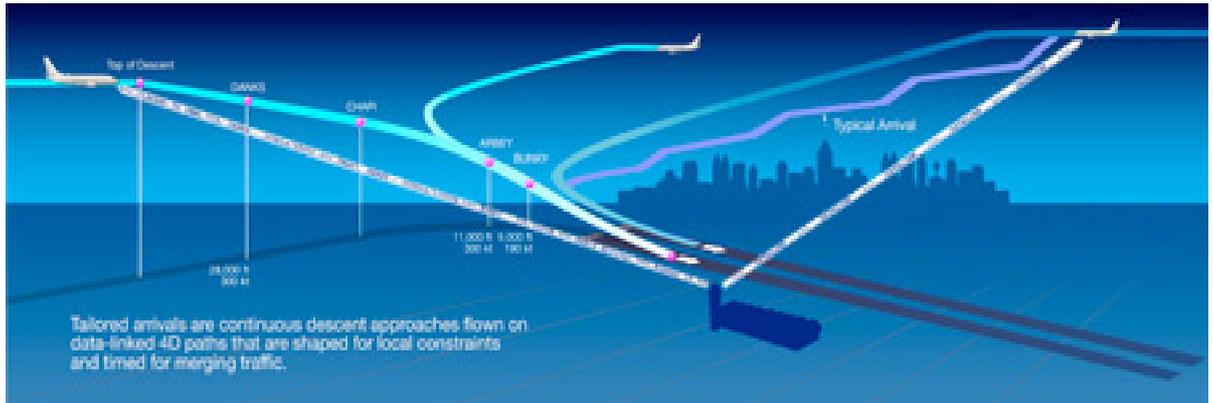


reducción de emisiones y de consumos de combustible a decir de todos los expertos, las encontramos en la gráfica adjunta por fases del vuelo.

Son notables también los esfuerzos que realizan actores tan importantes como Boeing y sus asociados que en conjunción con las autoridades aeronáuticas del entorno de la FAA han presentado en fechas recientes (11 de julio de 2008) sus progresos en la reducción de consumos de combustible y de emisiones de CO2 en la presentación del desarrollo de un concepto novedoso de gestión del tráfico Aéreo denominado “Tailored Arrival” o Aproximaciones Instrumentales “a medida”.

En la ilustración de Boeing se aprecia como las denominadas “aproximaciones a medida” realizadas por tres líneas aéreas (United Airlines, Air New Zealand y Japan Airlines), en una demostración realizada desde el 4 de diciembre de 2007 al 3 de marzo de 2008 en San Francisco, en la que se han realizado 57 vuelos, se ha comprobado una reducción del consumo de un 39% dependiendo del tipo de aeronave y se han reducido las emisiones en 500.000 libras.

Figura 82.



Se basan en la aplicación de técnicas de bajo coste y rápidas de desarrollar aprovechando las posibilidades que presentan las nuevas generaciones de aeronaves. En esencia son aproximaciones de descenso continuo voladas según sendas transmitidas vía data link en 4D desarrolladas de acuerdo con el tráfico actual, las restricciones locales y utilizando tecnología ya desarrollada y en uso.

La OACI dentro de sus iniciativas globales para las mejoras en el Control del Tráfico Aéreo ha seleccionado:

- El uso flexible del espacio aéreo
- En adecuado manejo del flujo del tráfico aéreo
- La gestión dinámica y flexible del uso del sistema de rutas
- El diseño y gestión en colaboración del espacio aéreo
- La gestión y el diseño de los procedimientos en área terminal
- La gestión y diseño de los procedimientos en el aeródromo

La navegación basada en las características de las aeronaves

Figura 83.

