

En Profundidad

Capacidad de Defensa en el desarrollo de motores de aviación

Autor: D. Carlos Garrido Sánchez, OT ENEP, SDG PLATIN.

Palabras clave: propulsión, ensayo, datos, emisiones, contaminantes.

Líneas I+D+i ETID relacionadas: 3.4.3, 3.4.4, 7.2.1, 7.2.2.

Introducción

Una de las más insospechadas, interesantes y quizás desconocidas capacidades nacionales es el desarrollo de prototipos de motores de aviación para uso militar o civil, a pesar de no disponer actualmente a nivel nacional de ninguna empresa capaz de diseñar, fabricar y comercializar un motor completo.

Por lo tanto, puede resultar extraño que dentro del Ministerio de Defensa

exista esta capacidad tecnológicamente puntera, la cual se ha convertido en un referente mundial por excelencia, eficacia y profesionalidad. Y todo dentro del sector público español.

Junto con el principal actor privado nacional, ITP AERO, líder en el desarrollo de nuevos materiales, procesos de fabricación y diseño de módulos de motores aeronáuticos, España está a la cabeza en cuanto al desarrollo de una de las más complejas tecnologías presentes en el mundo para afrontar los retos de los desarrollos del futuro.

Antecedentes

En el año 1995, S. M. el rey D. Juan Carlos I inauguró en las instalaciones del INTA, en Torrejón de Ardoz, una celda de ensayos de prototipos de motores de avión tecnológicamente puntera a nivel mundial, dotada de los más modernos equipos disponibles en ese momento y de mayor tamaño en el mundo. Fue creada a imagen y semejanza de la celda 56 que existía en Inglaterra, propiedad

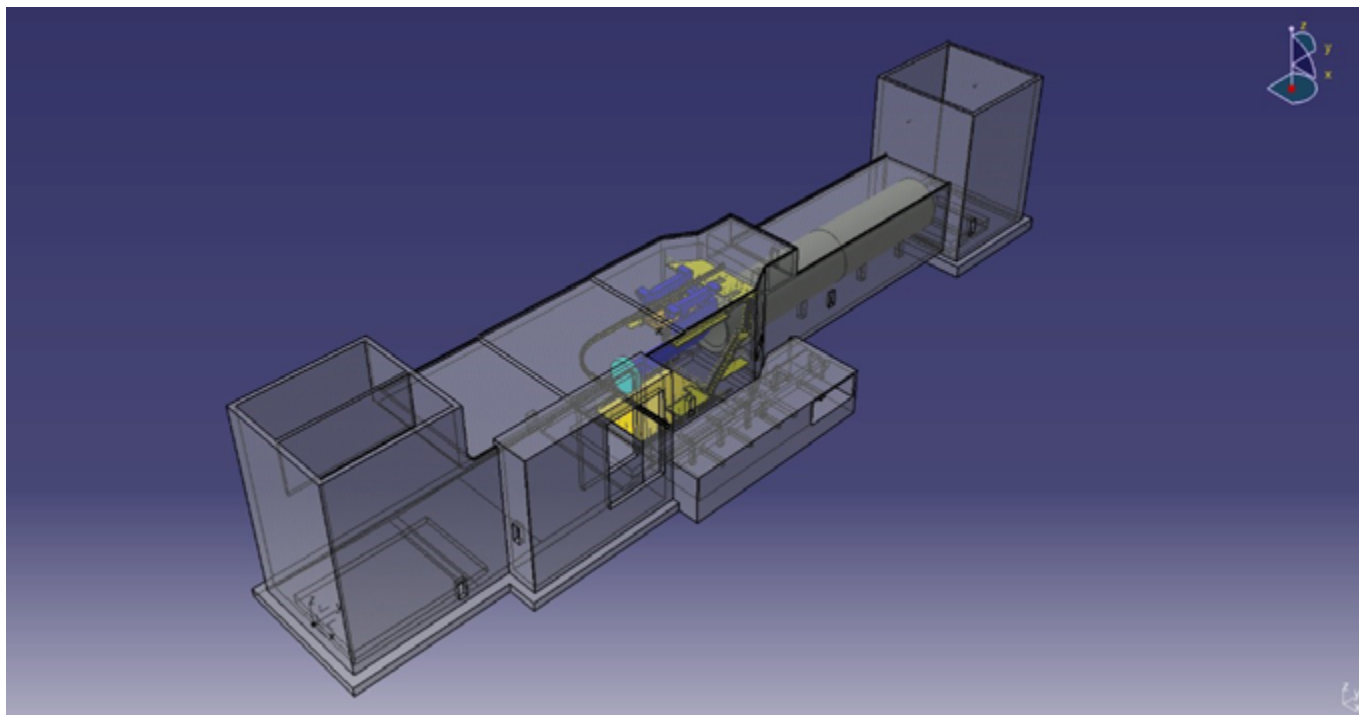
de Rolls-Royce, grandes líderes mundiales de fabricación de motores de aviación junto con General Electric, con unas dimensiones imponentes: 14,5 x 14,5 m de sección cuadrada de ensayo, más de 100 m de longitud, capacidad para medir hasta 140 000 lb de empuje y más de mil canales de medida de parámetros, tanto analógicos como digitales, entre los que se encontraban temperaturas, presiones de gases, y líquidos o vibraciones. Además, incorporaba un novedoso diseño aerodinámico para optimizar el flujo de aire dentro de la celda y el equilibrado de presiones antes y después de la sección de ensayo, minimizando los riesgos estructurales de la instalación.

