

La tobera vectorial de ITP

JOSÉ ANTONIO MARTINEZ CABEZA
Ingeniero Aeronáutico

Desarrollada a partir de un concepto de SENER, con el motor EJ200 del EF2000 como objetivo primero pero no único, la tobera vectorial de ITP incorpora una serie de innovaciones que la diferencian ventajosamente de otros conceptos existentes. Ellas son el fruto de la experiencia obtenida con el desarrollo de la tobera convergente/divergente del EJ200, responsabilidad de ITP dentro del reparto de actividades acordado en su día a la hora de la fundación de Eurojet.

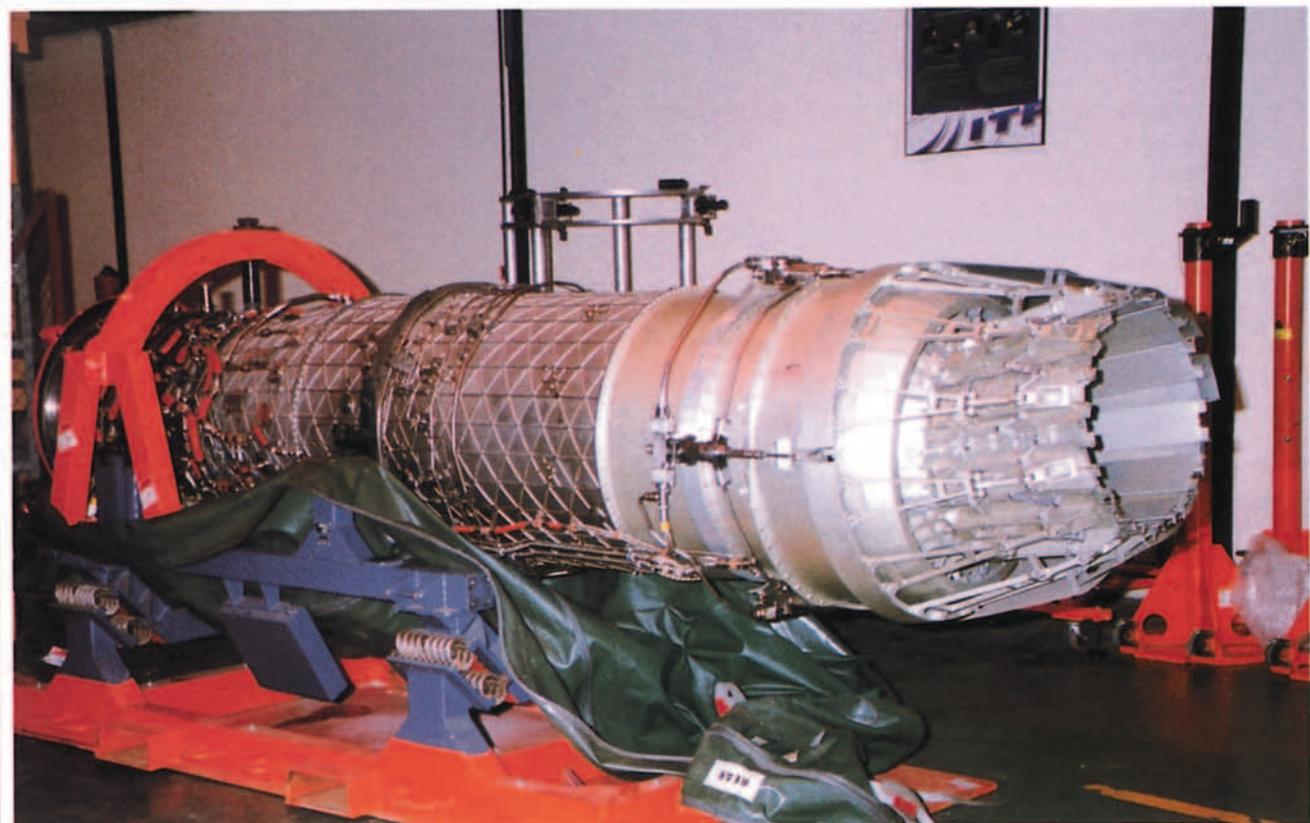


UN POCO DE HISTORIA

René Lorin, oficial de artillería del Ejército de Francia e ingeniero, primero en establecer los fundamentos del estatorreactor allá por 1913, fue también un precursor del concepto del empuje vectorial. En la edición de la publicación *L'Aérophile* correspondiente al 1 de septiembre de 1908 publicó un artículo acerca de un concepto de "aéroplane à grande vitesse", propulsado por dos motores alternativos de explosión situados uno a cada lado del fuselaje, cuyos cilindros tenían como escape una larga tobera de forma cónica. Ambos funcionarían a modo de motores de reacción, con un empuje que sería la resultante del empuje intermitente de cada uno de los escapes. Se ubicarían en una bancada que permitiría bascularlos hacia abajo para despegar más o menos verticalmente. Luego se girarían hasta la posición horizontal para realizar el vuelo convencional.