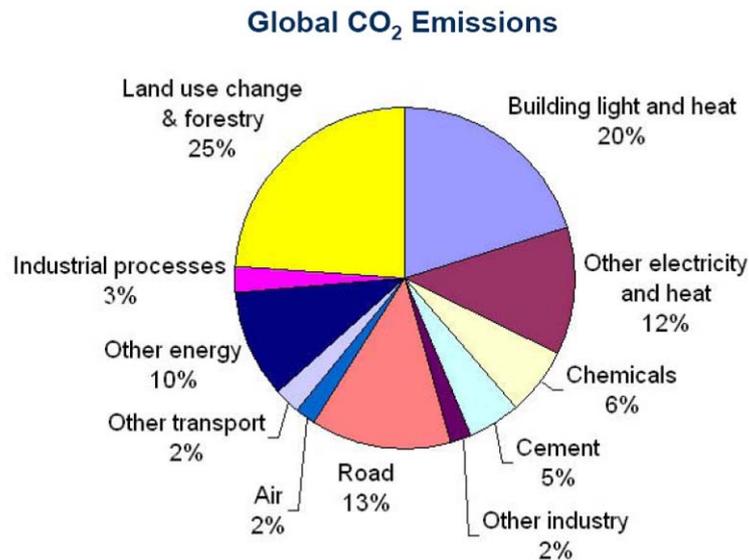
Projected for 2008			
RVSM	FUEL (kg)	CO ₂ (kg)	USD\$
China	344,871,968	1,099,106,962	\$248,307,817
Algeria	3,864,432	12,296,623	\$3,014,257

Algunas de las iniciativas ya desarrolladas, como el uso cada vez más generalizado de la separación mínima reducida RVSM han producido unos importantes beneficios. Otras en desarrollo en la actualidad se espera que produzca beneficios importantes tales como la aplicación de estos mismos principios en otros espacios aéreos.

En la figura adjunta podemos observar los beneficios para el medio ambiente esperados de la aplicación este año de la separación RVSM en dos espacios que hasta ahora aún no la aplicaban como China y Argelia.

8.6.3 Las compañías aéreas. La IATA

Figura 84.



En los últimos 40 años la industria aeronáutica ha conseguido éxitos importantes como el de reducir un 75% el ruido en el entorno de los aeropuertos y el de incrementar la eficiencia en el consumo de combustible en un 75%. Se pretende alcanzar mejoras del 25% para 2020 y del 30% para 2025.

Si consideramos las emisiones globales según los datos del IPCC/WRI (World Resources Institute) obtenemos una gráfica como la adjunta. Si bien, en la actualidad, la huella de carbono (footprint) atribuible al transporte aéreo es pequeña (apenas un 2%) está aumentando con el incremento de la actividad y el IPCC estima que, en 2050, alcanzará un valor del 3%.

En la Asamblea General de la OACI de 2007 un total de 179 estados apoyaron y remitieron un mandato a la organización para que ejerciese un papel activo de liderazgo y desarrollase un agresivo plan de acción para buscar soluciones a la contribución del transporte aéreo al problema global.

La acción tomará como base la estrategia de la IATA que se fundamenta en cuatro pilares:

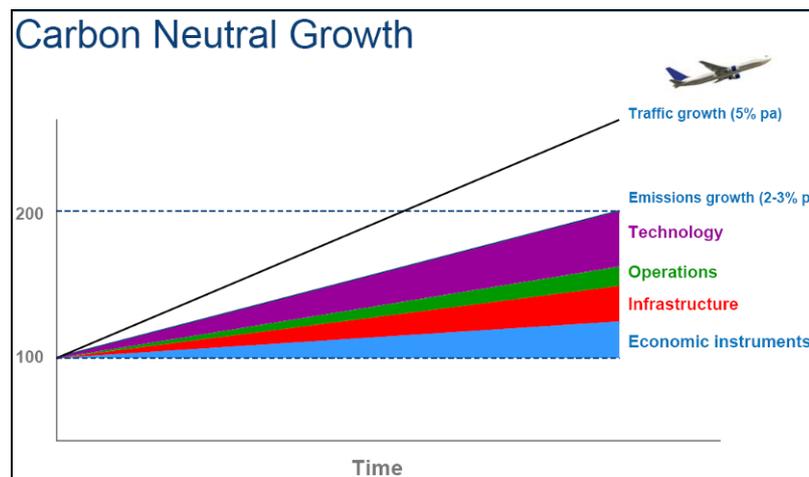
1. Tecnología
 - Mejoras en las aeronaves (células) y en los motores
 - Uso de combustibles más limpios (bio-fuel y otros) y búsqueda de nuevas fuentes de energía
2. Infraestructuras
 - Mejora en la estructura de las rutas aéreas, mejoras en el control del tráfico aéreo y en los procedimientos aeroportuarios
3. Operaciones de las aeronaves
 - Favorecer iniciativas encaminadas hacia una máxima eficiencia y un mínimo peso

4. Instrumentos económicos

- Incentivas para la financiación del uso de las nuevas tecnologías y la Investigación y el Desarrollo
- Mercado de emisiones y de reducción de la huella de carbono

Considerando un incremento del tráfico aéreo de un 5,2% por año, las emisiones de mantendrán en un valor inferior al 3% anual con los condicionantes de que la seguridad deberá ser el primero de los requerimientos, que la implementación lleva un tiempo largo, que estamos hablando de una tecnología de combustible única y que es dependiente de los gobiernos. Se pretende un crecimiento neutro en la huella de carbono.

