

El empuje de la *Aviación de Combate*

DIEGO DOMÍNGUEZ FERNÁNDEZ
Área de Ingeniería Aeroespacial
Universidad de León



Nadie duda de que desde los primeros años de la aviación de combate hasta nuestros días los aviones han evolucionado de forma notable, siendo la actual quinta generación de aviones de caza su mayor exponente. Menos conocida resulta, sin embargo, la evolución que, de forma paralela, han seguido sus sistemas propulsivos; responsables en buena parte de las sustanciales mejoras de prestaciones que se han conseguido con el paso de los años. Velocidad, radio de acción y aceleración son solo algunas de las cualidades que dependen del auténtico corazón del avión de combate moderno: el motor a reacción.

EL MOTOR A REACCIÓN: FUNDAMENTOS

Para comprender cómo ha evolucionado el motor a reacción y tratar de intuir su futuro es necesario recordar sus principios de funcionamiento. En él se genera empuje cogiendo aire de la atmósfera y expulsándolo a una velocidad mayor de la que entró al motor. Así, la fuerza de empuje generada es esencialmente proporcional a la cantidad de aire que atraviesa el motor y al incremento de velocidad que se le consigue aplicar. Para acelerar el aire, primero se eleva su presión y temperatura por medio de un compresor, tras mezclarlo con combustible se quema

y, una vez se ha extraído parte de su energía en la turbina (que será necesaria para accionar el compresor) se acelera en la tobera al salir del motor (figura 1). En el caso de los motores a reacción para aviones militares, es habitual que dispongan además de un sistema de postcombustión mediante el cual se inyecta nuevamente combustible a la salida de la turbina para conseguir empuje adicional cuando se requiera. Bajo este principio relativamente simple, multitud de arquitecturas y diseños son capaces de hacer funcionar un motor a reacción y conseguir que proporcione el nivel de empuje necesario, pero no todas resultan igual de eficientes.

Para evaluar la bondad del motor, dos son los parámetros más importantes a considerar: empuje específico y consumo específico. Con el primero es posible indicar cuánto aire es necesario que atraviese el motor para obtener cada kilo de empuje que produce. Un empuje específico grande quiere decir que con poco aire que atraviese el motor se generará el suficiente empuje. En ese caso será posible hacer un motor pequeño y compacto, ligero y más sencillo de integrar en la plataforma. El segundo de los parámetros indica el gasto de combustible necesario para conseguir cada kilo de empuje generado en el motor. En este caso resulta evi-

dente que un motor de bajo consumo específico requiere consumir menos combustible para producir el nivel de empuje necesario.

Con ambos conceptos claros la idea parece simple: es deseable diseñar el motor que proporcione tanto el mayor empuje específico como el menor consumo específico. Lo difícil comienza a la hora de determinar qué características debe tener el motor que satisfaga simultáneamente ambas condiciones. El reto tiene una doble vertiente. Por un lado hay limitaciones tecnológicas en el diseño de los componentes, debido a aspectos como la temperatura y esfuerzos que son capaces de soportar los materiales empleados. Como ejemplo significativo, la temperatura tras la combustión estará limitada; lo mismo que el salto de presiones que proporciona el compresor con un rendimiento adecuado. Por otra, lo que puede resultar beneficioso para uno perjudica al otro, lo que obliga a elegir una solución de compromiso. Un claro ejemplo de ello es el índice de derivación –relación entre el gasto de aire que rodea el núcleo del motor impulsado únicamente por el ventilador (o fan, de una o varias etapas) colocado a la entrada y la que atraviesa la cámara de combustión y turbomaquinaria—. Por comparación, un motor con mayor índice de derivación que otro permite generar el mismo nivel de empuje,