La tobera vectorial no es una idea reciente en el sentido estricto de la palabra por lo tanto. La primera aplicación relevante del concepto se dio en el Ryan X-13 Vertijet, aeronave cuyo origen se remonta hasta el 24 de abril de 1947. Ese día la U.S. Navy concedió un contrato a Ryan Aeronautical Company para el análisis de factibilidad de un caza VTOL (Vertical Take-Off Landing) embarcado, del cual surgió un año más tarde el concepto monorreactor Ryan Model 38, basado en la deflexión del chorro del motor mediante una tobera adecuada, para cuya evaluación se construyó una célula de ensayos capaz de efectuar vuelos muy cortos, formada por un motor Allison J.33 ubicado en posición vertical dentro de una estructura de tubos. En un principio se manejó por control remoto en vuelo cautivo exclusivamente vertical, pero según avanzó el programa se le fue-

*El Ryan X-13 Vertijet, precursor en el empleo del empuje vectorial. Esta imagen fue tomada el 11 de abril de 1957 cuando estaba convirtiéndose en el primer reactor que llevó a la práctica una operación VTOL completa.
-archivo J. A. Martínez Cabeza-*



La empresa española ITP (Industria de Turbo Propulsores, S.A.) tiene previsto iniciar en estos días los ensayos en el banco de pruebas de Ajalvir de su tobera vectorial montada sobre un motor EJ200. Entre 70 y 100 horas de funcionamiento se acumularán en esta primera fase de lo que es de hecho un programa considerablemente ambicioso.

ron añadiendo elementos de control, grados de libertad y, finalmente, se le dotó con una rudimentaria cabina y un asiento, de manera que el 24 de noviembre de 1953 realizó un primer vuelo libre con Peter Frank Girard a sus mandos. Abandonado prematuramente el programa por la Marina, la USAF había recogido el testigo en agosto de 1953, e incluyó al Model 38 entre los programas "X" tras de intuir en él un interesante futuro. Le asignó el nombre de X-13, le apodó Vertijet y contrató la construcción de una pareja de prototipos.

Los dos X-13 hubieron de ser equipados con sendos turboreactores Rolls-Royce RA.28-49 sin postcombustión, de un empuje máximo de 4.540 kg., ante la falta de motores adecuados en la Unión. Fueron debidamente modificados para operación vertical y se diseñó para ellos una tobera vectorial formada por dos elementos principales que Ryan designó pitch ring y yaw nozzle. El pitch ring (anillo de cabeceo) estaba articulado sobre la estructura fija del motor y

permitía el movimiento de giro alrededor de un eje horizontal perpendicular al plano de simetría; la yaw nozzle (tobera de guiñada) iba articulada a su vez sobre el pitch ring y podía girar alrededor de un eje vertical.

Esa tobera vectorial era una especie de cardán simple pero eficiente, que se movía con un par de actuadores hidráulicos y permitía una vectorización de $\pm 15^\circ$ tanto en cabeceo como en guiñada con una velocidad de 100°/seg. En los extremos del ala había sendas toberas, que usaban aire sangrado del compresor para permitir el control en balanceo durante el vuelo vertical y de transición. Semejante sistema propulsivo estaba integrado en un avión de apariencia bastante convencional, provisto de un ala delta con placas terminales en sus extremos y una deriva de notables dimensiones.

El 11 de abril de 1957 vio al X-13 Vertijet convertirse en el primer avión de reacción que culminó una operación VTOL completa. A los mandos del segundo prototipo, encar-

gado de ese hito histórico, estuvo el propio Peter Frank Girard. El lugar fue la base Edwards. Finalmente el programa se cerró el 30 de septiembre de 1957, después de invertirse en él 9,4 millones de dólares.