Figura 85.



8.6.4 La Aviación de Negocios

Los representantes más cualificados de la aviación de negocios en el mundo la IBAC (International Business Aviation Council) han presentado ante el GIACC los hechos más significativos de este tipo de aviación en el mundo, su contribución a las emisiones y sus políticas para el futuro.

En esta asociación distinguen entre cuatro tipos de operación:

1. Corporate: Operación no comercial pero con tripulación profesional
2. Operados por el Propietario: tráfico no comercial volado personalmente por el propietario.
3. Propiedad Compartida: Vuelos no comerciales y propiedad compartida. Tripulación profesional.
4. Taxi Aéreo: Operación comercial o a la demanda

Los tipos de aeronave que se utilizan varían desde las que tienen una cabina grande como la de los aviones comerciales de los que son un modelo especial, en un continuo de aeronaves pasando por los VLJ Very Light Jets hasta los más pequeños turbo hélices.

La media de uso de las aeronaves es de unas 400-500 horas de vuelo por año comparadas con las más de 3.000 de una aeronave comercial; un 70% de los vuelos se emplean para por personal de nivel medio-alto de responsabilidad en las empresas

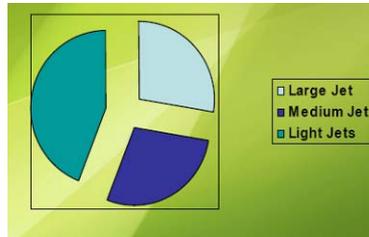
y un 30% por personal directivo al más alto nivel y se suele operar en aeropuertos secundarios en los que las operaciones en tierra se minimizan al máximo.

El perfil medio de operación aparece en la gráfica siguiente. Los niveles de vuelo utilizados varían entre los de FL 200 hasta FL 510 (muy por encima de los tráficos comerciales que no suelen subir de FL 410) con un régimen de ascenso elevado y un mínimo de operación en tierra.

Figura 86.



Figura 87.

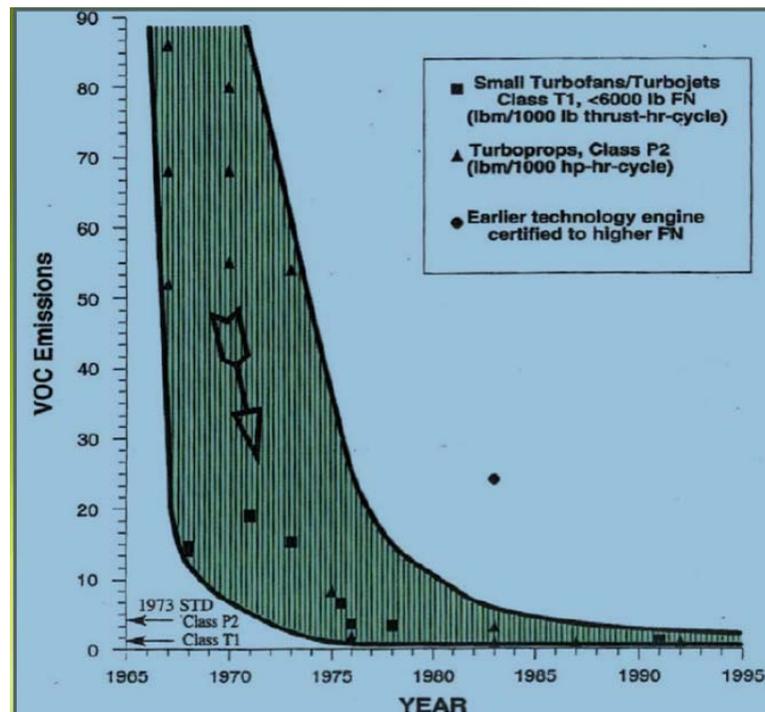


Los datos demográficos de esta actividad: Aeronaves con turbinas 27.470 de los que 16.631 son turbo reactores y 10.839 turbohélices distribuidos entre unos 15.000 operadores lo que arroja una media de entre 1,4 a 1,8 aeronaves por operador.

