

Futuros requisitos para motores de aviación militar

JOSE CORUGEDO,
Capitán Ingeniero Aeronáutico

HAN pasado 80 años desde el primer vuelo del hombre y más de 40 desde que voló supersónico. En los últimos 40 años la velocidad de las aeronaves sólo ha aumentado de Mach 1 a Mach 2, con algunas excepciones notables (SR-71 capaz de Mach 3 y el X-15 propulsado por cohetes que alcanzó velocidades próximas al Mach 6). En general, sin embargo, ha costado 80 años pasar de Mach 0 a Mach 2 (ver figura 1), y ahora se pretende llegar a Mach 25 con motores de ingestión de aire.

En los inicios de la aeronáutica las estructuras eran el factor condicionante, pues el objetivo principal sólo era el volar y había que depurar las formas así como la limpieza aerodinámica. El requisito de mayores velocidades durante las Guerras Mundiales hizo notoria la necesidad de desarrollar sistemas de propulsión más potentes y eficaces, lo que culminó con el advenimiento de los reactores. Los desarrollos posteriores de los reactores no han sido tan sustanciales para la aviación militar como lo ha sido la aparición de sistemas de aviónica, sensores y armamento avanzados, y finalmente digitales. Ello ha dejado un poco en penumbra las metas perseguidas por la comunidad de la propulsión. Este artículo pretende resaltar algunas tendencias significativas de la propulsión aeronáutica de alto empuje y alta velocidad, que se materializarán en los requisitos futuros. No se tratan los detalles técnicos en profundidad por estar fuera del alcance del artículo.

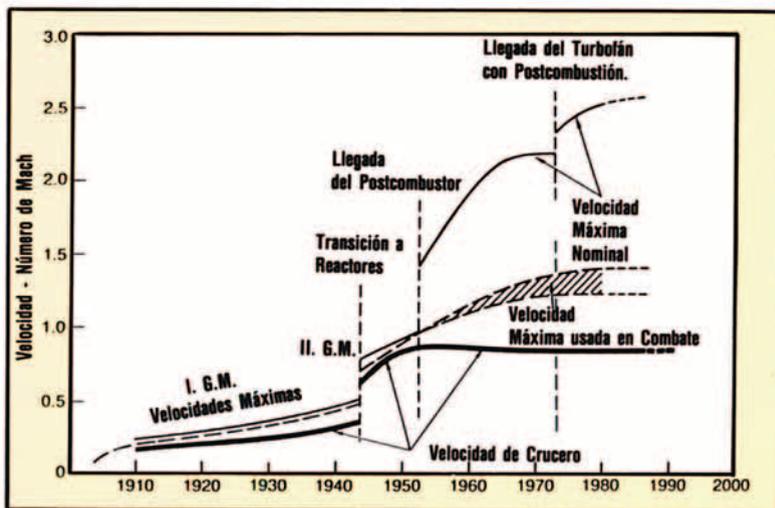
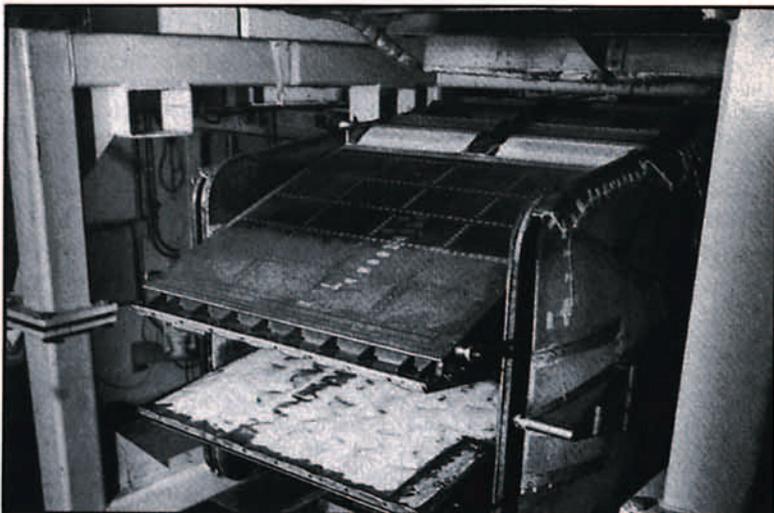