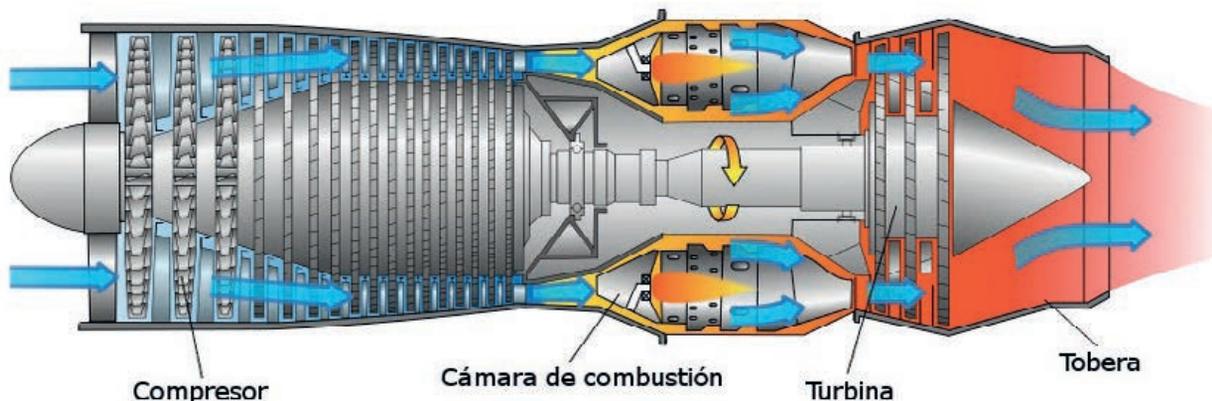


Figura 1. Arquitectura básica del motor a reacción. (Imagen: Wikimedia Commons)

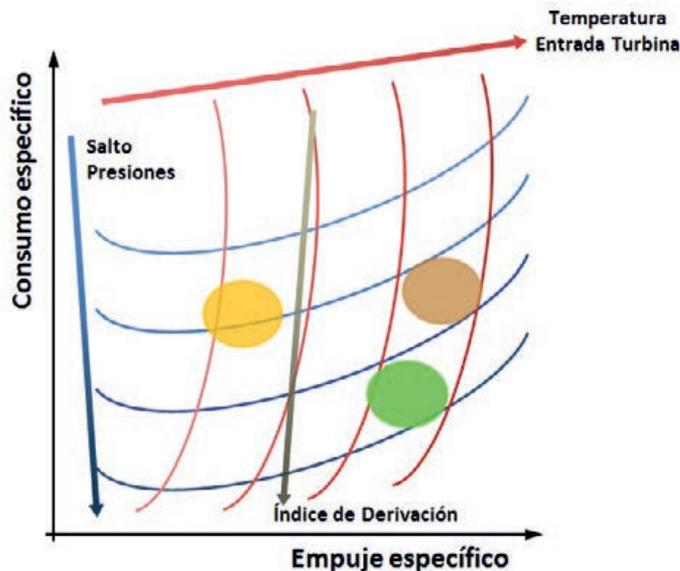


Figura 2. Tendencias para la relación entre los parámetros de diseño y las prestaciones de motor. La zona verde es la típica de diseño para motor de aviación civil de gran tamaño; la marrón, para aviones de combate, y la amarilla, para pequeños reactores de negocios. Adaptado de Alberto García Pérez. *Diseño de Motores de Aviación Comercial*. AENA, 2008

pero moviendo para ello una cantidad de aire mayor que es expulsada a menor velocidad. Esta es una forma más eficiente de generar empuje, lo que se traduce por tanto en un menor consumo específico. Por contra, al requerir mayor gasto de aire el empuje específico del diseño será menor (con la consiguiente penalización en tamaño y peso). El gráfico en la figura 2 permite hacerse una mejor idea de la relación entre las variables de diseño del motor y sus prestaciones.

EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL MOTOR A REACCIÓN EN LA AVIACIÓN DE COMBATE

Mucho han cambiado los motores a reacción desde que el Messerschmitt Me 262, primer caza que entró en servicio propulsado por un motor a reacción (figura 3), surcara los cielos en los últimos días de la II Guerra Mundial. Baste comparar los apenas 1.100 K de temperatura de entrada en turbina que era capaz de soportar

con los más de 1.900 K que se estima alcanza un motor moderno como el EJ200.

Una sencilla revisión histórica aporta una perspectiva clara de cómo el motor a reacción ha evolucionado a la hora de propulsar las aeronaves de combate. Buscando optimizar los ya comentados parámetros de empuje y consumo específico, es fácil encontrar los elementos del diseño que los desarrolladores se han esforzado en mejorar.