Entre los reactores la proporción en tamaños es como se refleja en la gráfica adjunta siendo predominante en el sector la utilización de los jet de tamaño medio (de 4 a 19 pasajeros).

Su distribución en el mundo es un 72% de la actividad se desarrolla en Norte América, un 11% en Europa, un 10% en Centro y Sudamérica y un 7% en el resto del mundo.

Figura 88.



Se produce una alta rotación de las aeronaves con una edad media muy baja.

Las mejoras en emisiones son notables en este campo como podemos apreciar en la gráfica adjunta de la reducción de las emisiones en el periodo 1965-1995.

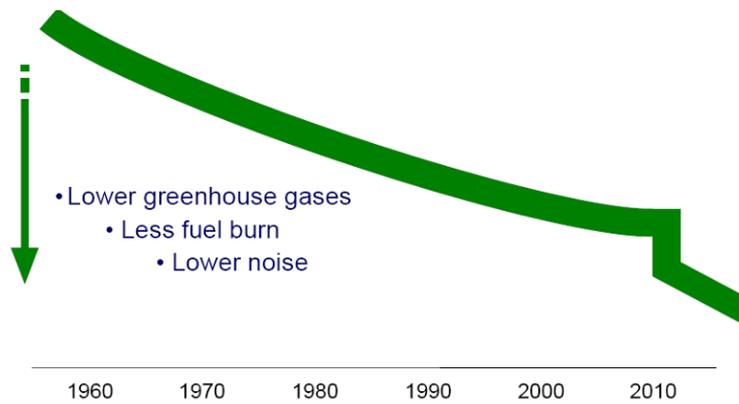
Una aeronave de tamaño ejecutiva produce como media 3,5 TM de CO₂ por vuelo y unas 1.250 toneladas de CO₂ por año. La proporción de aporte de la aviación comercial ejecutiva al total de emisiones de la aviación varía entre un 1 y un 1,5% del total mientras que la media de emisiones de este tipo de aeronaves por hora e vuelo varía entre 1 y 4 Toneladas de CO₂.

Se están estudiando medidas para reducir aún más la duración de los vuelos apoyando medidas ya apuntadas en capítulos anteriores de mejora de los procesos en los vuelos y en la preparación de los mismos, medidas operacionales, mejoras en las aeronaves y un apoyo decidido a la reducción de tiempos por ATC.

8.6.5 Los constructores de aeronaves

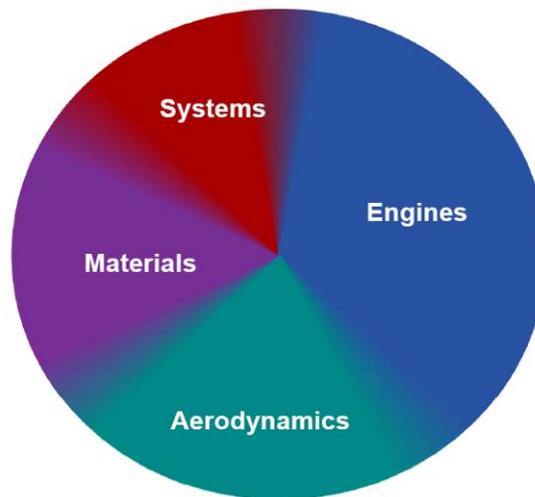
Las nuevas tecnologías, aplicadas a la construcción de aeronaves, como hemos dicho en párrafos anteriores son la clave para las mejoras en el medio ambiente. Se ha producido al menos una mejora en el 15% en el CO₂ emitido por las nuevas generaciones de aeronaves mientras se continúa reduciendo las emisiones de NO_x y el ruido que producen.

Figura 89.



Estos esfuerzos deben ir acompañados por un compromiso de las líneas aéreas por cumplir sus objetivos medio ambientales, por la industria y los gobiernos para transformar de manera eficiente el sistema de transporte y para desarrollar y aprobar combustibles alternativos para la aviación.

Figura 90.



La contribución que las distintas tecnologías pueden producir en la eficiencia de las aeronaves se espera que sea, proporcionalmente, como aparece en la figura.

