

La eficiencia energética de las aeronaves

RODRIGO MARTÍNEZ-VAL, EMILIO PÉREZ

ETSI Aeronáuticos

JOSÉ F. PALACÍN

EUIT Aeronáutica



INTRODUCCIÓN

La seguridad ha sido la preocupación principal de las autoridades, fabricantes, compañías aéreas y opinión pública [1-3] a lo largo del espectacular desarrollo de la aviación civil desde sus comienzos hace un siglo. Y esto es particularmente aplicable al caso de la aviación comercial, que ya tiene más de ochenta años y ha cambiado profundamente el modo de vivir de los países occidentales, y lo está haciendo también, aunque más gradualmente, con los demás. Esta preocupación ha actuado como motor incesante de investigación e innovación, y ha proporcionado numerosos avances tecnológicos. En aviación de combate la seguridad ha estado precedida de la efectividad de la misión [4], que ha jugado así mismo un papel destacado como motor de desarrollo aeronáutico.

Pero inmediatamente detrás de la seguridad aparece la eficiencia de las aeronaves como gran prota-

gonista del mencionado desarrollo [5]. Esto es debido a su valor polifacético, como se comentará seguidamente.

No obstante, antes de entrar de lleno en la cuestión, conviene aclarar que el presente artículo se va a limitar voluntariamente a la aviación de transporte, aunque la mayoría de los conceptos y conclusiones son aplicables a otros tipos y categorías de aeronaves.

Tabla 1
ECUACIONES DE BREGUET PARA AVIONES CON HÉLICE (ARRIBA) Y REACTOR (ABAJO)

$$R = \int_{W_f}^{W_i} \frac{\eta}{C_p} \frac{L}{D} \frac{dW}{W} \quad 1$$

$$R = \int_{W_f}^{W_i} \frac{\eta}{C_T} \frac{L}{D} \frac{dW}{W} \quad 2$$



Tabla 2
ECUACIÓN DE ALCANCE SIMPLIFICADA

$$R = K \ln \frac{W_i}{W_f} \quad 3$$

donde el parámetro K vale $K = \frac{V}{c_T} \frac{L}{D}$

en aviones de reacción y $K = \frac{\eta}{c_p} \frac{L}{D}$ en aviones de hélice.

hay aún mucha incertidumbre sobre si las variaciones climáticas actuales son debidas a la intervención humana. De hecho, numerosos estudios geológicos e históricos subrayan que la Tierra ha experimentado cambios mucho más acusados en épocas en que la civilización no estaba tan desarrollada como ahora. Ello no quiere decir que no se haya de prestar la debida atención a la limpieza del aire que respiramos y de nuestro entorno en general, así como al posible agotamiento de los combustibles fósiles.

Los anteriores párrafos sirven de marco para exponer, con concisión y claridad, el tema de la eficiencia energética de las aeronaves, estudiando el problema a través de los aviones de transporte. Se plantearán, en primer lugar, las ecuaciones que permiten cuantificar la eficiencia a partir de las magnitudes principales del avión en vuelo: peso, características aerodinámicas, etc. Se verá que hay magnitudes que tienen un impacto directo sobre la eficiencia, tales como la velocidad, el consumo específico, etc. Otros factores tienen una influencia indirecta, pero no por ello, menos importante en la vida operativa del avión. Es el caso de las limitaciones aeroportuarias o del espacio aéreo, por ejemplo.

Cuando se tiene todo ello en cuenta, se puede entender el esfuerzo que se está haciendo por fabricantes e investigadores para diseñar aviones "todo

Durante muchas décadas, hasta los años 80 aproximadamente, la eficiencia se interpretaba a través del consumo de combustible; íntimamente ligado a los aspectos económicos de la explotación comercial del avión [6, 7]. También la eficiencia estaba hermanada con la mejora de las actuaciones, al permitir volar más distancia con una cantidad de combustible dada o, alternativamente, necesitar menos combustible para cubrir el alcance especificado. Sin embargo, en los últimos tiempos, la eficiencia se está interpretando como una parte esencial de la reducción del impacto ambiental: la ligada a la contaminación del aire. La preocupación, en gran medida exagerada política y mediática, por el cambio climático ha hecho que asciendan hasta un nivel de protagonismo desbordado todas las actividades relacionadas con la producción de los gases que producen el denominado efecto invernadero [8-11]. Pero debe señalarse que