Un primer ejemplo claro es la relación de compresión, de la que puede observarse su evolución histórica en la figura 4. Un motor con una mayor relación de compresión presenta un menor consumo específico, puesto que permite utilizar un ciclo termodinámico más eficiente. Conseguir relaciones de compresión más grandes requiere diseños más complejos en el compresor. Una de las formas más sencillas de proceder es añadirle etapas (hasta 17 llegó a tener el J79 del Phantom II). Cada disco con álabes del compresor imprime un cierto salto de presiones al flujo de aire que lo atraviesa, de tal manera que a más discos (o etapas) mayor relación de presiones proporcionará el compresor. Este proceso, si bien aparentemente sencillo, guarda inconvenientes notables. Cada nueva etapa añadida supone incrementar el peso y longitud del compresor (y por extensión del motor) y el número de piezas que lo forman, lo cual es una

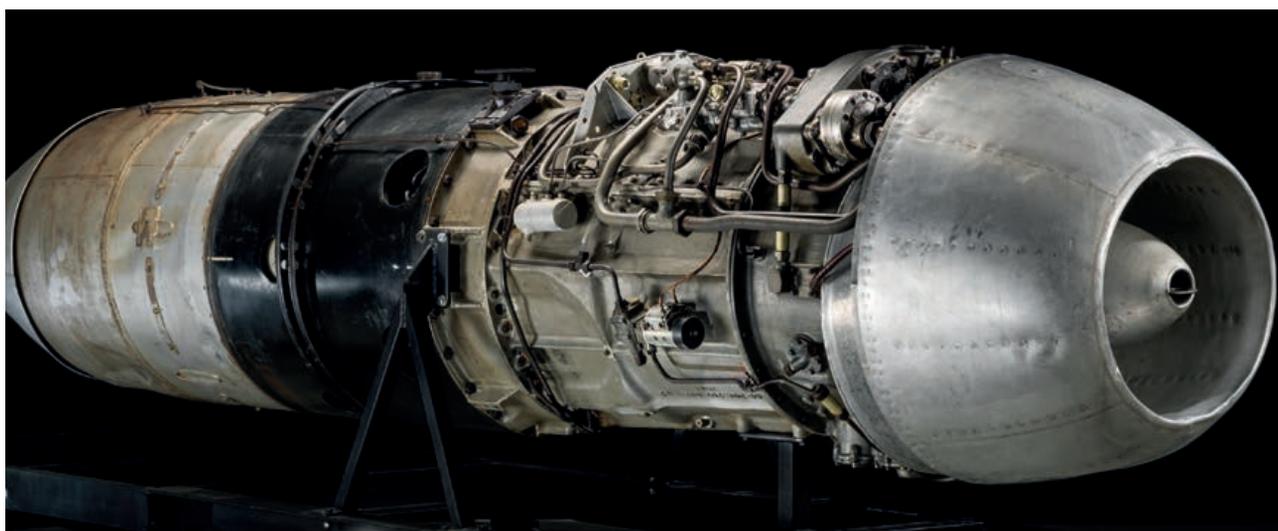
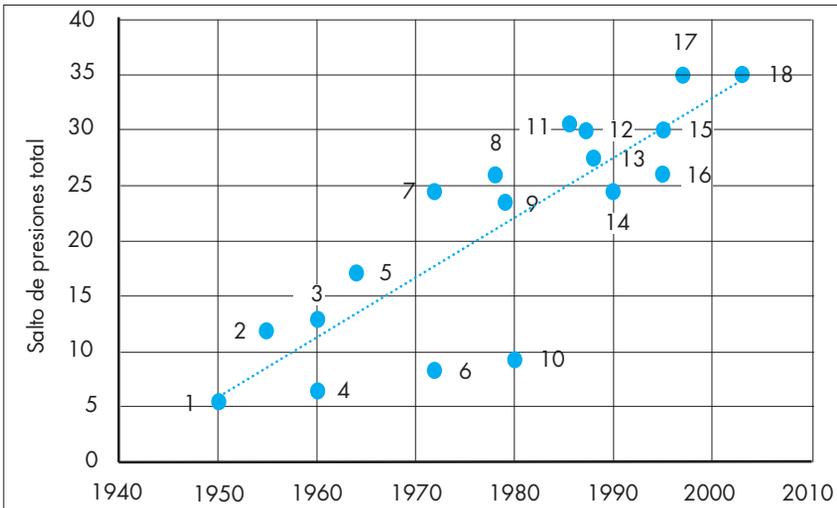
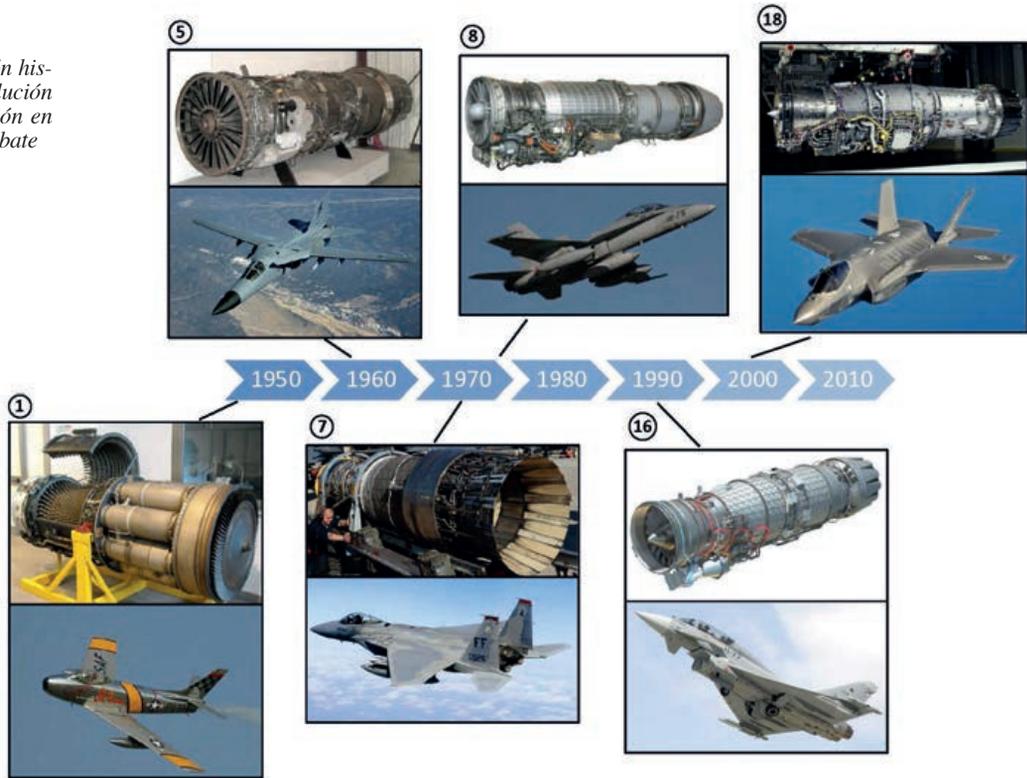