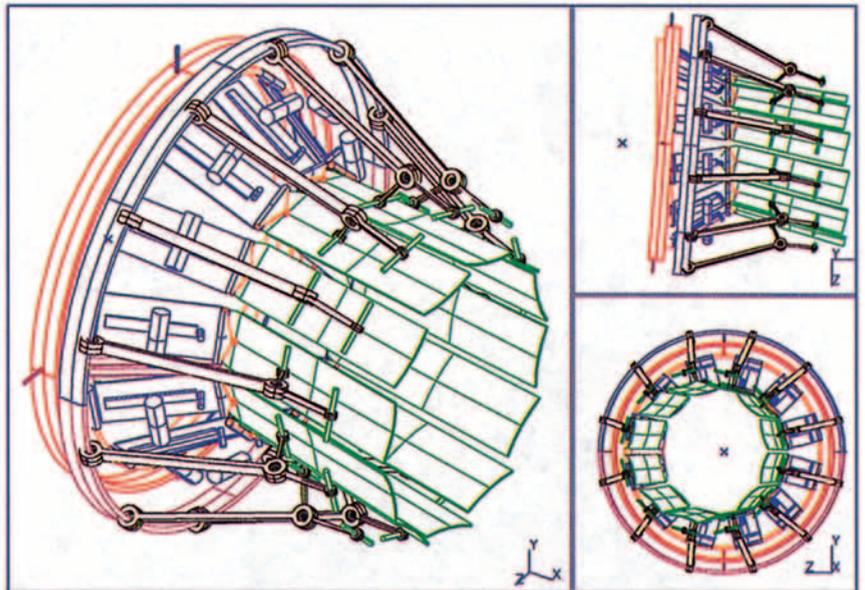
Fue el Hawker Siddeley P.1127, origen de la saga de los Harrier, quien iba a elevar a la categoría de operacional el concepto del empuje vectorial. Paradójicamente nació como consecuencia indirecta de las restricciones presupuestarias impuestas por el Defence White Paper de 1957, que asoló a la industria aeronáutica británica de la época. Hawker Siddeley hubo de acudir a buscar nuevos programas capaces de interesar a la OTAN para mantenerse en la brecha y entendió que podían ir por el camino del avión militar VTOL, sobre el cual existía al final de los 50 un ambiente positivo en los Estados Mayores de la organización. Bristol Siddeley a su vez trabajaba en un motor de toberas vectoriales, que acabaría dando como fruto el BS.53 Pegasus. Tras conversaciones sostenidas con Haw-

ker Siddeley, se llegó a un acuerdo entre ambas firmas, del cual surgió el avión VTOL P.1127.

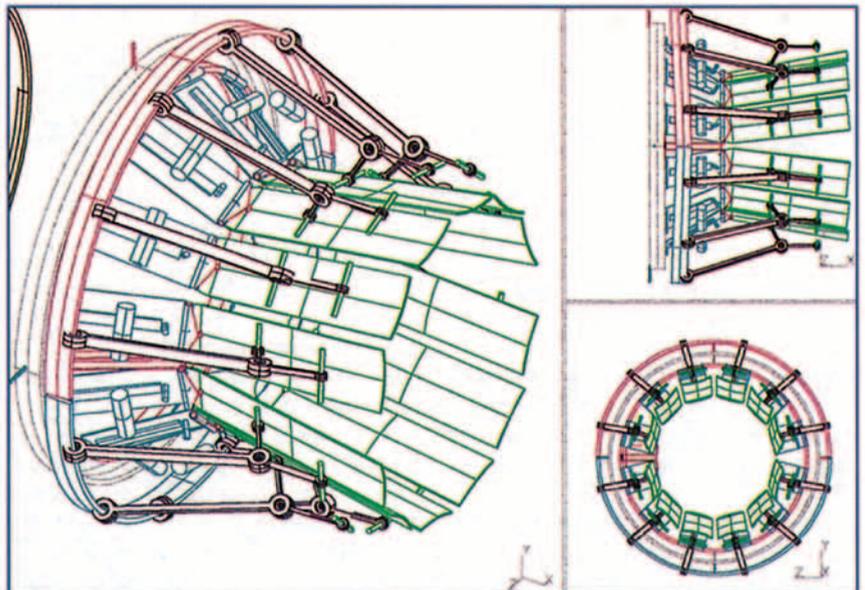
Bristol Siddeley había acudido en 1958 con su programa Pegasus de toberas orientables a la oficina del Mutual Weapons Development Programme de la OTAN, que aceptó en junio de ese año financiar el 75% del desarrollo del motor, pero Hawker Siddeley no tendría la misma suerte, pues el avión propuesto no tenía aplicaciones civiles potenciales, una condición sine qua non para obtener ayuda económica de la organización. Esta última empresa debió invertir sus propios recursos, pero a cambio contó con importantes apoyos en Estados Unidos, en forma de acceso a los laboratorios de ensayos de la NASA y otras facilidades. El 27 de junio de 1960 se contrató oficialmente a Hawker Siddeley la construcción de tres prototipos del P.1127, en los que se llevaba trabajando ya desde tiempo atrás, por lo cual el primer P.1127 hizo su vuelo cautivo inaugural el 21 de octubre de 1960. Vendría después la presentación de una versión supersónica en el programa NBMR.3 de la OTAN, cancelado ulteriormente, y una larga lista de acontecimientos, que desembocaron en el Harrier.