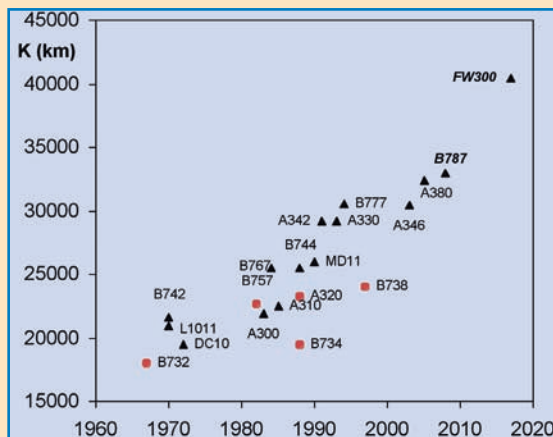


Figura 1. Evolución del parámetro de alcance en los aviones de reacción de fuselaje estrecho (puntos) y fuselaje ancho (triángulos). La fecha indica el año del primer vuelo. En cursiva los aviones que aún no han volado. El ala volante FW300 se pone para comparación.

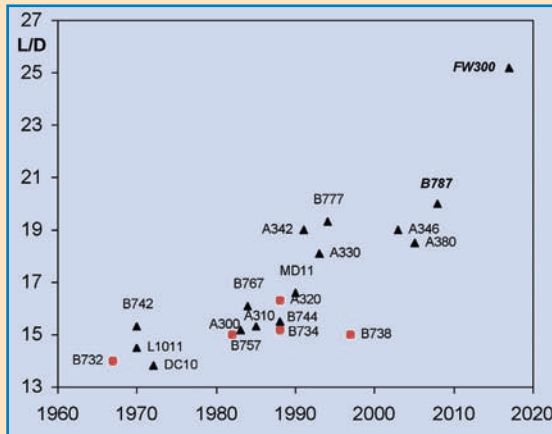


Figura 2. Evolución de la eficiencia aerodinámica. Símbolos igual que en Fig. 1.

eléctrico”, desarrollar nuevos procedimientos de gestión de vuelos o producir nuevos combustibles. La mayor parte de estos últimos aspectos serán abordados en otros trabajos de este mismo dossier y, por tanto, no serán tratados aquí con detalle. Sólo se comentarán en este artículo con alguna extensión las nuevas configuraciones de aviones que se están estudiando como respuesta a las necesidades y restricciones mencionadas anteriormente.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Aparte de los períodos en que un avión maniobra, acelera, etc, las fuerzas que actúan sobre él, aerodinámicas, propulsivas y gravitatorias, están en equilibrio. En el caso más común de vuelo horizontal rectilíneo y uniforme, que supone la mayor parte de la operación del avión, el citado equilibrio se traduce en igualdad de sustentación, L , y peso, W , por un lado; y de resistencia aerodinámica, D , y tracción o empuje de los motores, T , por otro [12].

A estos equilibrios de fuerzas se debe sumar una expresión que ligue el trabajo realizado instantáneamente por las fuerzas propulsivas, con la energía química procedente del combustible, a través del consumo específico (ver ecuaciones 1 a 4).

Combinando todo ello se obtienen las ecuaciones 1 y 2 de la tabla 1 [13-15], en las que η es el rendimiento conjunto de la hélice y la transmisión, V la velocidad, y c_p y c_T los consumos específicos cuando el avión está propulsado por motor con hélice o motor de reacción, respectivamente.

Los límites superior, W_i , e inferior, W_f , de ambas integrales son los pesos del avión al inicio y fin del crucero. La diferencia entre ambos es el peso de combustible consumido. Por supuesto, también se consume combustible en las demás fases del vuelo: despegue, subida, descenso y aterrizaje; pero en muchos casos son una fracción menor comparada con la del crucero, como indica acertadamente el profesor Roskam [16].

Un somero análisis de las ecuaciones 1 y 2 proporciona las claves para analizar la eficiencia energética de los aviones:

- Por un lado es preciso mejorar la aerodinámica, reflejada en el cociente sustentación/resistencia; cuanto mayor sea dicho cociente mayor alcance se tendrá, o para un alcance dado menor será el combustible consumido.

- Por otro lado, se debe disminuir el peso del avión, pues aparece en el denominador. Obviamente, esta disminución de peso puede ser en estructura, equipos, sistemas, mobiliario, y en el propio combustible, si se logra reducir el consumo.