Se conoce que cada nueva generación de aeronaves es capaz de conseguir un 15% de reducción en la emisión de CO₂ y una importante reducción en los NO_x, pero el desarrollo tecnológico tiene sus riesgos derivados de la elevada inversión en tecnología necesaria, la pobre implicación de los sectores públicos en investigación y desarrollo y el hecho de que la transformación y mejora del Control y Gestión del Tráfico Aéreo sea considerada una prioridad esencial

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

García Álvarez, A. (2006): *Consumos de energía y eficiencia energética en el transporte. El caso del ferrocarril*, Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Madrid

García Álvarez, A. (2005): *Dinámica de los trenes en alta velocidad*, Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Madrid

AENA

Informes anuales años 2005, 2006 y 2007

Publicaciones de Información Aeronáutica AIP España.

AIRBUS

“Getting to grips with the Cost Index” Issue II. May 1998. Flight Operations Support and Line Assistance.

OLM FBW 2006 Toulouse. September 2006 Air Savings. A perspective to get started with dignified Cost Index values. PDF presentation.

“Getting to grips with Fuel Economy” Issue III. July 2004. Flight Operations Support and Line Assistance.

The First and The last A300/A310 family. Brochure

Flight Operations Monitoring. Brochure.

“Getting hands-on Experience with Aerodynamic deterioration” Issue II. October 2001. Flight Operations Support and Line Assistance.

“Getting to grips with Aircraft Performance”. January 2002. Flight Operations Support and Line Assistance.

“Getting to grips with Aircraft Performance Monitoring”. Flight Operations Support and Line Assistance.

In Flight Entertainment. Brochure

Operational Liaison Meeting. Fly By Wire Aircraft. Take off Thrust Setting. Customer Services.

Artículos

Low Cost Airlines. The Sky is the Limit. 9th March 2007. Bryan, Garnier & CO

BOEING

Commercial Aviation and the Environment. Article

Flight Operations Engineering. Propulsion. Jet engine Basics. PDF Presentation

Flight Operations Engineering. Propulsion. Fuel Conservation. PDF Presentation

Derated Climb Performance in Large Civil Aircraft. Rolls Royce Presentation

Flight Operations Engineering. Jet Fuel Characteristics. PDF Presentation. May 2002

Performance margins. Paul Schmidt. Boeing Aerodynamics Engineering

Flight Operations Engineering. Propulsion. Improved Climb. PDF Presentation. November 2001

Understanding Winglets Technology. Article.

Dirección General de Aviación Civil española

Lista de compañías tipo A.

Lista de compañías tipo B

Listado de aeronave matriculadas en el Estado Español

ECAC/CEAC

Recommendation ECAC/27-4. NO_x Emissions Classification Scheme

Federal Aviation Administration (FAA) y relacionados

The Aging Transport Systems Rulemaking Advisory Committee (ASTRAC). Update Aging Transport Systems Investigations. Brochure

Aircraft Classifications. Dr. Antonio A. Trani. Department of Civil Engineering Virginia Tech

Program Plan. Aircraft Advanced Materials Research and Development. DOT/FAA/CT-94/106. Nov 1994

Advanced Materials in transport Aircraft Structures. PDF Presentation.

Flight Safety Foundation

Understanding Airplane Turbofan Engine Operation. Flight Safety Digest. March 2001

Lessons from the Dawn of Ultra-long-range Flight. Flight Safety Digest. September 2005

A review of transport Airplane Performance Requirements... Feb. 2000. Flight Safety Digest.

IATA

IATA Economics Briefings.

Air Market Outlook. Sept 2007

Airline Fuel and Labour Cost Share. June 2007

New Aircraft Orders. Feb 2006

World Air Transport Statistics 51st Edition. June 2007

Economic Regulation. Article

Annual report 2005 y 2006

Fuel Conservation Programme. PDF Presentation. May 2007

Fuel Efficiency Campaign Sept. 2006

Guidance Material and Best Practices for Fuel and Environmental Management First Edition. Dec 2004.