En la antigua Unión Soviética el empuje vectorial llegó de la mano del Yakovlev Yak-36, volado en 1966, un concepto cercano al Harrier, que mostraría el camino, conduciría al actual Yak-38 y, por extensión, al actual y en apariencia abandonado Yak-141 (descrito en RAA nº 634 de junio de 1994, págs. 482 y 483, dentro del artículo: ASTOVL ¿Quién tomará el relevo del Harrier?).

Las aeronaves anteriormente citadas tienen como factor común el hecho de pertenecer al mundo de los aviones VTOL. Pero resulta evidente que el control del vector empuje en los motores de reacción no es patrimonio exclusivo de semejantes aeronaves. Podía tener otras aplicaciones, la más inmediata de las cuales era la reducción de las distancias de despegue, aplicada de hecho en operaciones de los aviones de la familia Harrier. Su prometedor impacto en cuanto a maniobrabilidad y control y su aplicación al vuelo en régimen de



Esquema de la operación de la tobera de ITP en modo vectorización del empuje. -ITP-



Esquema de la operación de la tobera de ITP en ovalización para control del área de salida. -ITP-

postpérdida eran utilizaciones potencialmente interesantes; hacia ese terreno se dirigieron en un momento dado las miras de la industria. El experimental X-31A (ver RAA nº 629 de diciembre de 1993) causó y sigue causando sensación, pero no se debe olvidar que se diseñó y construyó buscando la economía, de manera que su sistema de deflexión del empuje es bastante rudimentario. Sus aletas deflectoras de fibra de carbono fueron realizadas de forma tan econó-

mica como rápida. El chorro del motor General Electric F.404-GE-400 del X-31A puede ser deflectado hasta 10° alrededor de su eje de simetría. Incluso las citadas aletas tienen una segunda finalidad como aerofrenos tras el aterrizaje. Pero un avión de serie no puede emplear un sistema como ese, cuyo rendimiento debe ser bajo.

En octubre de 1984, por los días en que Rockwell -ahora Boeing-, MBB y organismos oficiales de Estados

Unidos y Alemania daban los primeros pasos hacia la colaboración que desembocaría en el X-31A, McDonnell Douglas era contratada por la USAF para que desarrollara el F-15 S/MTD (STOL/Manoeuvring Technology Demonstrator). Este proyecto respondía al deseo de la USAF de investigar acerca de los aviones tácti-

de agosto de 1991. Las toberas vectoriales -que fueron empleadas por vez primera el 23 de marzo de 1990-, permitieron dejar las carreras de aterrizaje en los 416 m. y la rotación en el despegue en tan sólo 36,5 kts. (68 km/h).

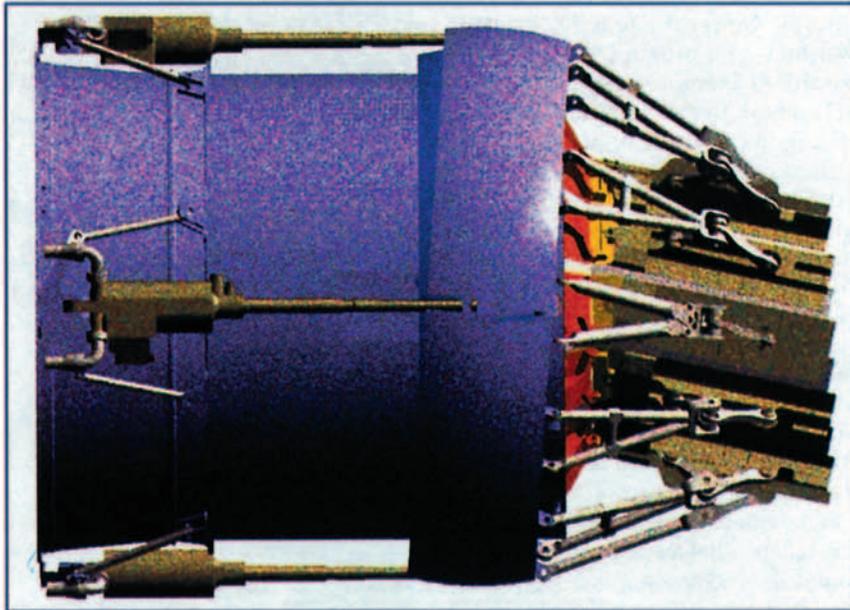
Cubierta esa primera fase de ensayos, el F-15 S/MTD -registrado NA-