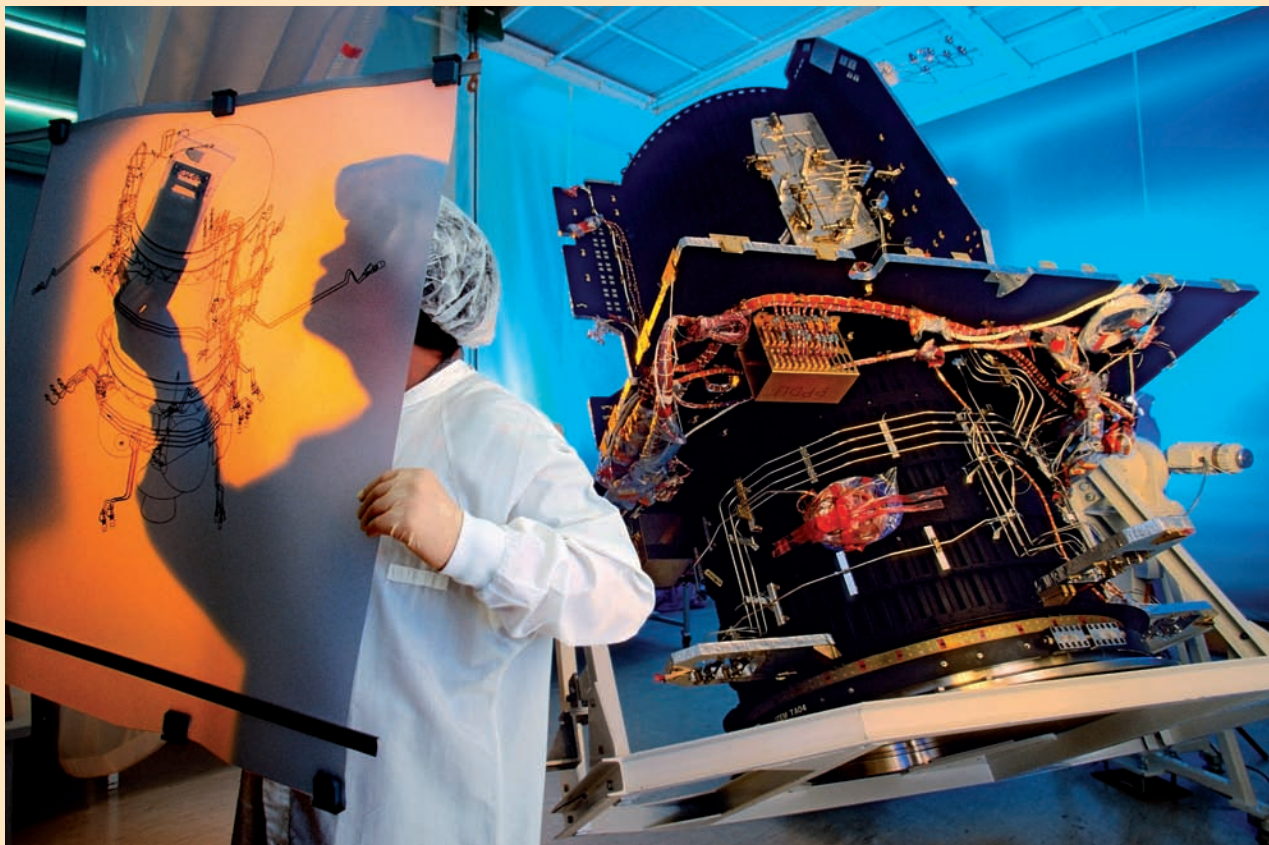
- Una tercera posibilidad es disminuir el consumo específico de los motores, pues son magnitudes que también aparecen en los denominadores, igual que el peso. Como se ha mencionado, el consumo específico depende del tipo de combustible y del diseño del motor. Este punto concreto, será tratado en otro artículo del presente informe.

Las otras dos magnitudes que aparecen en las ecuaciones, V y η , merecen comentarios aparte. La velocidad de los aviones de reacción ha permanecido casi constante desde que aparecieron a finales de los años 50. Ello es debido al grave deterioro que se produce en las características aerodinámicas al aproximarse a la velocidad del sonido; esto es, acercarse a Mach 1. Por eso la aviación comercial vuela toda entre Mach 0.75 y Mach 0.85; en general la velocidad crece con el alcance de diseño. En cuanto al rendimiento de las hélices y transmisiones, se ha llegado ya a valores tan cercanos a la unidad que los progresos se orientan más a conseguir disminución de ruido, o de tamaño para una potencia dada.