Figura 3. Imagen del motor Junkers Jumo 004B (1944) depositado en el Smithsonian National Air and Space Museum y utilizado para propulsar el primer avión operacional con motor a reacción, el Messerschmitt Me 262. (Imagen: National Air and Space Museum, Smithsonian Institution)

Figura XI. Revisión histórica de la evolución del motor a reacción en los aviones de combate



AVIÓN	MOTOR	AVIÓN	MOTOR
1 F-86 E	J47-GE-13	10 Mirage 2000 C	SNECMA M53-5
2 F-105	P&W J75	11 F-16 C/D	GE F110-GE-100
3 F-4B	J79-GE-8	12 F-14 B/D	GE F110-400
4 Mirage F-1	Atar 9K	13 JAS 39 Gripen	Volvo RM12 (GE F404)
5 F-111 A	TF30-P3	14 Rafale	SNECMA M88
6 F-5 E/F	J85-GE-21	15 F/A-18 E/F	GE F414
7 F-15	P&W F100-PW-100	16 EFA	EJ-200 Mk 101
8 F/A-18 A/B/C/D	GE F404-GE-400	17 F-22	P&W F119
9 Tornado F3 ADF	RB 199 Mk 104	18 F-35	P&W F135-100

Figura 4. Evolución del salto de presiones total en distintos motores a reacción utilizados por aviones de combate occidentales. Datos obtenidos del Jane's aero-engines (2013-2014)

clara desventaja. Además, cuanto más se comprime el aire menos espacio ocupa, por lo que el tamaño del conducto que atraviesa tendrá que ir disminuyendo. Esto explica que en cualquier compresor típico (véase figura 5) la longitud de los álabes disminuye a medida que avanzamos hacia el interior del motor. Cada nueva etapa requerirá diseñar álabes más pequeños, los cuales son más difíciles de fabricar, presentan más pérdidas y ofrecen por tanto un peor rendimiento. Una alternativa más eficiente pasa por tanto por mantener un número contenido de etapas en el compresor y exprimir al máximo el diseño de los álabes de cada etapa, de forma que el salto de presión proporcionado en cada una de ellas sea mayor. Esto se traducirá a su vez en que resultan necesarias un menor número de etapas para conseguir un determinado salto de presiones total. La mejora en las capacidades de fabricación y simulación numérica ha permitido en las últimas décadas refinar de forma sustancial el diseño y características aeromecánicas de los álabes. Sirva como ejemplo ilustrativo la evolución que puede apreciarse entre los motores de los aviones Tornado

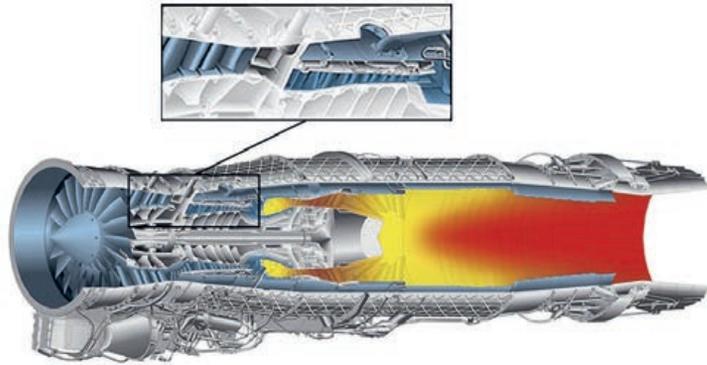


Figura 5. Sección del motor EJ200 del Eurofighter. Nótese en la ampliación la progresiva disminución de tamaño de los álabes del compresor y la división del flujo de aire en principal y secundario. Adaptado de Consorcio Eurojet

ADV y Eurofighter (basado en el anterior). En el caso del RB199 Mk104 del Tornado son necesarias un total de 12 etapas para proporcionar un salto de presiones total de 23.5, por su parte el EJ200 es capaz de alcanzar mayor salto de presiones, 26, utilizando tan solo 8 etapas y un 40% menos de álabes.

Para poder llegar a una relación de compresión mayor resulta también necesario que el núcleo del motor pueda funcionar a mayores temperaturas.

Cuando se aumenta la relación de compresión no solo crece la presión a la salida del compresor, sino que a la cámara de combustión llega aire cada vez más caliente. Esto disminuye el margen disponible para la quema del combustible sin exceder los límites de temperatura admisibles en la propia cámara y en la turbina situada a la salida. La temperatura soportada a la salida de la cámara de combustión ha seguido una tendencia creciente similar a lo ya visto para la relación de

compresión (figura 6, si bien no hay información de fuentes fiable para la mayor parte de los modelos).

Este crecimiento de la temperatura de operación se ha apoyado en la constante mejora en las capacidades de los materiales, el avance en las técnicas de refrigeración de los álabes y, en tiempos más recientes, la adición de recubrimientos protectores basados en materiales cerámicos con una gran capacidad para resistir temperaturas elevadas.