Figura 1.— Evolución de las Velocidades de Aviones de Caza

AGILIDAD Y EMPUJE VECTORIAL

EN el último Salón Aeronáutico de Le Bourget, París, el Su-27, interceptor de largo alcance, realizó una maniobra llamada "Cobra de Pougachev", demostrando su capacidad de vuelo controlado a ángulos de ataque muy por encima de aquellos que pueden ser alcanzados por los aviones de combate occidentales contemporáneos. El avión se encabrita desde vuelo a nivel hasta unos 110-120 grados, cuando el morro del avión pasa ampliamente la vertical, continuando momentáneamente el vuelo con la cola por delante, y volviendo a picar el morro a nivel con una pérdida significativa de velocidad (desde 250



La tobera bidimensional de STOL/Demostrador de Tecnología de Maniobra en su configuración de máxima reversa.

hasta 70-80 nudos) pero sin pérdida o ganancia significativa de altura. El Su-27 está propulsado por dos turbofanos Lyulka AL-31F, de 27.000 lbs de empuje cada uno, con un peso de avión normal operativo de 48.400 lbs (1.1:1 relación empuje/peso) y una velocidad máxima de 2.35 Mach.

La maniobra puede tener un interés táctico en cuanto al factor sorpresa del enemigo (último gestor del sistema de armas oponente), disminuir la velocidad radial respecto al enemigo (y por tanto su retorno Doppler, que se podría mezclar con el "clutter" del terreno o aparentar ser un retorno "chaff" para la lógica del radar), o simplemente forzar la pérdida momentánea del "track" en los estimadores de los sensores oponentes. Desde el punto de vista ofensivo la maniobra tiene un gran valor, cuando todo el armamento Aire-Aire del avión realizando la maniobra pueda ser disparado a cualquier ángulo de ataque (armamento point-and-shoot).

Todo ello es una muestra de agilidad, compuesta de maniobrabilidad (virajes máximos y aceleraciones) y controlabilidad (rapidez y precisión en la transición de un estado a otro), que finalmente se traduce en una capacidad de supervivencia mayor en el combate.

Pero, ¿toda la agilidad se consigue con las superficies de control aerodinámicas? No, los motores también hacen su aportación a la agilidad. Esta se materializa en aviones VSTOL mediante toberas direccionables de empuje y estabilizadoras (Harrier). Asimismo también aparecen las toberas bidimensionales con empuje vectorial y capacidad de reversa. El programa actual más ambicioso en este área es el F-15 STOL/Maneuvering Technology Demonstrator, en el que las toberas "2D TV/TR" (Two-Dimensional Thrust Vectoring and Reversing) son, con mucho, el mayor reto tecnológico del programa. Algunos estudios previos a este programa ya indicaron que el empuje vectorial se integraba más fácilmente con toberas bidimensionales que axilsimétricas. El empuje vectorial no sólo aumenta la agilidad, sino que disminuye drásticamente los requisitos de despegue y aterrizaje, como lo demuestra los requisitos de actuaciones de despegue y aterrizaje esperados del programa:

- Operación en pistas de 300 pies de ancho por 1.500 de largo.
- Despegue con máximo combustible interno y 6.000 lbs en cargas externas.
- Operación con ráfagas de 30 nudos de viento cruzado.
- Operación en superficies de pistas resbaladizas.
- Operación sobre cráteres (simulados) de bomba reparados.
- Mantener las características básicas de diseño.

Todo ello es un aspecto clave de la estrategia de los conflictos futuros, por la capacidad de mantener una tasa de salidas efectiva desde las bases de operación.

Todo lo anterior se pretende conseguir con la tobera 2D producida por Pratt and Withney, que tiene tres modos principales de operación: convencional, vectorial y aproximación/reversa. El modo convencional es esencialmente el mismo que el de la tobera axilsimétrica a la que reemplaza, con la excepción de que la tobera 2D tiene mayor capacidad de controlar la relación de expansión, y por consecuencia una mayor eficiencia propulsiva. El modo vectorial permite la deflexión del vector empuje por lo menos hasta 20 grados a todos los regímenes de potencia. El máximo ángulo alcanzable es función de la presión dinámica, estando limitado a un máximo de 6.000 lbs de fuerza normal o transversal por tobera.