Las ecuaciones 1 y 2 se pueden integrar considerando que la parte del integrando que no depende



Figura 3. Los aviones Boeing B707 (arriba) y Airbus A340 (debajo) han sido diseñados con 40 años de diferencia, pero ambos responden a la misma configuración.



del peso es constante y se obtiene la expresión [17] recogida en la tabla 2.

El parámetro de alcance, K , está directamente relacionado con la distancia que se puede recorrer con una fracción de combustible dada, respecto al peso total del avión. La figura 1 muestra la evolución del valor de K en aviones Boeing y Airbus diseñados a lo largo de los últimos 40 años. Se observa que dicho parámetro se ha multiplicado casi por 2 desde el modelo B737-200 hasta el reciente B787. Debe recordarse que el parámetro de alcance es una magnitud global que aúna las mejoras producidas tanto en aerodinámica como en propulsión. Separando la parte aerodinámica se puede ver, en la figura 2, que la ganancia en L/D ha sido del orden del 40 por ciento en el mismo período de tiempo. Hay que entender que la mejora en consumo específico ha sido prácticamente igual a la de aerodinámica.

Queda un último apunte en este apartado, que merece tratarse separadamente por su novedad y por las implicaciones que tiene en la formulación matemática del problema. Es la utilización de pilas de combustible, por ejemplo de hidrógeno, para la propulsión. Cuando el hidrógeno se utiliza como combustible común para ser quemado en la cámara de combustión de un motor, todas las ecuaciones anteriores son correctas. Pero en el caso de utilizar pilas de hidrógeno para generar una corriente

eléctrica con la que mover unas hélices propulsoras (para motores de reacción aún no existe procedimiento equivalente) quizás haya que cambiar de signo al segundo miembro de la ecuación 1, pues la masa del avión puede aumentar con el tiempo. De hecho, el peso de hidrógeno que se lleva a bordo se multiplica por 9 al incorporar el oxígeno del aire y producir agua. Dependiendo de lo que se haga con el agua generada en la pila de hidrógeno la ecuación 1 deberá reescribirse de forma distinta. Algunos estudios sugieren dejar a bordo toda el agua producida y descargarla al llegar al aeropuerto de destino [18]. Otra posibilidad es descargar gradualmente el agua, vaporizándola en un dispositivo tipo venturi con salida al exterior, a medida que se produce. En ese caso la ecuación 1 seguiría siendo válida tal cual está. Como puede verse es un tema sin cerrar, pero ello no invalida el planteamiento general anterior, ni las conclusiones principales. A saber, que hay que mejorar la eficiencia aerodinámica, reducir el peso vacío del avión y bajar el consumo específico.

FACTORES DIRECTOS QUE MEJORAN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Tomando como base los planteamientos anteriores se puede vislumbrar cual será la evolución previsible en las próximas décadas.

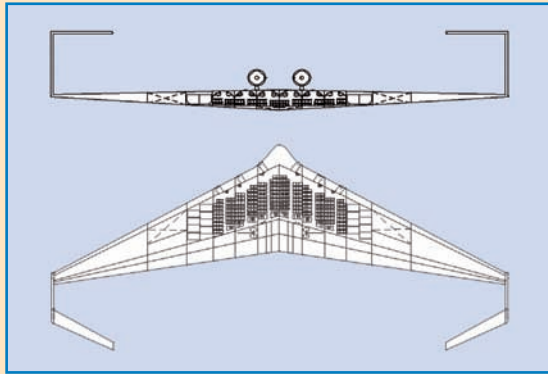


Figura 4. Avión en configuración de ala volante para 300 pasajeros, FW300.

Por un lado cabe esperar que se continúe con los avances aerodinámicos [17] que permitan aumentar el cociente L/D hasta 30. Para ello las soluciones propuestas pasan por nuevos conceptos de aviones, que se describirán más adelante, y la introducción de tecnologías específicamente orientadas a esta mejora, como el control de flujo laminar en alas, superficies de cola y góndolas de los motores. El control de la capa límite en el fuselaje se está estudiando también, pero parece más problemático de conseguir.