Libros

Motores de Reacción (9^a Edición. Año 2001). Autor : Martín Cuesta Álvarez Editorial Thomson Paraninfo, S.A. Madrid. ISBN: 9788428328258

El Motor de Reacción y sus sistemas auxiliares (9^o Edición 2007). Autor: Valentín Sainz Díez. Edit Paraninfo ISBN: 978-84-283-2939-2

Turboreactores Teoría, sistemas y propulsión de aviones. Antonio Esteban Oñate. Edición de 1981. ISBN 84-7309-007-1

Manuales de aeronaves

Boeing 777 Engines and APU

Flight Crew Operating Manual (FCOM) Airbus A-340. Power Plant

ATR FCOM Power Plant

MO (B) Iberia A-340

NASA

Informes sobre aeronaves

Minimizing Life Cycle Cost for Subsonic Commercial Aircraft. Article. Feb 1990. Vicki S. Johnson. NASA Langley Research Center

OACI

oportunidades operacionales para minimizar el consumo de combustible y reducir las emisiones. Circular 303 AN/176. Feb. 2004

Documentos del primer Meeting del Grupo de trabajo sobre Aviación Internacional y el Cambio Climático (GIACC). Feb 2008.

The Balance Approach to Aircraft Noise Management. PDF presentation

Template and Guidance on Voluntary Measures. Emission Reductions.

Airport Air Quality Guidance Material. DOC 9889. Preliminary Edition April 2007

Guidelines on the use of procedures in the emissions certification of aircraft engines

ICAO Environmental Report 2007. Brochure

Long Term Technology Goals for CAEP/7

Manual Técnico-Ambiental sobre aplicación de los procedimientos de homologación acústica de las aeronaves. DOC 9501 AN/92. Tercera edición 2004

Report on voluntary emissions trading for aviation (VETS report). Preliminary Edition 2007

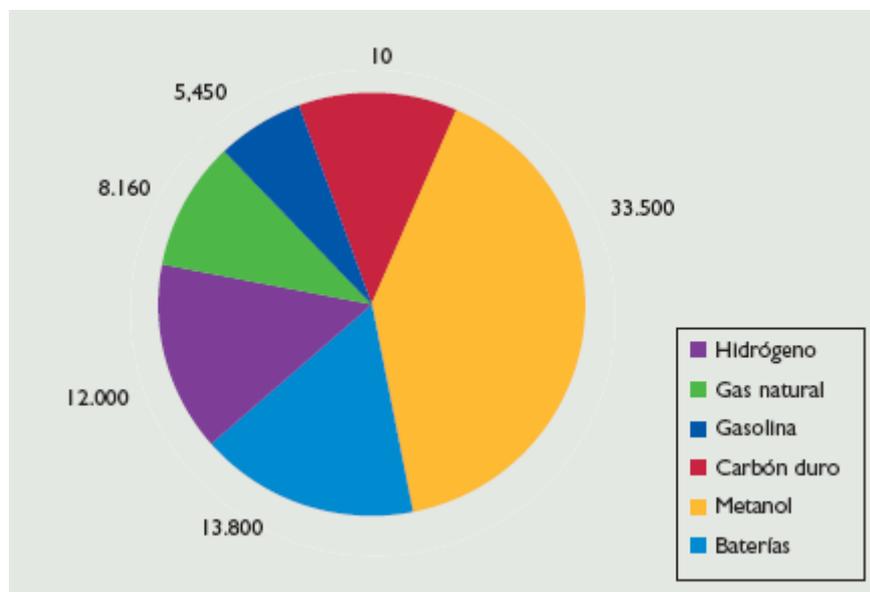
ANEXOS

Tabla 6. Unidades de energía y equivalencias

	Ergio (Erg)	Julio (J)	Kilocaloria (kcal)	Caballo de Vapor-hora (CV-h)	Kilovatio-hora (kWh)
Ergio	1	10^{-7}	$2,389 \cdot 10^{-11}$	$0,377 \cdot 10^{-13}$	$2,778 \cdot 10^{-14}$
Julio	107	1	$2,389 \cdot 10^{-4}$	$0,377 \cdot 10^{-6}$	$2,778 \cdot 10^{-7}$
kcal	$4,186 \cdot 10^{10}$	$4,186 \cdot 10^3$	1	$1,581 \cdot 10^{-3}$	$1,163 \cdot 10^{-3}$
CV-h	$2,650 \cdot 10^{13}$	$2,650 \cdot 10^6$	$6,326 \cdot 10^2$	1	0,736
kWh	$3,600 \cdot 10^{13}$	$3,600 \cdot 10^6$	860	1,359	1

Fuente: Elaboración propia

Figura 18. Densidad energética por unidad de peso



Fuente: Linares Hurtado, J.I.; Moratilla Soria, B.Y. (2007):