objetivo es abordar la nueva fase de ensayos F-15 MANX que tiene como fin último eliminar las derivas.

El Lockheed Martin NF-16D VISTA (Variable stability In-flight Simulator Test Aircraft) se unió también a la experimentación de las toberas vectoriales en 1993. Ese avión se había obtenido en su momento mediante la modificación del F-16 s/n 86-0048, según contrato de la USAF concedido en diciembre de 1988. Poco después recibió un General Electric F.110-GE-129 equipado con la tobera vectorial AVEN (Axisymmetric thrust Vectoring Engine Nozzle) para realizar el programa MATV (Multi-Axis Thrust Vectoring), inaugurado con un vuelo efectuado en Fort Worth el 2 de julio de 1993 y concluido el 15 de marzo de 1994, tras 95 salidas y 135,7 horas de vuelo en las que el NF-16D MATV llegó hasta un ángulo de ataque de 115°. La USAF decidió luego montarle un motor Pratt & Whitney F.100-PW-229 IPE con una tobera vectorial PYBBN. Tras retrasos por razones presupuestarias, el NF-16D MATV volvió al estado de vuelo en mayo de 1997 así equipado.

En Farnborough'96 Sukhoi presentó el entonces llamado Su-37, equipado con dos motores Lyulka Saturn AL-37FU provistos de toberas vectoriales convergentes/divergentes limitadas a una capacidad de vectorización en cabeceo de $\pm 15^\circ$, lo cual fue suficiente para que el avión se convirtiera en una de las estrellas de la exposición. Los aviones Sukhoi Su-30MK adquiridos por la Fuerza Aérea de la India emplean motores AL-31FP con toberas vectoriales derivadas de aquellas. Su sistema de accionamiento utiliza el combustible en vez del sistema hidráulico cual era el caso precedente. La vectorización incrementa el peso del motor en 110 kg. y las toberas tiene una vida de 250 horas, según datos hechos públicos por el fabricante.

La firma rusa Klimov también ha desarrollado una tobera vectorial para el motor RD-33 que emplea el MiG-29. Tiene una deflexión omnidireccional de 15°. Los ensayos en banco han mostrado una pérdida de empuje



Dibujo de ordenador que muestra la tobera vectorial de ITP operando en modo vectorización del empuje. -ITP-

cos capaces de operar en pistas cortas.

De acuerdo con el contrato, McDonnell Douglas modificó el primer prototipo F-15B (s/n 71-0290). Le instaló unos canards con 20° de diédro, capaces de operar simétrica o diferencialmente, un tren de aterrizaje reforzado y un sistema ALG (Automatic Landing Guidance). Así equipado, el F-15 S/MTD voló por vez primera el 7 de septiembre de 1988. Tras 43 vuelos, se montaron en sus motores Pratt & Whitney F.100 unas toberas vectoriales bidimensionales, capaces de deflectar el chorro en cabeceo en un rango de $\pm 20^\circ$, y además provistas de capacidad de reversa en vuelo, para lo cual hubo de adaptarse en lo necesario el sistema de mandos. El primer vuelo del F-15 S/MTD con las nuevas toberas tuvo lugar el 16 de mayo de 1989 y fue posteriormente enviado a Edwards para una fase de ensayos que se extendió hasta el 15

SA 837 y redesignado NF-15B- fue adscrito al programa ACTIVE (Advanced Control Technology for Integrated VEHICLES), llevado a efecto conjuntamente por la NASA, el Wright Laboratory de la USAF, McDonnell Douglas y Pratt & Whitney. El centro de gravedad del nuevo programa fue la incorporación de dos motores Pratt & Whitney F.100-PW-229 IPE provistos de toberas vectoriales axisimétricas de diseño de esa misma compañía tipo PYBBN (Pitch/Yaw Balanced-Beam Nozzle). La citada tobera tiene 20° de capacidad de vectorización omnidireccional, equivalente a una componente transversal del empuje de hasta 4.000 lb. (1.814 kg.) para máxima postcombustión.