Inicios

La inauguración de la celda se produjo con lo que se denomina un ensayo de correlación. Este ensayo consiste en hacer un ensayo a un motor específico en una celda caracterizada aerodinámicamente, es decir, que se conoce el comportamiento aerodinámico del aire y su influencia, y repetir



Turbofan de alto índice de derivación dentro de la celda de ensayos. (Fuente: INTA)



Modelo 3D de celda de ensayos. (Fuente: INTA)

el mismo ensayo con el mismo motor en otra celda desconocida para poder comparar los resultados obtenidos y deducir la influencia de esta instalación en el motor. El resultado son los denominados parámetros de correlación propios de esa instalación y que deben ser revisados periódicamente con un calendario establecido de ensayos de correlación.

El primer ensayo como tal se produjo con un motor militar EJ200, que es el que equipan en la actualidad los cazas de combate *Eurofighter Typhoon*, el cual fue un éxito y al que le han seguido más de cincuenta ensayos de motores tanto de Rolls-Royce, principal socio tecnológico durante estos años, como de General Electric. Además, se han realizado ensayos de programas europeos con demostradores tecnológicos que incorporaban tecnologías de TRL muy bajas (programas ANTLE y POA) y, por primera vez en la historia, se midió físicamente la distribución de temperaturas reales dentro de la cámara de combustión de un motor Rolls-Royce TREN 900, que es el que equipa el AIRBUS 380 en la actualidad.

Tipos de ensayos de un motor

El desarrollo de un nuevo tipo de motor lleva implícitos muchos tipos de ensayos para asegurar no solo que el motor cumple con las distintas misiones para las que se ha sido diseñado,

sino que además es seguro en su operación para no poner en riesgo la vida de los tripulantes ni de la aeronave. Estos tipos de ensayos se pueden clasificar, sin ser muy exhaustivos, en varios tipos:

- Ensayos de desarrollo: destinados a desarrollar tanto tecnología novedosa como solucionar aspectos relativos al uso en servicio. Un ejemplo de este último han sido los ensayos derivados de las grietas encontradas en las carcasas de los motores TREN 1000 de Rolls-Royce en servicio, las cuales han necesitado de ensayos ideados específicamente para entender qué fenómeno las causaba, su rediseño, fabricación y ensayos de validación para asegurar que se ha subsanado este defecto. Como puede imaginarse, este tipo de ensayos son complejos tanto por los fenómenos físicos que los producen como por las capacidades de ensayo necesarias. Conviene mencionar otros ejemplos de estos ensayos de desarrollo, como son los de pinturas térmicas aplicadas a los álabes del compresor o turbina para ver físicamente las líneas de corriente del flujo de aire en funcionamiento. En estos ensayos solo hay una oportunidad para hacerlos bien ya que, de lo contrario, se estropea el dibujo que deja el flujo de aire sobre las superficies a las que se le aplica la pintura.

Otro tipo de ensayos de desarrollo son los que se realizan cuando se diseña un módulo nuevo del motor para aprovechar las innovaciones tecnológicas presentes. Esto incluye la incorporación de nuevos materiales más avanzados, nuevos procesos de fabricación, o modelos de diseño o de cálculo matemáticos avanzados, entre otros.