El modo de aproximación/reversa sólo está disponible sin postquemador y da un máximo del 67% del empuje MIL (máximo sin postcombustión), hacia delante o en reversa. La dirección de este vector empuje se controla con las aletas de deflexión superiores e inferiores que giran hasta 135 grados desde su posición neutra. De esta manera, en el modo de aproximación/reversa, la posición de las aletas puede resultar en un empuje frontal. Esta configuración sólo se utiliza en aproximaciones y aterrizajes STOL.

Para alcanzar la mínima distancia de parada, los motores operan a MIL rpm con la tobera en el modo de aproximación/reversa, mientras que las aletas se modulan entre 45 y 135 grados para generar suficiente empuje frontal para mantener la velocidad requerida. Al contacto con pista, las aletas giran hasta su posición de máxima reversa, mientras que las aletas superiores giran a su máxima deflexión las inferiores se programan con la velocidad para evitar la reingestión de los gases de escape.

La U.S. Navy, a su vez, ha ensayado el concepto de aletas de guiñada en un F-14A modificado a tal efecto (figura 2) en el F-14 Yaw Vane Technology Demonstration Program. Los ensayos en túnel habían demostrado que la aleta debía estar situada en la periferia del flujo de tobera (en vez de en el flujo) para garantizar la máxima efectividad de viraje, así como que podrían ser alcanzados ángulos de desviación del empuje significativos con aletas relativamente pequeñas en comparación con el diámetro del motor. Los resultados de este programa han sido satisfactorios, y se espera que se integren en programas tales como el NASA HARV (High Angle-of-Attack Research Vehicle) y el DARPA X-31 Enhanced Fighter Maneuverability Program.

El empuje vectorial, reversa en vuelo y maniobras postpérdida (ayudadas por la planta motriz) son conceptos que proporcionan ventajas en la maniobrabilidad del caza, y que han sido demostrados mediante análisis, simulación y ensayos en vuelo.

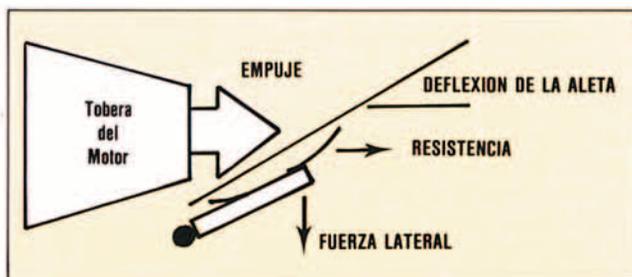


Figura 2.— Aleta de Guiñada en el F-14A.

