

*Este concepto artístico de un Cryoplane bimotor de fuselaje ancho, ilustra la problemática que supone el volumen necesario para el almacenamiento del hidrógeno líquido.
-EADS Airbus GmbH-*



Avances tecnológicos y propulsión de aeronaves de transporte

JOSÉ ANTONIO MARTINEZ CABEZA
*Ingeniero Aeronáutico
Miembro del IHCA*

El colofón de la conferencia que pronuncié bajo el epígrafe “De la hélice al motor de reacción” en el curso de las Primeras Jornadas de Estudios Históricos Aeronáuticos, patrocinadas por la Fundación Aena y la Fundación Juanelo Turriano en diciembre de 1998, era una pregunta: ¿Quién puede dudar que en el futuro la aviación comercial llegará hasta donde sean capaces de llegar sus motores? Lo que entonces fue epílogo vale ahora como introducción porque, en efecto, son los motores quienes rigen las capacidades de los aviones de los cuales forman parte: el progreso de la Aviación ha sido, es y será el progreso de sus plantas propulsoras.

El punto de referencia idóneo para examinar el significado de los avances tecnológicos en la propulsión de las aeronaves de transporte es, sin lugar a dudas, el final de la Segunda Guerra Mundial. En aquellos primeros tiempos postbélicos, la aviación civil y de transporte dependía del motor de pistón. El turboreactor daba sus primeros pasos en la aviación militar y pocos eran los que le prestaban atención fuera de ese ámbito. Entre esos pocos

figuraba Sir Geoffrey de Havilland, cuya empresa, fabricante de aeronaves y motores entonces, examinaba desde 1941 las posibles aplicaciones civiles del turboreactor. El Brabazon Committee, establecido por Sir Winston Churchill en diciembre de 1942 para evaluar los proyectos de futuro que debería abordar en su momento la industria británica, listó en un documento fechado el 9 de febrero de 1943 cinco conceptos, el cuarto de los cuales era un avión de reacción para transporte de correo en las rutas del Atlántico Norte, donde sólo la cabina de vuelo debería ir presurizada. La firma de Havilland, puso manos a la obra enseguida en ese concepto que por diversos vericuetos dio origen años después al DH.106 Comet, el primer avión comercial de reacción volado en el mundo, entrado en servicio el 2 de mayo de 1952.

El turbohélice se convirtió en realidad práctica a finales de los 40, y también fueron los británicos quienes con el Vickers Viscount se apuntaron el honor de poner en servicio la primera aeronave comercial con ese concepto propulsor. El segundo reactor civil entrado en servicio sería el soviético Tupolev Tu-104 en 1955, -una sorpresa para el Mundo

Occidental, pero que era ni más ni menos que un desarrollo del bombardero Tupolev Tu-16-. En Estados Unidos, Boeing lanzó el 22 de abril de 1952 el Model 367/80 y lo voló el 15 de julio de 1954.

El Model 367/80 -Dash 80- era un transporte "de doble uso", siguiendo la definición de moda para los conceptos de aplicación tanto civil como militar. De hecho su primer desarrollo vino del contrato de la USAF que dio origen al avión cisterna KC-135, y Boeing hubo de recabar la aprobación de ese departamento para poder lanzar el 707, llegada el 13 de julio de 1955, después de que Douglas, entonces líder en el desarrollo de aviones comerciales, anunciara el lanzamiento del DC-8 seis días antes.

La llegada de los turboreactores de doble flujo al mercado civil supuso un avance tecnológico de enorme valor. Frank Whittle había obtenido la patente británica 471.368 en marzo de 1936 que correspondía a un turboreactor de doble flujo, donde aventuraba las ventajas en economía de combustible que podía aportar, crecientes con la relación entre la masa de aire en la que no habría combustión y la masa de aire usada en el "generador de gas" (la relación de derivación). Pero hasta esos primeros tiempos de la aviación comercial de reacción, casi cuatro lustros más tarde, nadie había reparado en la trascendencia de esa vieja patente que marcó el futuro.