El NF-15B comenzó a volar en febrero de 1996. El 24 de abril siguiente alcanzó Mach 1,2 y el 31 de octubre empleó la vectorización a una velocidad de Mach 1,95. Ahora el

en vectorización máxima de un 5%, según datos del fabricante.

El propio F-22 Raptor tiene sus motores Pratt & Whitney F.119-PW-100 provistos de toberas basadas en el concepto SCFN (Spherical Convergent Flap Nozzle), que al parecer pueden proporcionar $\pm 20^\circ$ de vectorización en cabeceo y bajas firmas radar e infrarroja. Algunas fuentes aseguran que en algún momento podrían incorporar además reversa y vectorización en guiñada, pero todo ello pertenece al terreno del secreto y debe tomarse con las pertinentes reservas. Mientras tanto, el Israel Institute of Technology ensaya en Haifa desde 1997 maquetas a escala reducida del F-15 y el F-16 equipadas con un concepto propio designado TVC (Thrust Vector Control).

ITP, UN PASO MAS

En los últimos años se ha acentuado el interés por las diversas aplicaciones del empuje vectorial, al cual no es precisamente ajeno el advenimiento del X-31A. Y ello no es sólo por razones de maniobrabilidad en combate, argumento sobre cuyo interés existe un importante debate en la actualidad. Ya hemos citado la reducción de longitudes de pista -interesante para el caso de las operaciones en portaaviones- como un argumento, pero también la vectorización ofrece excelentes posibilidades en el terreno de la reducción de resistencia aerodinámica en vuelo supersónico e incluso puede aportar un incremento de empuje al motor. La irrupción de los conceptos UCAV y la certeza de que por sus características precisarán emplear empuje vectorial (ver en RAA nº 673 de mayo de 1998 el artículo: La moda se llama UCAV), parece garantizar que esa atención prestada al empuje vectorial ira creciendo en los próximos años.

Dejando a un lado el caso particular del X-31A cuya tobera, como dijimos, responde a un diseño no utilizable en un avión operacional, el breve repaso histórico que acabamos de efectuar muestra como el F-15 S/MTD inició su andadura empleando una tobera bidimensional. Lo que con él se buscaba durante su primera

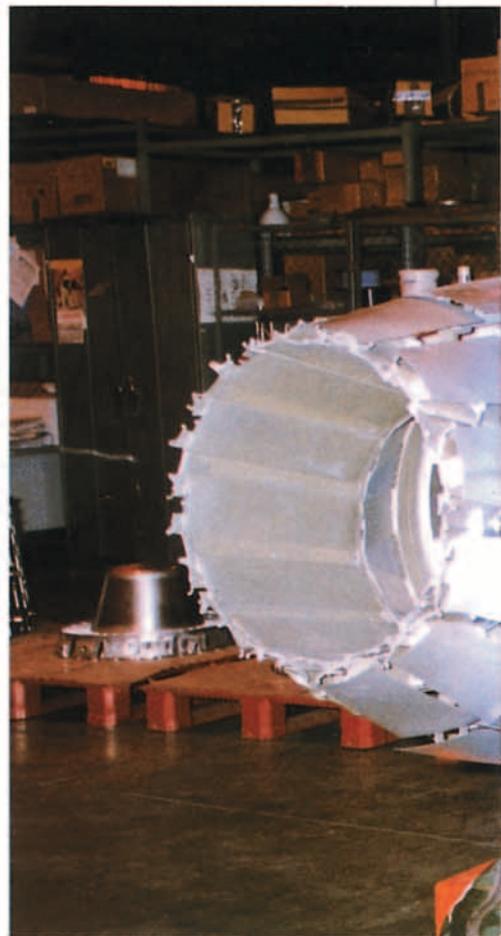
fase experimental precisaba sólo vectorización en cabeceo. Es más, antes de poner a punto el motor AL-37FU del Su-37, Lyulka Saturn desarrolló una tobera experimental bidimensional con una capacidad de cabeceo de $\pm 15^\circ$, que fue volada en los dos motores del Sukhoi Su-27LL-PS desde el 21 de marzo de 1989, muy probablemente con objetivos similares a los del F-15 S/MTD. Pero tras esa fase inicial, General Electric, Pratt & Whitney y la propia Lyulka Saturn pasaron a examinar la vectorización del empuje en todas direcciones, algo tal vez más complejo, pero no necesariamente más pesado.