- Ensayos de certificación: el objetivo de estos ensayos es proporcionar evidencias de cumplimiento de la normativa vigente, siendo la superación de todos ellos el requisito para obtener el certificado de tipo del motor, lo que a partir de ese momento imposibilita la modificación del diseño. Entre estos ensayos se encuentran los de *maturity* o «ETOPS», cuyo objetivo es simular el deterioro del motor con el uso para asegurar que la pérdida de rendimiento es inferior a un cierto límite especificado y no se producen daños que puedan comprometer la seguridad de uso. Para ello se somete al motor a una serie de ciclos repetitivos con maniobras mucho más exigentes que las permitidas dentro de la envolvente de vuelo que aceleran el deterioro del motor completo, de tal manera que en un par de meses de ensayo se puede ver el deterioro acumulado real que tendría ese mismo motor después de años de servicio.

- Ensayos de producción: consisten en asegurar un nivel mínimo de rendimiento del motor según los parámetros preestablecidos en los contratos con los operadores de las aeronaves. Son ensayos del tipo pasa-no pasa, y son los menos complicados y exigentes de todos.

Todos estos tipos de ensayos, a su vez, pueden dividirse en ensayos destructivos o no destructivos, atendiendo a cómo se realizan. Sirvan de ejemplo de ensayos destructivos los ensayos de ingestión de aves o los de suelta de álabes, ensayos absolutamente necesarios para certificar el motor.

Todo este abanico de ensayos implica, además, necesidades operacionales, de infraestructura e instalaciones dedicadas, lo que hace que se deban dimensionar adecuadamente. Unos datos representativos de esto son que, para acometer los ensayos de certificación de los grandes motores civiles presentes en el mercado realizados en el Banco de Ensayos del INTA, se realizan tres turnos para asegurar veinticuatro horas de operación ininterrumpida hasta seis días a la semana, con una duración estimada de entre dos y tres meses por ensayo, y una capacidad de almacenamiento de combustible de aviación (JET A-1) de quinientos mil litros, los cuales se consumen a un ritmo medio de más de cien litros por minuto de funcionamiento del motor.

Capacidad de Defensa

Defensa tiene una extraordinaria capacidad para realizar todos (o casi todos) los ensayos no destructivos necesarios de una planta propulsiva; es decir, los de desarrollo, certificación y producción, lo que es una ventaja estratégica nacional al no estar en manos de ninguna empresa privada y, por tanto, no depender de sus prioridades empresariales.

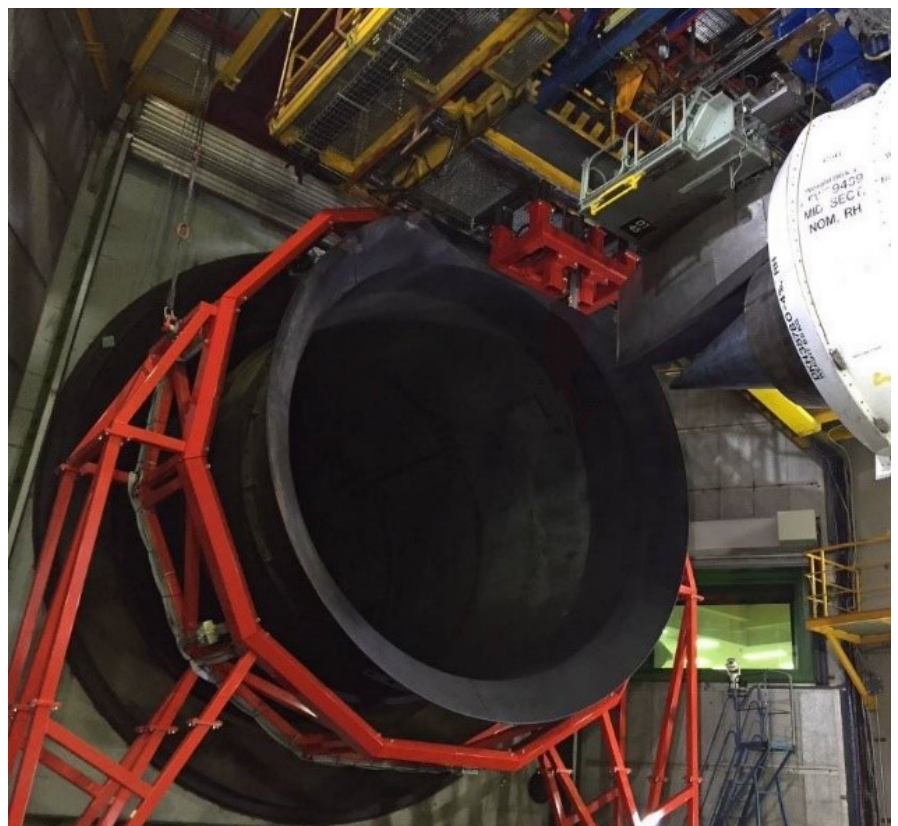
Para tener esta enorme capacidad de ensayo es necesario poseer varios elementos esenciales, los cuales están presentes dentro de las capacidades del Ministerio de Defensa y se detallan a continuación.