Como no podía ser de otra forma, los DC-8 y 707, primeros reactores comerciales construidos en serie en cantidad significativa y operados por multitud de compañías, emplearon un turboreactor militar adaptado a los estándares civiles. La experiencia en servicio era fundamental de cara a la aprobación de las autoridades aeronáuticas para aquellos revo-



La llegada del turbofan JT3D, que equipó al Boeing 707-320B entre otros, permitió reducir notablemente el nivel de ruido y el consumo de combustible. -Air France, colec. J. A. Martínez Cabeza -

lucionarios aviones comerciales, por ello el Pratt & Whitney JT3C, derivado del militar J.57, se convirtió en la base que permitió su llegada al mercado con una particularidad: se logró que el peso en seco del JT3C resultara un 30% más bajo que el del J.57. Muy pronto los requisitos específicos de la operación civil y la operación militar hicieron que la industria desarrollara motores diferentes en función de ellos.

El concepto turbofan -americanismo que enseguida erradicó a la técnicamente más correcta pero larga definición de "turboreactor de doble flujo"- significaba mejores consumos específicos, pero a costa de mayores diámetros que suponen una barrera para su uso en aviones de combate, en contra

Esta instantánea del primer vuelo del DC-8, equipado con turboreactores Pratt & Whitney JT3C (30 de mayo de 1958), ilustra una de las características típicas de los primeros turboreactores civiles: la producción de abundantes partículas de carbono micronizado libre que provocaba una estela de humo tras ellos, tan vistosa como inocua. - Boeing -



de lo que sucede con el consumo específico. En los motores civiles, salvo el Concorde que dado el estado del arte de la época en que fue desarrollado hubo de ser equipado con un turborreactor de flujo único y no pudo prescindir de la postcombustión para determinadas fases de vuelo, el consumo específico sí era un parámetro determinante. Los motores de los primeros reactores civiles entrados en servicio tenían unas cifras de consumo de combustible que hoy día son inconcebibles en un avión comercial y que, si no hicieron comercialmente inviables a tales aviones, fue porque entonces el combustible era un bien abundante y barato y porque la rígida estructura del transporte aéreo estaba plagada de compañías de bandera cuya competencia se dilucidaba en función de otros parámetros.

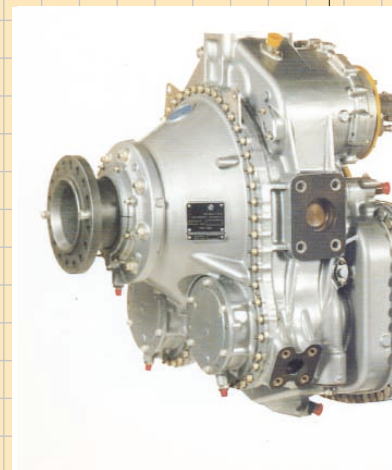
Los motores turbofan aportaron en un plazo de desarrollo relativamente breve unas cifras de consumos específicos sensiblemente mejores. El Pratt & Whitney JT3C tenía un empuje de 4.990 kg. y un consumo específico en despegue de 0,92 kg/h/kgf; el Pratt & Whitney JT3D, la versión turbofan de aquél, se llegó a construir en una gama de empujes que abarcó desde los 7.700 a los 8.150 kg. y presentaba un consumo específico al despegue del orden de 0,535 kg/h/kgf, un 58% menor, con tan sólo una relación de derivación de 1,36. Las cosas discurren tan rápido que el Boeing 707-120 (motor JT3C) voló el 30 de diciembre de 1957 y el Boeing 707-320B (motor JT3D) hizo lo propio el 31 de enero de 1962.

Hay que decir, no obstante, que a pesar de lo espectacular del ahorro de combustible, la causa primera de la pronta introducción del motor turbofan en nuevas versiones de los primeros reactores comerciales no fue, como se podría pensar, la motivación económica, sino la necesidad de mayores alcances para cubrir determinadas rutas (el Atlántico Norte en principio) sin limitaciones de tipo meteorológico. Otra ventaja añadida del turbofan fue la reducción de los niveles sonoros. En los turborreactores comerciales de flujo único se había combatido el problema con toberas especiales que penalizaban sus actuaciones, pero en el turbofan ya no eran precisas.

La evolución del mercado y las demandas de unas compañías aéreas cada vez más exigentes porque a su vez eran cada vez más exigidas financieramente, condujeron al establecimiento tácito de unos parámetros de diseño comunes a los motores de reacción civiles, que además de consumo y ruido en permanente reducción, incluían precios de adquisición mínimos -a pesar de lo cual la planta propulsora supone hoy entre el 20 y el 25% del precio total del avión-, el aumento de la vida de los componentes y su simplificación -reducción de los costos de mantenimiento se llama la figura-, fiabilidad y seguridad de operación, además, por supuesto, del bajo peso, el criterio por excelencia en aviación.