El último de los principales parámetros de interés que definen el funcionamiento del motor es el ya mencionado índice de derivación, y es aquí donde se aprecia la diferente evolución seguida por los motores empleados en los aviones civiles de transporte y los aviones de combate. Los aficionados a la aviación serán conscientes de cómo durante las últimas décadas los motores *turbofan* que propulsan las aeronaves civiles han incrementado su diámetro de forma sustancial. Esto ha sido así para permitir que un mayor flujo de aire atravesase el *fan* o ventilador situado en el frontal del motor, lo que se traduce a su vez en un incremento del mencionado índice de



Quemadores del Eurofighter desarrollando su potencia en vuelo

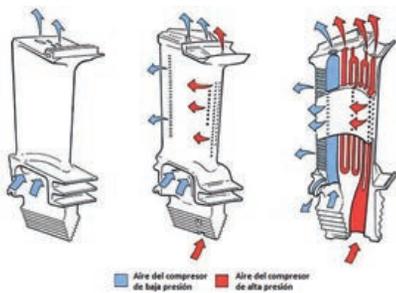


Figura X2. Evolución de los mecanismos de refrigeración en los álabes de turbina

derivación. Como ya se ha comentado, un índice de derivación elevado mejora el consumo específico a costa de minorar el empuje específico. En la aviación civil, donde la disminución del consumo es el objeto de deseo de cualquier operador, este ha sido el camino seguido por los fabricantes. Sin embargo, en los aviones de combate prima disponer de un motor pequeño, ligero y fácil de integrar, pero que disponga de una gran capacidad de empuje, lo que explica que el índice de derivación se haya mantenido en valores bajos. De hecho, frente a los *fan* de una única etapa de que disponen los motores de gran índice de derivación, estos motores suelen presentar un *fan* de tres etapas antes de que el flujo se divida en dos (figura 5).

NO SOLO TERMODINÁMICA

Sin embargo, no solo la termodinámica del motor ha cambiado con el paso de los años. El control del motor, los procesos de mantenimiento, incluso la propia filosofía de mantenimiento han evolucionado de forma sustancial. En ello ha jugado un papel clave la progresiva digitalización del motor, apoyada en el desarrollo de una electrónica cada vez más ligera, pequeña, fiable y con mayor capacidad de cálculo.

Así por ejemplo, los tradicionales y muy complejos sistemas hidromecánicos para el control del flujo de combustible se han reemplazado por sistemas electrónicos de control (habitualmente conocidos como FADEC, *full authority digital engine control*). Estos monitorizan numerosas variables de operación (temperaturas, presiones, revoluciones, etc.) en tiempo real y, en base a la demanda de poten-



Figura X3. Orificios para refrigeración y recubrimientos térmicos en un moderno ábalo de turbina

cia por parte del piloto, computan en una fracción de segundo el gasto de combustible que es necesario inyectar en cada momento.

Por otra parte, como bien podrá atestiguar cualquier mecánico veterano, también han experimentado un cambio radical todos los procedimientos relativos a la mantenibilidad del motor, gracias sobre todo a la incorporación de cada vez más sofisticados sistemas de monitorización y diagnóstico. La hipótesis que subyace en la utilidad de estos sistemas es sencilla: al añadir sensores al motor (cada vez más ligeros y fiables) debe ser posible aislar problemas específicos cuando comiencen a mostrar síntomas, con suficiente tiempo para permitir que el motor sea atendido de forma rápida y eficiente,

con un impacto mínimo en la disponibilidad del sistema. La clave tecnológica de los sistemas de monitorización es la capacidad para interpretar las mediciones con precisión, sin ambigüedad y que pueda ser realizado por el ordenador de a bordo. De esta forma, basándose en las conocidas como librerías de fallos, el motor es capaz de identificar parámetros de funcionamiento anómalos y asociarlos con un modo de fallo concreto. Esta función de autodiagnóstico facilita y acelera, por tanto, la tarea de identificación y reparación de la avería por parte del personal de tierra.

LAS NOVEDADES QUE ESTÁN EN CAMINO

Como se desprende de lo comentado, la configuración de un motor a reacción típico de un avión de combate no ha variado de forma sustancial con los años. Son numerosas las mejoras tecnológicas introducidas en sus componentes y remarcable la evolución en sus prestaciones, pero se sigue basando en los mismos principios físicos de funcionamiento con una arquitectura de máquina muy semejante.