El primero, y con diferencia el más importante y difícil de obtener de todos, es contar con un grupo humano suficientemente amplio de personal de ensayo (ingenieros y mecánicos) con suficiente experiencia y conocimiento técnico en ensayos, monitorización y

operación de prototipos de motores. Se necesitan muchos años de entrenamiento del personal de operaciones para ser capaces de manejar estos ensayos, ya que el hecho de manejar prototipos de motores, normalmente únicos, de enorme valor económico y grandes periodos de producción, en caso de fallo hace que haya incertidumbre en la operación del sistema, lo que puede traducirse tanto en una pérdida de rendimiento del sistema (problema menor y esperable que conlleva el análisis de los datos de ensayo, rediseño y más ensayos futuros de validación) como en problemas de seguridad de uso. Si ocurre lo segundo aumentan las probabilidades de fallo del sistema, el cual, con una alta probabilidad, será catastrófico debido a que son sistemas de alta energía. En este caso es responsabilidad de la tripulación de ensayo llevar el motor a una condición de funcionamiento seguro previa al fallo, priorizando en orden decreciente de operación evitar pérdidas humanas, preservar la integridad de la instalación y, finalmente, el prototipo ensayado. Esto se consigue únicamente con personal de operaciones muy experimentado con gran capacitación técnica y operativa, con muchos años de

experiencia en ensayos, creciente en función de la complejidad del ensayo (no es lo mismo hacer ensayos para validar un rediseño de un soporte de una tubería de combustible del motor que el de un nuevo tipo de inyector de combustible), siendo los de desarrollo y los de certificación los más complejos de todos seguidos, por último, de los de producción.

El segundo aspecto clave es la capacidad de obtención y análisis de los datos de ensayo capturados en tiempo real durante la operación del motor. Esta capacidad es tanto mayor a medida que el ensayo a realizar aumenta su complejidad. Típicamente, para un ensayo de desarrollo de certificación, podemos estar hablando de grabar, procesar y almacenar del orden de mil temperaturas, quinientas presiones y cien vibraciones, aunque estos datos suelen ser sensiblemente mayores en ensayos de desarrollo. Los ensayos de producción son, con diferencia, los menos exigentes desde este punto de vista. Todos estos datos normalmente se dividen entre datos estáticos o dinámicos, y conllevan la calibración de todo el sistema de adquisición de datos, normalmente



Anillo óptico de emisiones. (Fuente: INTA)

En profundidad



Sonda intrusiva de emisiones. (Fuente: INTA)

con calibraciones del tipo *end to end* (desde el instrumento de medida hasta el equipo de adquisición), para asegurar la exactitud, precisión e incertidumbre de los datos medidos.

Los datos estáticos son los que, durante un cierto intervalo de tiempo, se capturan de los sensores a una cierta frecuencia y se hace la media de ellos, dando un único valor por parámetro. Entre estos parámetros se encuentran normalmente temperaturas, vibraciones o presiones. Los datos dinámicos, típicamente vibraciones o deformaciones, por el contrario se capturan durante un cierto tiempo y se reconstruye la señal aplicando métodos matemáticos, normalmente transformada rápida de Fourier o diagrama de Campbell, para llevarla al dominio de la frecuencia y poder analizar fenómenos complejos, como pueden ser fallos mecánicos, efectos de interacción con las paredes de la celda (típicos de las últimas etapas de las turbinas de baja) o aeroelásticos, como los de flameo de los álabes del fan. Estos últimos, de enorme complejidad, obligan además a instrumentar los álabes del fan con galgas extensiométricas conectadas a equipos de telemedida para poder ver en qué momento empieza a producirse el fenómeno. La velocidad de actuación de las tripulaciones de ensayo es crítica, ya que el tiempo máximo de

respuesta para llevar el motor a una condición de funcionamiento segura es de un segundo (el fenómeno es fuertemente divergente en el tiempo). Todos estos fenómenos son generalmente mucho más relevantes para la seguridad del motor que los estáticos, ya que anticipan el fallo del sistema, por lo que es imprescindible tener personal específicamente formado en la operación, monitorización y análisis de estos sistemas.

Toda esta capacidad de captación, monitorización en tiempo real y análisis de datos se hace con equipos informáticos de gran capacidad mediante el uso de tarjetas dedicadas, y grandes capacidades de almacenamiento y procesamiento de datos, los cuales, a su vez, son encriptados y enviados al fabricante empleando conexiones seguras.