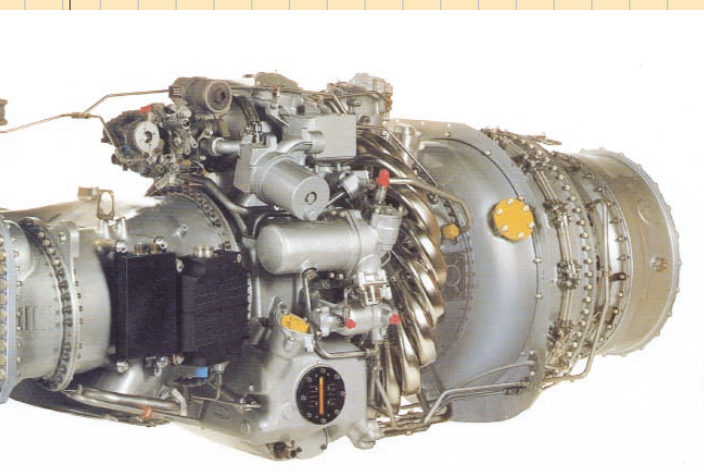


General Electric y McDonnell Douglas ensayaron sobre un MD-80 un prototipo GE.36, aeronave experimental que compareció en Farnborough 88. El concepto UDF fue abandonado no mucho más tarde. -J. A. Martínez Cabeza-



Turbohélice Pratt & Whitney Canada PW100, primer modelo de una familia que hoy equipa aviones como el C-295. -P&W Canada-

A mediados de los 60 el entorno militar fue responsable directo de que surgiera una nueva generación de motores para la aviación comercial, los turbofans de gran empuje que, en su primera generación, se movieron en el rango de los 18.000-20.000 kg. de empuje y fueron responsables de la apertura de la era del fuselaje ancho. Todo empezó con el programa del transporte de gran capacidad CX-HLS (Heavy Logistic System) de la USAF iniciado en 1962 y culminado con la construcción del Lockheed C-5 Galaxia. Los soviéticos estaban realizando el Antonov An-22 Anteus con los turbopropulsores NK-12NV de 15.000 eshp y hélices contrarrotatorias,



tancia, la puesta en escena del Boeing 747 y, un poco más tarde, de los DC-10, L-1011 Tristar y A300B.

Cuando de tiempo en tiempo se reactiva la polémica sobre la supuesta financiación ilegal de programas europeos, se olvida que, tanto en el caso del Boeing 707, como en el de estos motores, fueron los presupuestos militares quienes financiaron de manera no precisamente discreta sus desarrollos. De la importancia de ese apoyo dio pronto muestra la quiebra de Rolls-Royce en 1971 causada por su intento de competir invirtiendo su propio dinero en el motor RB.211. Y es que aquella nueva generación de turbofanes implicó la resolución de importantes -y costosos- retos tecnológicos.

Al igual que en el caso del TF.39, los motores turbofan de gran empuje para el mercado civil fueron posibles por la consecución de altas relaciones de derivación. El General Electric CF6-6 tenía una relación de derivación de 5,9 y en el Pratt & Whitney JT9D esa relación era de 5,1, ambas muy superiores a la empleada en anteriores generaciones de turbofanes pero muy por debajo del TF.39, que en su versión inicial tenía un empuje de 18.650 kg. y una relación de derivación de 8. La enorme masa de aire que esos grandes motores debían mover hacía preciso utilizar "fan" de grandes diámetros que implicaban tres problemas fundamentales, el aerodinámico, el de resistencia mecánica y el aeroelástico. Fueron precisamente los dos últimos los responsables indirectos de la quiebra de Rolls-Royce antes citada, cuando esta firma británica intentó emplear en el "fan" del RB.211 álabes de fibra de carbono, en lo que se suponía una mejora trascendental -junto a la configuración de tres ejes- frente a los álabes de la competencia (el General Electric CF6 empleaba aleación ligera de aluminio y el Pratt & Whitney JT9D usaba titanio): los álabes de fibra de carbono se revelaron incapaces de soportar los ensayos de impacto previstos por las normas y la erosión por partículas de arena y similares y tras tribulaciones sin fin hubieron de ser reemplazados por álabes de titanio.