Del lado del consumo específico aún queda margen para mejorar el avión, sin cambiar la tecnología de las plantas propulsoras. Ello es debido a que los valores de C_T y C_F que aparecen en las ecuaciones son con los motores instalados y operando normalmente. En la instalación y operación las pérdidas son apreciables. Por ejemplo, de los motores se extrae energía mecánica para arrastrar generadores eléctricos, bombas hidráulicas, etc. Y también se sangra aire para el sistema de acondicionamiento de la cabina. Si todos estos sistemas se diseñasen de forma más eficiente o se buscara otra fuente de energía más apropiada se podrían producir ahorros del 10 al 15 por ciento adicionales. Esto es lo que se

Figure 5. Avión en configuración de biplano de Prandtl ("joined wings").



busca con el avión "todo eléctrico" por ejemplo.

Por supuesto, las propias plantas propulsoras tienen aún un buen margen de modificación: nuevos conceptos (propfan, unducted fan, VHBRTF), nuevos ciclos, nuevos materiales, etc, que podrían significar disminuciones del consumo específico del orden del 40 al 50 por ciento en el horizonte de 30 años que se considera en este trabajo. Los detalles concretos sobre plantas propulsoras se verán en otro artículo del dossier.

En cuanto a la disminución de peso citada anteriormente, los desarrollos se orientan a la búsqueda de nuevos materiales, tanto estructurales como de mobiliario, ornamentación, etc. El aluminio sigue siendo la base de gran parte de la estructura del avión, y con nuevas aleaciones aún se puede mejorar en resistencia mecánica, comportamiento en fatiga y otras propiedades esenciales. Los materiales compuestos van adquiriendo mayor protagonismo y ya se emplean incluso en la estructura primaria del ala de los nuevos aviones de reacción, como el A380 [19]. Por supuesto los avances son así mismo notables en resistencia al fuego o al desgaste en paneles de revestimiento interior, tapicerías, etc. El ahorro en peso vacío del avión puede acercarse al 30 por ciento en un plazo de tres décadas. Si el progreso no es más rápido es porque las autoridades de aeronavegabilidad son muy conservadoras en la introducción de los nuevos materiales; pero el que sean conservadoras debe entenderse en sentido positivo, pues su principal misión es velar por la seguridad de la aviación.

FACTORES INDIRECTOS QUE MEJORAN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Además de los factores mencionados en el apartado anterior hay otros que deben ser tenidos en cuenta también, pero no dependen del diseñador del avión sino de la organización y gestión del espacio aéreo y de los aeropuertos.

Muchos de los vuelos que se realizan en el mundo son de corto alcance, apenas unos cientos de kilómetros. En estos vuelos la proporción de combustible consumido en despegue o en un descenso con espera, respecto al total del vuelo no es pequeña y la rapidez con que se despachen las operaciones adquiere una gran relevancia. Igualmente, el hecho de que las rutas no puedan seguir a veces trayectorias más rectas es debido a prohibiciones de sobrevuelo de zonas militares o restringidas. Todo ello, que puede permitir considerables ahorros en el conjunto del sistema de transporte aéreo, será abordado en otro de los artículos del dossier.

CONCLUSIONES

La aviación comercial ha experimentado un auge enorme a lo largo de las nueve décadas. Sin

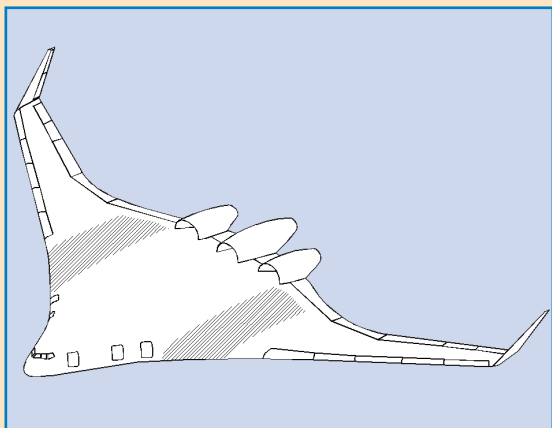


Figura 6. Avión en configuración de fuselaje sustentador o "blended-wing-body".

embargo, la configuración de los aviones ha permanecido prácticamente inmutable desde poco después del final de la II Guerra Mundial. De lejos puede ser difícil de distinguir un Boeing B707 (figura 3a) diseñado a mediados de los años 50, de un Airbus A340 de la última década (figura 3b). Sin embargo parece que las posibilidades de esta configuración en cuanto a actuaciones están llegando a una asíntota, en un tamaño poco mayor que el de un Airbus A380 [20]. Ello explica el florecimiento de grupos de trabajo que intentan desarrollar en mayor o menor medida nuevos conceptos de aviones; desde las alas volante (figura 4, ref. 21), hasta los aviones con dos fuselajes (figura 5, ref. 22) o los aviones con fuselaje sustentador o "blended-wing-body" (figura 6, ref. 23).