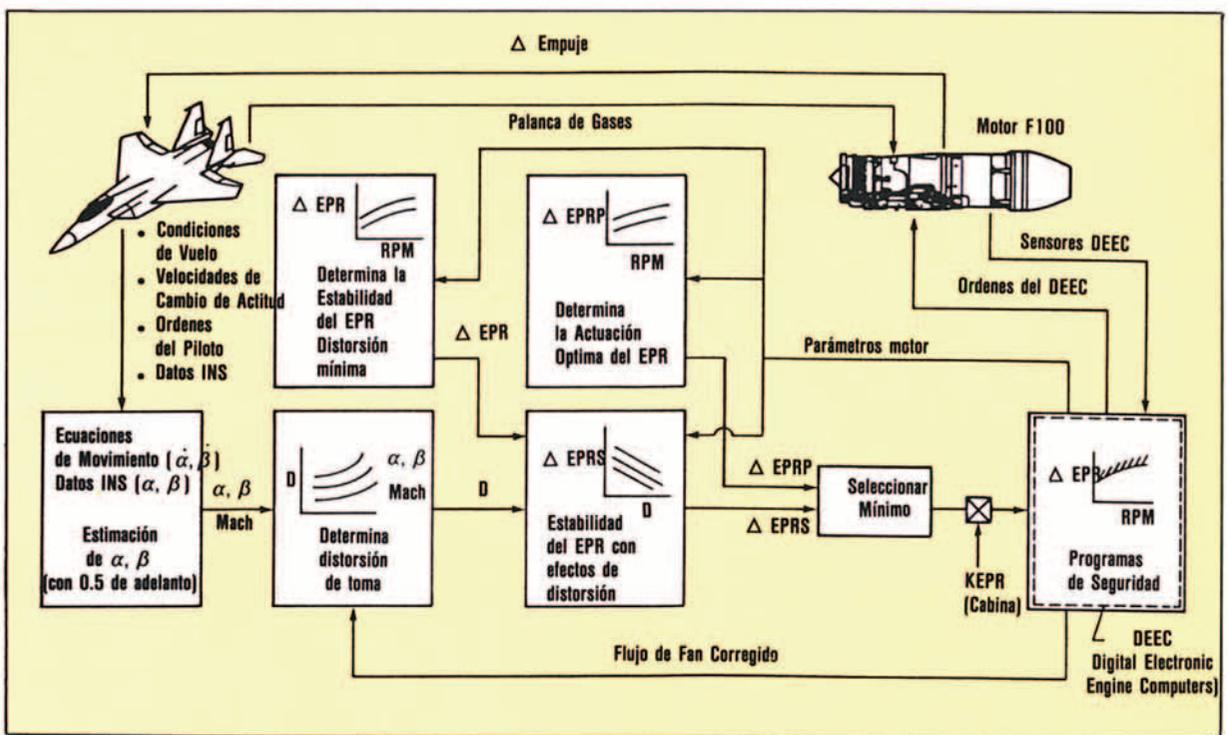


Figura 3.—Cálculos realizados Sistema de Control de Motor Adaptativo HIDEDEC dentro de los Ordenadores Digitales del Sistema de Control de Vuelo.

INTEGRACION DEL SISTEMA DE PROPULSION

EL HIDEC (Highly Integrated Digital Electronic Control) es un programa de ensayos en vuelo dirigido por NASA para desarrollar una estructura, sistema de propulsión y sistema de control de vuelo totalmente integrados. Junto con otros programas de ensayos, el ADECS (Adaptive Engine Control System), que se ha ensayado el año anterior, es un programa de tecnología intermedia para alcanzar la meta de un avión con los tres sistemas anteriores totalmente integrados.

En la tecnología actual de los aviones de altas características, los motores están compensados para evitar las pérdidas de compresor y otras condiciones anormales (surge, remanso, etc.). Cada motor opera como un subsistema separado del avión (este es también el caso del F/A-18). Cada motor debe ser compensado para operar normalmente asumiendo las distorsiones de las tomas que resulten de considerar las peores combinaciones de maniobras del avión y condiciones de vuelo. Esto se traduce en una operación del motor conservativa que puede reducir sustancialmente el empuje producido por el motor en otras condiciones más favorables y, por lo tanto, reducir las actuaciones generales del avión.

Mediante la integración del sistema de control del motor con otros sistemas del avión es posible modificar los programas de operación del motor para obtener un aumento de empuje del motor en la mayor parte de la envolvente de operación de vuelo, manteniendo aquellos márgenes de pérdida adecuados para prevenir la operación anormal del motor en aquellas condiciones cercanas a la posible pérdida del motor (la figura 3 muestra un diagrama de bloques típico de esta integración). El F-15 ADECS ha demostrado mejoras de las actuaciones significativas mediante esta integración, manteniendo la operación libre (sin restricciones) del motor en toda la envolvente del avión y de maniobra sin ninguna penalización en peso.

Este proceso de integración dotará los motores de un mayor número de sensores que puedan comunicar su información relevante a través de los diferentes buses de datos digitales. Además reducirá la carga de trabajo al reducir las limitaciones de operación de la siguiente manera: el sistema de mandos de vuelo/propulsión integrará todos los aspectos funcionales de control de vuelo, motor y tobera en un sistema "transparente" al piloto. Este, más que ajustar la velocidad y posición de cada control aerodinámico individualmente, por ejemplo, podría simplemente controlar la trayectoria. El ordenador de control de vuelo (FCS) analizaría y sintetizaría todos los datos de entrada, así como el estado actual, mandaría órdenes a las superficies de control y sistemas de propulsión (incluida la tobera), y ajustaría el ángulo de ataque y trayectoria, controlando las interacciones del motor, y optimizándolas para las diferentes misiones y fases de las misiones (diferentes modos o programas del motor); un grado de integración sin precedentes en el mundo operativo.

El concepto de integración se puede extrapolar a otros sistemas como las contramedidas electrónicas y otras ayudas (chaff, flare ...) con objeto de reducir o modificar deliberadamente la firma infrarroja y radar de toberas y rotores para engañar a los sistemas de reconocimiento de blancos de los adversarios.