No sólo en el aumento de la relación de derivación estaba la clave de los nuevos motores. Hubo de ser combinada con altas relaciones de compresión y muy elevadas temperaturas de entrada en turbina. Se había iniciado así una espiral tecnológica en cuanto a materiales y métodos de producción cuya consecuencia ha sido que los motores actuales funcionen en los 1.500°C de temperatura de trabajo y en relaciones de compresión del orden de 40. Fue preciso diseñar nuevas cámaras de combustión de alto rendimiento y poner a punto sistemas de refrigeración de los álabes, que inicialmente emplearon circulación de aire por su interior y más adelante pasaron a sistemas de mayor complejidad aún, como los llamados "film cooling" (mantener una delgada capa de aire relativamente

pero ese tipo de motor no habría permitido cumplir con la especificación en algunos apartados, sin contar con que la USAF no había sido tradicionalmente proclive al uso de ese tipo de propulsión.

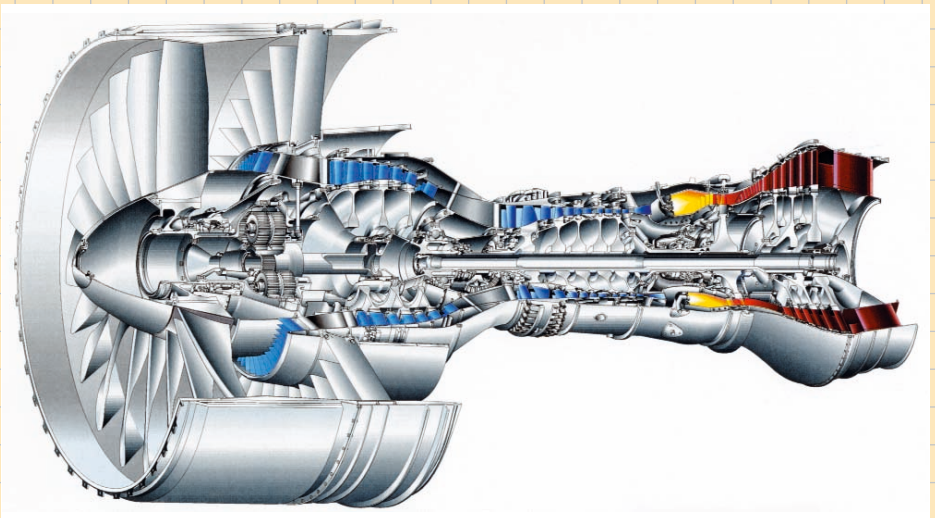
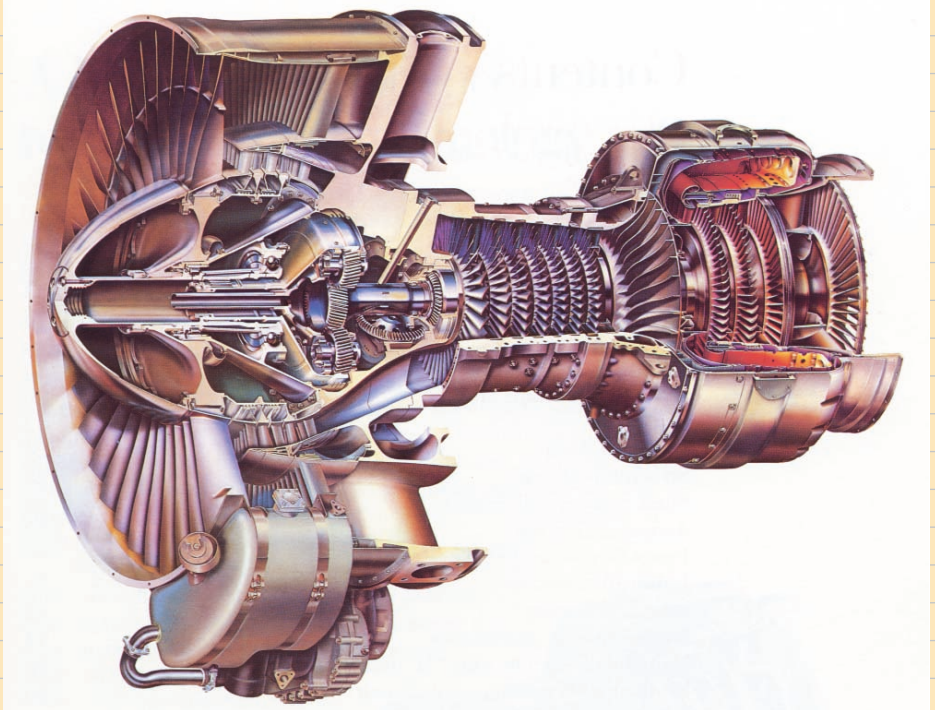
General Electric y Pratt & Whitney trabajaron sobre el concepto turbofan y en octubre de 1965 se eligió el General Electric TF.39, avalado por las pruebas de un demostrador, el GE 1/6, que había alcanzado un consumo específico en régimen de despegue de 0,336 kg/h/kgf. Una segunda consecuencia del programa había sido la puesta a punto de las tecnologías precisas para crear los motores CF6-6 y JT9D que iban a permitir, en primera ins-