La tobera AVEN de General Electric emplea un sistema de dos anillos independientes, uno de los cuales controla la deflexión del chorro del motor y el otro el área de la garganta. La deflexión se actúa desde un anillo móvil conectado a los pétalos maestros de la zona divergente mediante bielas articuladas en cada uno de ellos. Tanto ese anillo como el sistema de control del área de la garganta son movidos por actuadores hidráulicos independientes. La velocidad nominal de vectorización de la tobera AVEN es de $60^\circ/\text{seg.}$ y la capacidad de vectorización omnidireccional es de 20° .

Pratt & Whitney indica que su concepto PYBBN permite una velocidad de vectorización de $120^\circ/\text{seg.}$ con un diseño de actuadores que reduce las fuerzas a aplicar para el movimiento del sistema y consecuentemente significa menor peso estructural. Mantiene como se ha dicho antes los 20° de vectorización omnidireccional.

La tobera vectorial definida por ITP supone un avance con respecto a esos conceptos precedentes. Es un paso adelante más. Puede controlar de forma separada el área de garganta, el área de salida, la vectorización en cabeceo y la vectorización en guiñada, es decir, cuatro parámetros. Se basa en el empleo de tres anillos, interior, intermedio y exterior. El anillo intermedio va articulado para vectorización en guiñada sobre el anillo interior y sobre el anillo intermedio se articula para vectorización en cabeceo el anillo exterior. El anillo exterior va conectado a los pétalos maestros de la zona di-

vergente de la tobera y la vectorización se obtiene precisamente con ellos. Como es sabido, se puede obtener cualquier dirección de vectorización combinando componentes de cabeceo y de guiñada. Opcionalmente el anillo exterior puede ser partido, caso en el cual controla de forma independiente el área de salida, ovalizándola al "separarse en dos mitades".



La tobera vectorial de ITP tiene únicamente tres actuadores hidráulicos. Si se añade la opción de anillo partido hay que adicionar simplemente un cuarto actuador. En otras palabras, hay un actuador hidráulico por cada grado de libertad de la tobera. El conjunto presenta pues una repercusión beneficiosa en peso y coste, además del ahorro procedente de una menor necesidad de energía hidráulica. Por el momento la tobera vectorial de ITP tiene una capacidad de vectorización omnidireccional de 20° , que podrá ascender en el futuro

hasta los 35° según estudios realizados por ITP. La velocidad máxima de deflexión es de 60°/seg., pero podrá ser superior.

ITP indica que su diseño de tobera vectorial es más ligero que el de sus "competidores". De acuerdo con sus estudios, puede incrementar en un 2% el empuje del motor EJ200 en régimen de vuelo subsónico y

entrada ha hecho necesario modificar el banco de pruebas, para hacer frente a las sollicitaciones mecánicas y térmicas impuestas por el impacto del chorro contra sus paredes, lo cual se ha conseguido incorporándole un sistema de refrigeración por agua.