VUELO SUPERSONICO

NASA está investigando aviones comerciales de alta velocidad (HSCT, High Speed Civil Transport) en su Centro de Investigación de Langley, que se centran en vehículos con queroseno como combustible que utilizarían los aeropuertos existentes y operarían a Mach 2.0-2.4. Los estudios han encontrado que tal avión sería económicamente viable entre los años 2000 y 2010, pero rechazaron de antemano los aviones de Mach 4 y superior, porque el aislamiento térmico requerido resultaría en un peso excesivo.

En el campo de los cazas la razón para diseñar un avión supersónico es la incapacidad general de los cazas actuales para demostrar movilidad supersónica en el campo de batalla. Movilidad supersónica, o supercrucero se define como la capacidad de generar rápidamente velocidades supersónicas y mantenerse a dichas velocidades.

Revisando la figura 1, aquellos aviones capaces de Mach 2.0, raramente utilizan velocidades por encima del transónico para el combate, y cuanto más lejos se encuentra el avión de su base de operación menor es esta velocidad. En Vietnam se utilizaron 5 aviones de Mach 2.2 (F-104, F-105, F-106, F-4 y F-111), cuyas velocidades de combate eran generalmente por debajo de Mach 1.2.

Al igual que los transportes, una velocidad realista para los cazas actuales es de Mach 2.5, pero un 99% del total del vuelo se realiza por debajo de Mach 1.1, y un 99.7% por debajo de 1.2 (de acuerdo con los archivos de utilización de aviones de la USAF). Así, a pesar de las velocidades máximas proclamadas por los fabricantes, el dominio entre 1.3 y 2.5 Mach es terreno perdido. ¿Por qué? Porque los cazas subsónicos experimentan una reducción acusada de su permanencia y alcance al incrementar el número de Mach.

El reto es, pues, diseñar motores de altas características que sean capaces de volar y permanecer en el espectro de velocidades desde Mach 0.2 hasta 2.0 para su integración en el SCF (Supersonic Cruise Fighter).

En interceptaciones el SCF posee ventajas en las aproximaciones por el hemisferio trasero, en las que su persistencia a velocidades supersónicas le capacita para atacar varios blancos en la batalla. También permite lanzar el armamento en su mejor ángulo y controlar eficazmente la velocidad de aproximación a los blancos (subsónicos). La posibilidad de realizar las interceptaciones de cola favorece grandemente la baja observabilidad. Asimismo, en el ataque de otro caza subsónico por el hemisferio trasero del SCF, el primero caería pronto fuera del campo de batalla. Con estas mejoras ofensivas y defensivas se aumenta la supervivencia, así como el "kill ratio". Por último, el encuentro frontal no favorecería inicialmente a ninguno de los pilotos. La capacidad de interceptación también se ve mejorada, ya que una vez detectadas las fuerzas enemigas éstas serán interceptadas y anuladas antes, cuando todavía no hayan alcanzado los puntos letales del territorio defendido; por el contrario, la capacidad de penetrar e infringir daños más adentro del territorio enemigo, es más elevada, aún habiendo sido detectado.