frío interpuesta entre la superficie de los álabes y los gases) e "impingement cooling" (dirigir una corriente de aire también relativamente frío sobre los álabes).

La crisis de 1974 con su aumento de los precios del crudo afloró un nuevo concepto de motor que recibió variadas designaciones. La más descriptiva fue la de UDF (UnDucted Fan) y ella será la usada aquí. A grandes rasgos se basaba en el hecho de que las relaciones de derivación crecientes hacen que los motores turboprop se asemejen cada vez más a un turbohélice multipala carenado. Los UDF que más avanzaron, los General Electric GE.36 y Allison 578-DX, iban más allá: llevaban unas hélices contrarrotatorias, sin carenar, de alta velocidad de rotación con una relación de derivación equivalente del orden de 50. Ambos fabricantes aseguraron que, según sus ensayos, los consumos específicos estarían un 40-60% por debajo de los correspondientes a los motores turboprop equivalentes en empuje de la época.

El GE.36 voló a título experimental en un MD-80 y un Boeing 727, mientras Allison construyó el concepto 578-DX, volado en el antedicho MD-80, de apariencia externa semejante a la del GE.36 aunque su operativa fuera algo distinta. En 1979 la vuelta a la normalidad en el mercado del petróleo dio al traste con el concepto UDF.

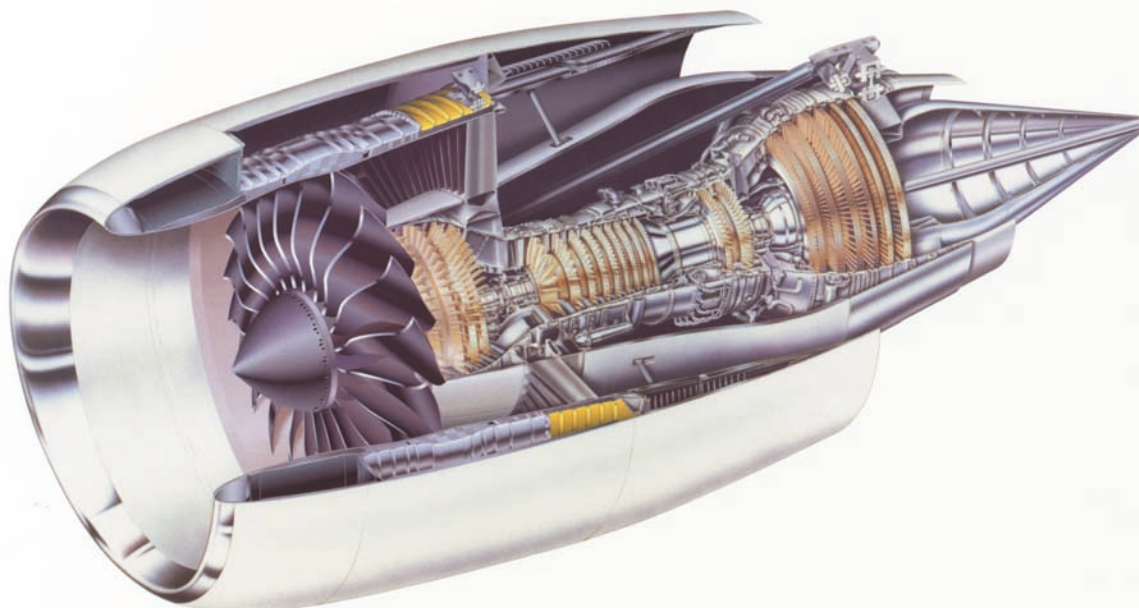
El motor turbohélice también "creció" tecnológicamente, pero la progresión del motor de reacción en el terreno de la aviación comercial le fue relegando al mercado regional, donde ocupó una posición de privilegio hasta que a principios de la década de los 90 la irrupción de los reactores regionales redujo aún más su mercado. Para el turbohélice se han desarrollado hélices multipala de baja velocidad de rotación y alto rendimiento capaces de afrontar con buenos resultados los argumentos negativos del ruido y la vibración. La causa primera de su retroceso