A los esfuerzos para disponer de nuevas configuraciones mucho más aerodinámicas, se suman los avances en los demás campos citados (propulsión, materiales, aviónica, equipos y sistemas de a bordo, etc), y las nuevas formas de gestión del vuelo en un espacio aéreo más abierto. La conjunción de todos los factores, directos e indirectos, citados en los párrafos anteriores podría llegar a duplicar y casi triplicar el alcance específico (alcance por unidad de masa de combustible quemada) de los aviones de transporte, respecto a los más avanzados de los actuales.

REFERENCIAS

1. Taylor, L. Air travel. How safe is it? BSP, Oxford, UK, 1988
2. Pinet, J. Media and safety in Air Transport. Air and Space Europe, Vol. 2, Nº 6, pp. 6-11, 2000
3. Wells, A.T. y Rodrigues, C.C. Commercial aviation safety. 4th Edition. McGraw-Hill, New York, USA, 2004
4. Mason, R.A. Air power: an overview of roles. Brassey, London, UK, 1987
5. Anderson, J.D. The Airplane. A History of its Technology. AIAA, Reston Virginia, USA, 2002.
6. Wells, A.T. Air transportation: a management perspective. 2nd Edition. Wadsworth, Belmont, UK, 1989
7. Donohue, G.L. (editor). Air transportation systems engineering. Progress in Aeronautics and Astronautics. Vol. 193, 2001Wells
8. Climate change 2007: Synthesis report. Summary for policymakers. IPCC, Geneva, CH, 2007
9. Schumann, U. On the effect of emissions from aircraft engines on the state of the atmosphere. AGARD CP-536, Paper K, 1993
10. Schumann, U. Effects of aircraft emissions on ozone, cirrus clouds, and global climate. Air and Space Europe, Vol. 2, Nº 3, pp. 29-33, 2000
11. Filippone, A. Analysis of carbon-dioxide emissions from transport aircraft. Journal of Aircraft, Vol. 45, Nº 1, pp. 185-197, 2008
12. Anderson, J.D. An Introduction to Flight. 5th Edition. McGraw-Hill, Boston, USA, 2005
13. Torenbeek, E. Synthesis of subsonic airplane design. Delft University Press, Delft, NL, 1976
14. Howe, D. Aircraft conceptual design synthesis. Professional Engineering Publishing, London, UK, 2000
15. Raymer, D.P. Aircraft design : a conceptual approach. 4th Edition. AIAA, Reston, Virginia, USA, 2004
16. Roskam, J. Airplane design. Vol. 1. Preliminary sizing of airplanes. Roskam Aviation and Engineering Corporation, Ottawa, Kansas, USA, 1985
17. Martínez-Val, R., Palacín, J.F. y Pérez, E. The evolution of jet airliners explained through the range equation. Proc. IMechE, Part G, Journal of Aerospace Engineering, Vol. 222, en prensa, 2008
18. Alexander, D., Lee, Y.M. Emissionless aircraft study. 38th Joint propulsion Conference & Exhibit, Indianapolis, Indiana, USA, July 2002, AIAA Paper 2002-4056
19. Vigneron, Y. Commercial aircraft for the 21st Century. A380 and beyond. AIAA/ICAS International Air and Space Symposium and Exposition, Dayton, Ohio, USA, 2003, AIAA Paper 2003-2886.
20. Martínez-Val, R. Pérez, E., Muñoz, T. and Cuerno, C. Design constraints in the payload-range diagram of ultra-high capacity transport airplanes. Journal of Aircraft, Vol. 31, Nº 6, pp. 1268-1272, 1994.
21. Martínez-Val, R., Pérez, E., Alfaro, P. Y Pérez, J. Conceptual design of a medium size flying wing. Proc. IMechE, Part G, Journal of Aerospace Engineering, Vol. 221, Nº 1, pp. 57-66, 2007
22. Torenbeek, E. Blended wing body and all-wing airliners. EWADE 2007, samara, Russia, May-June 2007
23. Liebeck, R.H. Design of the blended-wing-body subsonic transport. Journal of Aircraft, Vol. 41, Nº 1, pp. 10-25, 2004•