No parece que esto vaya a cambiar de forma radical en los próximos años, si bien se encuentran en marcha di-

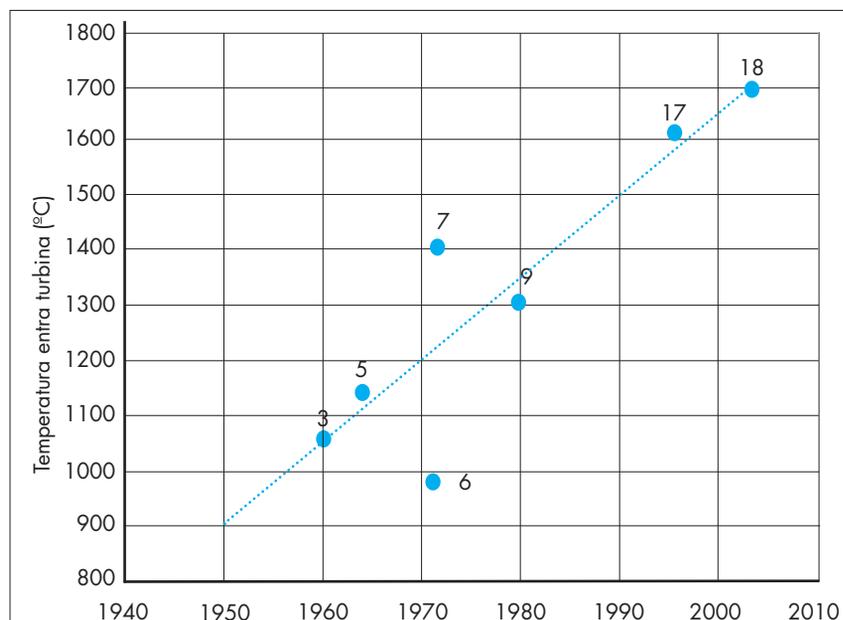


Figura 6. Evolución de la temperatura de entrada en turbina soportada por distintos motores a reacción utilizados en aviones de combate occidentales. Datos obtenidos del *Jane's aero-engines* (2013-2014)

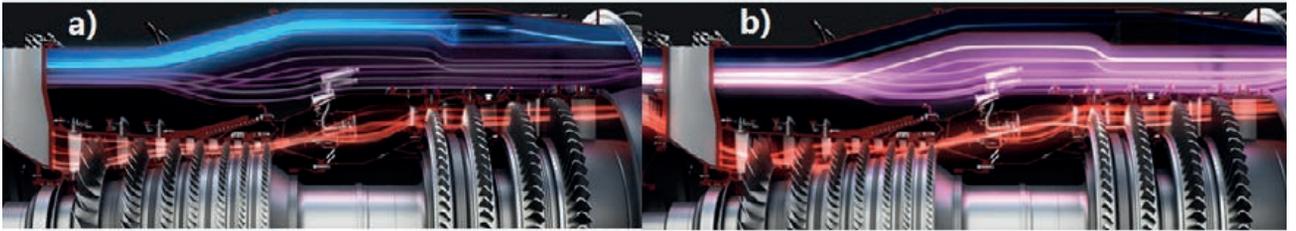
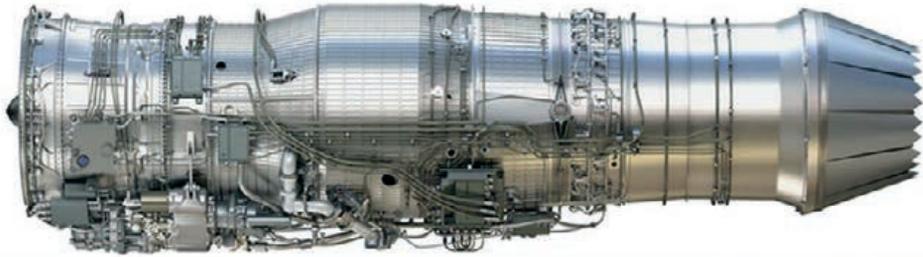


Figura 7. En la parte superior, vista general del motor de ciclo adaptativo de General Electric. En la inferior, detalle de los flujos de aire en modo máxima eficiencia (a) y máximo empuje (b)

ferentes proyectos de desarrollo que apuntan a la introducción de novedades notables.