El ALF 502 (arriba) fue el primer "geared fan" operacional. El Pratt & Whitney PW8000 quedó en espera de la apertura de mercado para su nivel de empuje. -AlliedSignal, Pratt & Whitney-

en el mercado civil estuvo en la actitud de una industria del transporte aéreo que, desde la llegada del motor de reacción, cantó de manera irreflexiva las excelencias de éste en detrimento de la hélice, creando en el público al final una imagen obsoleta e insegura de los aviones turbohélice -véanse recientes y lamentables casos sucedidos en nuestro país-. La realidad es que las actuaciones, fiabilidad y rendimiento de los motores turbohélice figuran hoy en las más altas cotas y esa imagen es tan errónea como injusta.

Ha quedado claro en los párrafos precedentes que la búsqueda de mayores empujes y menores



El General Electric GE.90-115B ha sido seleccionado por Boeing para los 777-200LR y 777-300ER. -GE Aircraft Engines-

consumos específicos pasa por aumentar la relación de derivación, traducida en "fanos" de mayor diámetro. Razones aerodinámicas y de crecientes esfuerzos centrífugos, hacen que esos aumentos de diámetro deban ser combinados con menores velocidades de rotación, en contraste con la necesidad de accionarlos mediante turbinas de velocidad de rotación creciente. Una solución obvia es seguir el procedimiento de los turbohélices, es decir, mover el "fan" a través de una caja de engranajes reductores, concepto referido con la frase "geared fan" y que reduce el ruido a la par que las revoluciones. La arquitectura del motor hace que tal caja deba ir "debajo" del compresor, algo que a priori puede complicar el mantenimiento. El uso de los inconfundibles "álabes con flecha", una idea incorporada en las palas de los modernos turbohélices y transcrita a varios turbofanos actuales, se ha revelado como una alternativa aerodinámica para obviar el "geared fan", pero sólo en un estrecho margen de diseño.

El primer "geared fan" fue el AlliedSignal (Lycoming) ALF 502, lanzado en 1969 y cuya versión inicial fue la ALF 502L certificada en febrero de 1980 para 3.400 kg. de empuje y una relación de derivación de 5. A pesar de los buenos resultados obtenidos con ese motor, no es un concepto que por el momento se haya generalizado, pero cuando la industria habla hoy genéricamente de los "Advanced Turbofan" (ATF) le está incluyendo de hecho como una opción importante para los aviones del futuro cercano.

Pratt & Whitney siguió, años después, los pasos del ALF 502 con el PW6000 y el PW8000. El primero de ambos fue seleccionado en su momento co-

mo motor para el Airbus A318, y fue originalmente concebido como sucesor del legendario JT8D, pero con bastante retraso, cuando el CFM56 y el V2500 le habían tomado una delantera más que notable en el mercado. El PW8000, concebido para una relación de derivación de 10, figura "congelado" porque no existe de momento un mercado para él en su rango de empujes (11.000-16.000 kg.). Desde hace un par de años Pratt & Whitney trabaja junto a MTU Aero Engines y Fiat Avio en un nuevo demostrador del concepto, el AFTI (Advanced Technology Fan Integrator), como base de trabajo para el desarrollo de la familia PW800 de motores destinada a los mercados regional y de negocios, que se moverá entre los 4.500 y los 9.000 kg. de empuje.