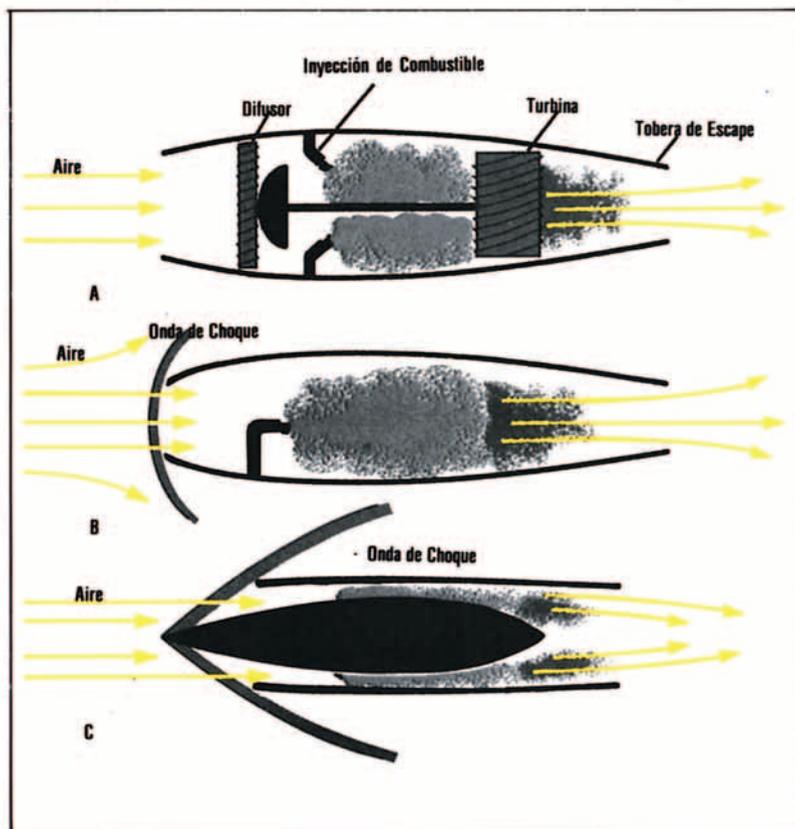


Figura 4.— Un turborreactor típico (A) ingiere aire (amarillo) que se decelera y después comprime. El combustible se inyecta y la mezcla comprimida (gris) arde, enviando un chorro de gases calientes por detrás. Los turborreactores operan hasta velocidades de Mach 3. Aunque sólo funciona a velocidades supersónicas, el diseño más simple posible para un motor reactor es el ramjet (B), en el que el aire es comprimido con la presión dinámica (ram). En los ramjets convencionales, la combustión se realiza a velocidades subsónicas, con el aire que se ha decelerado en la onda de choque formada en la entrada del motor. El producto de la combustión se mueve hacia la salida a medida que la velocidad crece, canalizando el empuje hacia atrás. Estos ramjets operan desde Mach 1 a Mach 6, pero sólo son eficientes a partir de Mach 2. Un ramjet de combustión supersónico, o scramjet (C), opera de la misma manera, pero el aire fluye a través del motor supersónicamente, reduciendo el incremento de temperatura asociado con la deceleración del aire a la entrada. Los scramjets queman hidrógeno, el único combustible que arde suficientemente rápido en flujo supersónico, y operan eficazmente de Mach 5 en adelante.

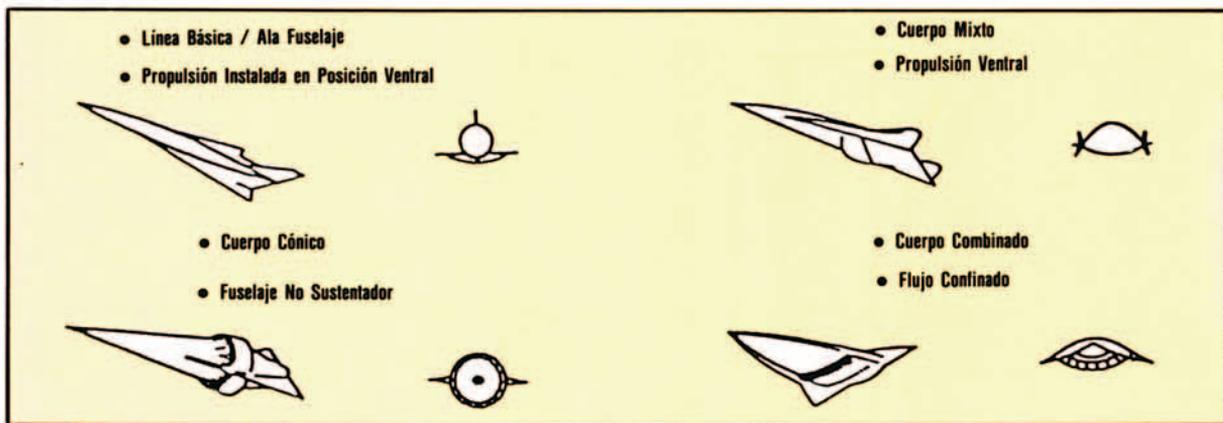


Figura 5.— Configuraciones típicas del NASP.

VUELO HIPERSONICO

EN septiembre de 1988 se celebró la Primera Conferencia Internacional sobre Vuelo Hipersónico en el siglo XXI, con el Departamento de Estudios Espaciales de la Universidad de North Dakota como anfitrión. Más de 250 personas de 11 nacionalidades asistieron a este evento de 4 días, indicando la importancia creciente que concede la comunidad internacional a este salto revolucionario en la capacidad de transporte de la humanidad. Por muchos años, algunos visionarios han soñado con el día que sería posible construir un vehículo que pudiera operar en regímenes atmosféricos así como espaciales. Ahora es evidente que este sueño se hará realidad en la próxima década.