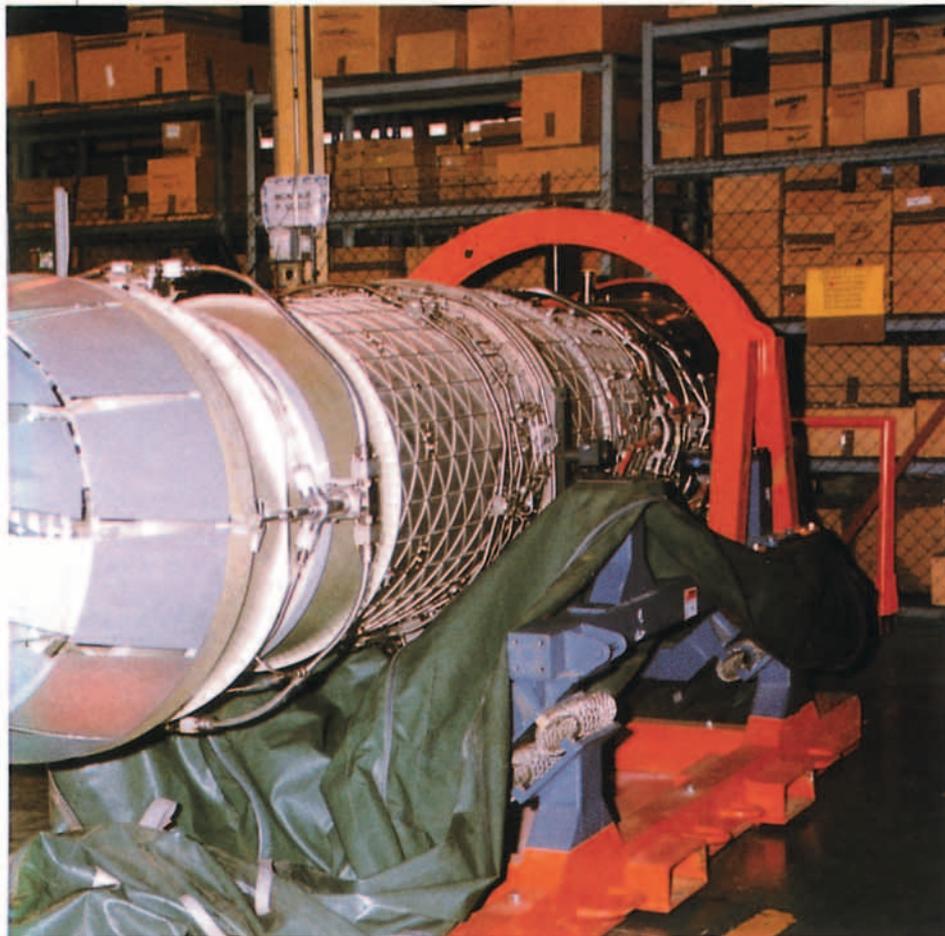
El objetivo principal del programa en su primera fase de ensayos, no

Avio, pero en el programa de la tobera vectorial ITP se ha hecho cargo de esos equipos. De hecho la empresa española CESA realiza los actuadores y las servoválvulas bajo contrato de ITP.

Una vez concluida la fase de ensayos en banco de pruebas de la tobera vectorial prototipo, deberá abordarse una fase de experimentación en vuelo. En este apartado se examinan diferentes posibilidades. Se decía al principio que el EF2000 es el primer objetivo natural de ITP, pero existen otras opciones.

En el curso de la reciente exposición aeronáutica de Berlín, Eurojet hizo saber que estaba proponiendo a FMV, agencia responsable del programa de demostración sueco de tecnología (vectorización y remotización del Gripen JAS39C), a través de Volvo Aero, una versión del EJ200, designada EJ230, de 23.000 lb. (10.433 kg.) de empuje, equipada con la tobera vectorial de ITP y con un sistema electrónico de control de esta última diseñado por MTU. Se supo también en el mismo foro que Daimler-Benz Aerospace e ITP sostienen conversaciones con los responsables del programa X-31A de cara a emplear la tobera vectorial de esta última en la nueva fase de ensayos prevista, denominada X-31 VECTOR y cuyo lanzamiento se espera para finales de este año, que debe culminar con la supresión de la deriva de ese avión experimental. El X-31 VECTOR, financiado por tres países, Estados Unidos, Alemania y Suecia actualmente, podría ensayar, además de una tobera vectorial de General Electric, el sistema de ITP si las negociaciones llegan a buen término. El programa X-31 VECTOR incluirá como industrias de los países antes citados a General Electric, Boeing, Daimler-Benz Aerospace, MTU, Saab, Volvo y eventualmente a ITP, entre otras.

Los próximos meses deberán confirmar las posibilidades que atesora el concepto de tobera vectorial diseñado por ITP y mostrarán cuál es el avión sobre el que se llevará a efecto el programa de ensayos en vuelo destinado a validarla. ■



Otra vista de la tobera montada sobre un EJ200. -ITP-

hasta el 7% en crucero supersónico típico. También presenta la posibilidad de reducir la resistencia aerodinámica del avión gracias al acoplamiento de su forma a la del fuselaje posterior.

EXPECTATIVAS DE FUTURO

El programa de ensayos de la tobera vectorial de ITP presenta diversas vertientes tecnológicas. De

puede ser otro que demostrar la viabilidad del concepto, y en él se incluyen cuestiones tan importantes como es evaluar la integridad del diseño de tobera en los apartados de sollicitaciones mecánicas, temperatura, vibración y rendimiento. Es indudable que el programa de la tobera vectorial servirá para aumentar el conocimiento tecnológico de ITP, ya que va a introducirla en terrenos inéditos. Por ejemplo, en el motor EJ200 estándar los elementos hidráulicos y los actuadores de la tobera son responsabilidad de Fiat-