La generalización de las ETOPS (Extended Twin Operations) ha sido posible gracias a las excepcionales condiciones de fiabilidad alcanzadas por los motores turbofan. Ese tipo de operación de birreactores combinada con la demanda de mayores alcances en las aeronaves, ha llevado a superar la frontera de las 100.000 libras de empuje. En este caso fue General Electric quien con el GE.90 lanzado en 1990 marcó el camino. La versión GE.90-90B con un empuje de 41.780 kg., una relación de compresión total superior a 45, una relación de derivación cercana a 9 y un consumo específico en crucero de 0,53 kg/h/kgf, ha dado paso a la versión GE.90-115B seleccionada por Boeing para los 777-200LR y 777-300ER, ensayada en banco hasta un empuje de 55.780 kg., por encima de su empuje nominal de 52.165 kg.

El GE.90-115B incorpora un "fan" de 128 pulgadas (3,25 m.) de diámetro. General Electric mantiene tradicionalmente un cierto velo de misterio sobre

algunas de las características del GE.90, que se acentúa en el caso del GE.90-115B del que no hay cifras oficiales de consumo específico y relación de derivación, aunque algunas conclusiones pueden extraerse comparando las cifras conocidas de este último con las del GE.90-90B.

Programas tecnológicos en curso o próximos a concluir están desarrollando las tecnologías que usarán las próximas generaciones de motores, programas donde la reducción de las emisiones sonoras y contaminantes tienen un papel prioritario. Sorprende negativamente que los esfuerzos de los fabricantes de motores de aviación, que figuran entre las industrias que más han invertido en ese sentido, no sólo no sean reconocidos, sino que incluso el transporte aéreo está siendo en algunos lugares objeto de vetos e injustos impuestos y tasas, muchos de ellos con criterios absurdos y desprovistos de rigor técnico, cuya recaudación no parece que se esté invirtiendo en investigación destinada a resolver los supuestos problemas que se han utilizado para imponerlos. Las páginas de esta publicación han recogido en más de una ocasión noticias que demuestran por donde se mueven las cosas en ese terreno.

Como se anticipó al principio, el propio concepto del motor turbofan ha sido una herramienta decisiva en las drásticas reducciones del ruido de las aeronaves logradas hasta ahora que, a nivel de percepción física por parte de las personas, suponen un 75% con respecto a los primeros reactores comerciales. La introducción de materiales absorbentes acústicos en las góndolas de los motores se ha sumado al proceso.

En el terreno de las limitaciones de emisiones contaminantes los avances han sido igualmente espectaculares. Son ahora las emisiones de los óxidos de nitrógeno (NOX) el principal objetivo de las investigaciones, porque el aumento de la presión y de la temperatura de entrada en turbina supone, a la vez que mejores actuaciones, niveles de producción de esos óxidos más altos. Hay pues un conflicto entre emisiones de NOX y eficiencia donde las cosas se deben mover a nivel de compromiso. La solución está obviamente en el diseño de las cámaras de combustión y la mayor dificultad estriba en que el motor debe mantener los menores niveles posibles de emisiones de óxidos de nitrógeno en todos los regímenes de funcionamiento. Con las cámaras de combustión tradicionales se puede optimar para un cierto espectro de regímenes, pero no a lo largo de todos ellos. Los principales fabricantes de motores trabajan ahora sobre nuevos conceptos de cámaras, uno de cuyos fundamentos a grandes rasgos es la disposición de dos zonas de combustión separadas en su interior, de manera que según el régimen de funcionamiento trabaja una u otra asegurando condiciones óptimas. Hasta el momento se han logrado reducciones globales del 12% en



las emisiones de NOX para relaciones de compresión de 25-30.

El programa IHPTET (Integrated High Performance Turbine Engine Technology) se inició en 1988 en Estados Unidos como una actividad conjunta del Departamento de Defensa, la NASA y la industria, con el objetivo expreso de mantener el liderazgo en la tecnología de los motores aeronáuticos de turbina. Múltiples actividades de estudio y ensayo con prototipos experimentales cuya reseña siquiera somera ocuparía bastantes páginas de este dossier, han conducido a un estado de cosas donde los objetivos para 2003 suponen, con respecto a los niveles tecnológicos del año 2000, reducciones del consumo específico del 40% en los turbohélices y turboejes, del 35% en los costos de fabricación y mantenimiento e incrementos del 120% en la potencia específica.

A nivel de los turborreactores y turbofanos los objetivos del IHPTET frente a idénticas referencias suponen duplicar la relación empuje/peso, aumentos del orden de 200°C en las temperaturas de fin de combustión y conservar en ellos la mencionada rebaja del 35% en los costos de fabricación y mantenimiento.