Siete son las naciones que participan activamente en la investigación de temas relacionados con el vuelo hipersónico: U.S., Inglaterra, Alemania, Japón, Rusia, China y Francia.

Los programas NASP (National AeroSpace Plane) de los EE.UU. y el británico HOTOL (Horizontal Take-Off and Landing) son los más avanzados, que podrían volar en el año 1996. Ambos son vehículos SSTO (Single-Stage-To-Orbit), dirección que también toman los japoneses. Los alemanes, sin embargo, han diseñado un vehículo de dos etapas (Sanger-Horus o Sanger-Cargus).

Las actividades soviéticas no son totalmente conocidas, aunque sus ensayos de un motor de combustible hidrógeno en un Tu-155, el último año, es una indicación de que ya están ensayando alguna de las tecnologías requeridas.

Todo este esfuerzo se realizará bajo unas restricciones ambientales (ruido y contaminación) muy exigentes, lo que supondrá problemas adicionales en las áreas legales, de utilización del espacio, políticos y económicos. Pero su mayor ventaja será la reducción del coste del acceso al espacio por un factor de 10 o más. Ya se habla de costes de 100 \$/lb o menor.

La meta a conseguir es un avión de despegue y aterrizaje horizontal que utilice aeropuertos convencionales, acelere a velocidades hipersónicas, alcance órbita en una o dos etapas, entregue su carga útil en el espacio, y vuelva a Tierra con capacidad propulsiva, todo ello con la operatividad, flexibilidad, mantenibilidad y economía de los aviones convencionales.

Estos aviones alcanzarán números de Mach de 25, ocho veces más rápido que el máximo alcanzado en aviones propulsados con ingestión de aire. Se utilizarán motores RAMJET (un reactor muy simple que opera a velocidades supersónicas sin ninguna maquinaria para comprimir el aire que entra al motor, sino que lo comprime a altas presiones mediante la presión dinámica o presión ram) y

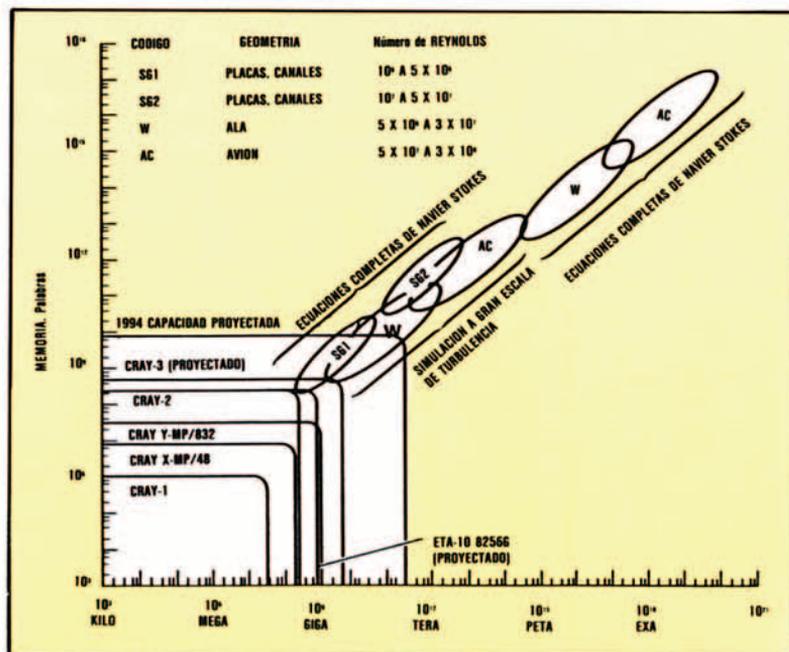


Figura 6.— Requisitos de velocidad y memoria de ordenador para la investigación, comparadas con las capacidades de varias máquinas; 200 horas de proceso con algoritmos de 1988.