Las necesidades del próximo avión de caza de nueva generación pasan por alcanzar radios de acción mayores

que los actuales, pero al mismo tiempo necesitará de mayor velocidad y potencia para hacer frente al enemigo



y sus sistemas de defensa. Mayor alcance y permanencia en zona en vuelo subsónico requieren un crucero de gran eficiencia con un bajo consumo de combustible. Sin embargo, generar un elevado empuje durante el vuelo supersónico requiere tanto elevadas temperaturas de funcionamiento como de velocidad de salida de los gases, ningún aspecto de los cuales es bueno para mantener bajo control el consumo de combustible. Hasta el momento, según lo ya expuesto, los motores para aviones de caza actuales se caracterizan por presentar bajos índices de derivación (acompañados de saltos de presiones elevados para el flujo secundario), sacrificando así la posibilidad de mejorar su consumo específico con el objetivo de maximizar el empuje con el mínimo tamaño del motor.

Vista esta situación, la Fuerza Aérea de los Estados Unidos lanzó en 2007 el programa ADVENT (Adaptive Ver-



El caza de 5.º generación, el F-22, es un posible candidato para una futura remotorización

satile Engine Technology Programme), seguido en 2012 por el AETD (Adaptive Engine Technology Development) y desde 2016 por el actualmente en vigor AETP (Adaptive Engine Transition Programme, 1.800 millones de dólares), con el objetivo de pedir a la industria soluciones que pasen por idear un motor capaz de adaptar sus prestaciones de tal manera que, cuando se requiera, pueda funcionar en un modo de gran empuje (despegue, vuelo supersónico, maniobras agresivas, etc.), pero que en vuelo de crucero ofrezca máxima economía de combustible.

Esta nueva clase de sistemas de propulsión se basa en la que se ha venido en llamar tecnología adaptativa de triple flujo. Frente a los tradicionales dos flujos del motor (el de derivación y el principal que atraviesa cámara de combustión y turbomaquinaria) en la nueva arquitectura es posible habilitar un tercer flujo de aire (figura 7). Dependiendo del requisito de potencia necesario es posible modular estos flujos dirigiendo mayor cantidad de aire o bien hacia la derivación (mayor eficiencia propulsiva y menor consumo de combustible para ganar alcance) o bien hacia el núcleo del motor (mayor capacidad de empuje en maniobras de combate). Esta estrategia de modular el flujo de aire permite obtener lo mejor de ambos mundos en un solo motor.

Quemadores de un F-18 a punto para despegar. La imagen muestra la distorsión del aire producida por el calor que desprenden al coger potencia

Esto, junto con la capacidad añadida de modificar el salto de presiones en el *fan* y una operación a temperaturas más altas que sus predecesores, se espera que haga posible que para el año 2020 estén disponibles motores con capacidad para generar 45.000 lb de empuje con un consumo específico al menos un 25% menor que los motores de comienzos de siglo XXI. La Fuerza Aérea confía así en que los fabricantes americanos GE y P&W (actualmente desarrollando los demostradores XA100 y XA101 respectivamente como parte del programa de tecnología adaptativa de la USAF) puedan ofrecer el nuevo motor para el próximo avión de combate o, incluso, para una futura remotorización del F-35.

Y MIENTRAS EN EUROPA...

Y mientras esto sucede al otro lado del Atlántico, por ahora en Europa no se tiene noticia de la existencia de proyectos de semejante calado que estén llamados a suponer una auténtica vuelta de tuerca en la propulsión de la aviación de combate. La industria del viejo continente ha sido un digno ejemplo de capacidad innovadora que, por ahora, no está presente en esta nueva revolución; ahora bien ¿se la espera? Confíemos en que las recientes noticias de la puesta en marcha del proyecto FCAS de nuevo caza europeo –a la espera de las correspondientes partidas presupuestarias– supongan también el lanzamiento de nuevos trabajos de desarrollo para su sistema propulsivo. •