El programa quinquenal UEET (Ultra Efficient Engine Technology) de la NASA, lanzado a me-



Boeing y Rolls-Royce realizaron recientemente un programa de ensayos en vuelo sobre un 777-200ER empleando un motor Trent 800 modificado a nivel de góndola con la adición de "toberas dentadas", tal y como se muestra en la fotografía, durante el que se pudieron constatar reducciones sonoras de 4 dB en régimen de despegue. Boeing está proponiendo ese concepto en el 747-400X OLR (Quieter Longer Range) -Boeing-

Diversos estudios fuera de esos programas estadounidenses de amplio espectro muestran que a 10 años vista los motores de las aeronaves comerciales pueden disponer de otros tipos de mejoras tales como toberas de sección variable, cierta capacidad de vectorización e incluso la supresión de las tradicionales reversas.

No se debe concluir este repaso a las cuestiones tecnológicas relacionadas con la propulsión de las aeronaves de transporte sin hacer mención al posible empleo de combustibles alternativos. Es preciso indicar que los turborreactores pueden quemar un amplio espectro de líquidos y gases como combustibles sustitutivos de los derivados del petróleo; aparecerían problemas en diversos apartados, pero en general ajenos a los propios motores.

Una primera posibilidad que se ha examinado es el uso de combustibles líquidos sintéticos semejantes en propiedades a los actualmente usados. Se ha encontrado posible, pero sólo podría hacerse en condiciones económicas equiparables a las actuales hacia 2090.

Una segunda opción es el empleo de hidrógeno líquido, y sobre ella se ha trabajado y se trabaja. Fue en la Unión Soviética donde a finales de los 70 se decidió lanzar un programa experimental acerca del posible uso del hidrógeno y el gas natural como combustible de aeronaves. Un Tupolev Tu-154 de las primeras partidas de producción fue modificado para tal propósito y voló primero usando hidrógeno líquido y luego gas natural licuado cuyo uso resultó bastante más complejo. El programa fue cerrado debido a los problemas económicos de Rusia y posteriormente se mantuvieron contactos con la industria de Alemania, a los que se debe en parte la realización del programa Cryoplane centrado en el hidrógeno líquido y desarrollado durante dos años dentro del Quinto Programa Marco de la Comunidad Europea con un costo de 4,47 millones de Euros.

Las excelentes propiedades energéticas de ese gas, usado en los vehículos espaciales, son contrarrestadas a nivel de empleo aeronáutico por la problemática de su producción asequible y su distribución en los aeropuertos, y por el volumen y las condiciones de almacenamiento a bordo de las aeronaves; no se olvide que el hidrógeno se licúa a -253°C , sólo 20°C por encima del cero absoluto, y aún así ocupa cuatro veces más volumen que el combustible convencional equivalente en capacidad energética.

Tal vez el hidrógeno líquido será un día combustible de las aeronaves comerciales, pero en el mejor de los casos habrán de pasar aún muchos años para que eso suceda. El futuro previsible del progreso aeronáutico pasa por motores que continuarán usando derivados del petróleo y tecnologías que los harán cada vez más rentables y socialmente aceptables. ■

diados del pasado año, está enfocado al terreno civil y a un espectro operativo que abarca los regímenes subsónico, transónico, supersónico e hipersónico. Está dividido en siete subprogramas que cubren respectivamente la integración de sistemas y componentes, la integración avión-motor, la reducción en la producción de NOX, el aumento de la eficiencia de las turbomáquinas, la incorporación de materiales avanzados, el uso de "mandos de motor inteligentes" y la realización de demostradores de integración de todas esas tecnologías.

Sus objetivos incluyen la reducción de un 15% en el consumo de combustible de las grandes aeronaves subsónicas y del 8% en aeronaves comerciales pequeñas y supersónicas, así como la obtención de niveles de emisión de NOX un 70% inferiores a los legislados por la OACI en 1996, incluso para relaciones de compresión de 55. Se espera que la aplicación de las nuevas tecnologías y el uso de CFD permitirán compresores y turbinas compactos y con menos escalones que los actuales. Se profundizará en el estudio de los materiales compuestos de matriz cerámica y de matriz de polímeros de alta temperatura que podrían permitir temperaturas de entrada en turbina del orden de los 2.000°C ó superiores en siguientes etapas.