SCRAMJET (un ramjet que no necesita decelerar el aire que penetra en él por debajo de la velocidad del sonido, sino que realiza el ciclo de trabajo, compresión/mezcla de combustible y combustión, a velocidades supersónicas. Los scramjets sólo se encuentran en etapas de desarrollo y ensayos en tierra) (figura 4) que utilizarán el oxígeno de la atmósfera como oxidante e hidrógeno como combustible (lo que presenta problemas en el reabastecimiento, almacenamiento y gestión de combustible). Tanto ramjets como scramjets deben ser complementados por otro método propulsivo por debajo de Mach 3 (p. ej.: un turboramjet, o motor turbina opera hasta Mach 3, dejando paso a los ramjets por encima de esta velocidad).

También aquí se presenta el problema de la integración del motor con el resto de la aviónica, y con la misma estructura de la aeronave en su parte baja, que en este caso se utiliza como compresor y difusor o tobera, dando como resultado algunas de las configuraciones propuestas para el NASP y representadas en la figura 5.

De las 5 áreas de mayor riesgo tecnológico (motores, materiales, aerodinámica, integración de la estructura/propulsión y subsistemas), la propulsión es la que recibe la mayor atención, y la que proporciona el empuje requerido durante la mayor parte del vuelo comprendido entre despegue y órbita y posterior recuperación.

Tabla I		
AREAS DE INVESTIGACION EN PROPULSION HIPERSONICA		
(PROGRAMA NASP)		
<i>Tecnología</i>	<i>Reto</i>	<i>Estado Actual</i>
Ramjet	Los diseños actuales no producen empuje a velocidades subsónicas.	Investigación clasificada llevada a cabo sobre el concepto ramjet produciendo empuje positivo por debajo de Mach 1.
Ramjet de Combustión Hipersónica	No está claro si el motor puede llevar la aeronave a órbita o se necesitarán cohetes; el único combustible que quema a velocidades supersónicas es el hidrógeno. Scramjets nunca han sido ensayados por encima de Mach 8.	Primer prototipo de motor del NASP disponible en este año. Algunos componentes (cámara de combustión) ya han sido ensayados.
Combustible: Hidrógeno Líquido	Debe ser almacenado a temperaturas muy bajas (por debajo de -200°C); no existen instalaciones para abastecimiento; requiere 4 veces el volumen de almacenamiento del queroseno, complicando el diseño.	Primeros estudios de viabilidad comenzados; el concepto hace uso de convertir el gas natural en hidrógeno para ser cargado directamente en los aviones.

Como actualmente no existen instalaciones a escala de ensayos de propulsión por encima de Mach 8, el diseño y operación de tales motores se hará en "túneles aerodinámicos numéricos" basados en modelos de simulación que harán uso de los supercomputers y CFD (Computational Fluid Dynamics).

Así, el régimen de vuelo de los "aviones espaciales" no ha podido ser examinado extensamente ni mediante análisis, ni experimentación en tierra, ni ensayos en vuelo. Ya que los primeros aviones espaciales serán los que se adentren por primera vez en este régimen, se concentran muchos esfuerzos en el desarrollo de modelos CFD detallados y en la validación de dichos modelos mediante un gran número de ensayos experimentales. La capacidad de los supercomputers se está utilizando al máximo (el incremento previsto en la capacidad de los supercomputers para estas aplicaciones se puede apreciar en la figura 6) para desarrollar modelos experimentales que predigan la operación de la toma dinámica, combustión y tobera. Las ecuaciones completas tridimensionales de Navier-Stokes, teniendo en cuenta los efectos de los gases reales, cinética química y flujo turbulento están siendo refinadas.

El interés militar se centra en bajar los costes, así como incrementar la relación carga útil/peso de los vehículos lanzados al espacio. También en la posibilidad de un futuro interceptor de baja órbita con alcances mucho mayores que los típicos actuales de 1.000 y 1.500 Kms.

La meta actual del programa NASP es construir un prototipo de scramjet de aproximadamente 3 pies de diámetro y 10-15 pies de largo. Hasta 12 de ellos se instalarán en el prototipo NASP. Las áreas de investigación claves para este desarrollo se encuentran en la tabla 1.

CONCLUSION

LOS nuevos motores aeronáuticos implicarán, por sus características, avances en la agilidad de la aeronave, nuevos modos integrados y reducción de la carga de trabajo del piloto, capacidad de crucero hipersónico, y la posibilidad de llegar a órbita. Es un dato muy significativo que en las listas de tecnologías clave de ciertos países, bien para mantener el liderazgo o bien para alcanzar un nivel tecnológico adecuado, se incluye frecuentemente el desarrollo de las tecnologías avanzadas asociadas con la propulsión. ■