El tercer aspecto clave son los sistemas de control, tanto del motor como de la instalación. Los sistemas de control de motor y de la instalación necesitan comunicarse e interactuar con los propios del motor, proporcionándole todas las entradas o salidas de señales, o alimentaciones eléctricas, neumáticas o hidráulicas que el motor tendría si estuviese montado en la aeronave, ya que de otro modo no funcionaría (por ejemplo, hay que darle la señal de que la aeronave está en tierra o en vuelo, la cual se consigue situando un interruptor en

la pata de morro de la aeronave, que no tiene al estar el motor instalado en una celda de ensayos). Así, el sistema de control de la instalación debe permitir actuar sobre el comportamiento del motor ya que, para muchos de los ensayos, se requiere intervenir sobre el propio control del motor mediante la modificación de ciertos parámetros que gobiernan el comportamiento del motor (por ejemplo, la modificación de la apertura o cierre de ciertas válvulas a demanda del usuario) en tiempo real, además de ciertas PLC (*Programmable Logic Controller*) dedicadas a ciertas tareas repetitivas, esencialmente las relacionadas con los ciclos de ensayo mencionados al principio y que actúan sobre la palanca de gases del motor de una manera autónoma. Esta responsabilidad de operación recae nuevamente en la experiencia de la tripulación de ensayo, puesto que se fuerza al motor a funcionar fuera de los parámetros conocidos de funcionamiento y protección del motor.

En cuarto lugar está la instalación, que es tanto más compleja como sean los ensayos a realizar. Típicamente consta de un sistema de combustible para asegurar la alimentación del suficiente caudal y presión de combustible al motor, el cual varía según su régimen de funcionamiento, un sistema de aire comprimido para arrancar o alimentar

diversos sistemas secundarios (válvulas o caudales de refrigeración, o consumo de sistemas auxiliares del motor) o de arranque eléctrico, en caso de que el motor lleve este tipo de sistema, un sistema de preservación para proteger el motor durante los periodos de inactividad, un sistema eléctrico para alimentar todos los sistemas y de almacenamiento de energía eléctrica en caso de corte del suministro para asegurar la parada controlada del motor en cualquier circunstancia de emergencia, todo tipo de elementos auxiliares para instalar, montar, manejar, desmontar o desinstalar el motor en la instalación, y un sistema de monitorización y extinción de incendios que permita apagar un posible fuego y evacuar la instalación en caso de necesidad en tiempos suficientemente cortos. Por último, hay un apartado especial de equipos e instalaciones necesarios para ejecutar ciertos ensayos que se utilizan según la necesidad. La misión de estos equipos es simular la condición de contorno que tiene el motor en su condición para alimentar algunos sistemas. Nos estamos

refiriendo a la capacidad de generación de energía hidráulica para mover las partes móviles de la aeronave (flaps, alerones, etc.), la generación de potencia eléctrica, de suministro de aire de cabina para consumo humano, o de ingestión de arena o agua, por mencionar los principales. Por poner un ejemplo, para la generación de energía hidráulica existen equipos que cierran el circuito hidráulico y provocan las pérdidas de carga reales que tendría que vencer el sistema en un uso real como consecuencia de la actuación por parte del piloto sobre el timón de profundidad o cualquier otra superficie aerodinámica móvil de la aeronave.

Finalmente, existen una serie de capacidades adicionales del Banco de Ensayos de Motores del INTA relacionadas con proyectos de I+D+i, que añaden capacidades especiales a las de ensayo. Estas capacidades están enfocadas a la medición de los contaminantes emitidos durante la operación del motor, siendo una de las pocas instalaciones en el mundo con este tipo de tecnología. Por

un lado, cuenta con una sonda invasiva en el chorro de gases de escape que recoge muestras para analizar los contaminantes que se están generando, pudiendo caracterizarlos en cuanto a las emisiones de CO₂. Al ser invasiva e introducirse físicamente en el chorro de escape, modifica el comportamiento del motor produciendo acoplamientos aeroelásticos en el motor, pudiendo provocar fallo catastrófico en el mismo. Además, debe situarse suficientemente cerca del plano de salida de los mismos para cumplir con la normativa de la OACI, lo que lleva a que sea capaz de soportar grandes esfuerzos. Otra sonda de medida, esta no invasiva, consiste en un anillo de láseres alineados por parejas (emisores y receptores) basados en la refracción del láser al encontrarse con ciertas partículas. Este anillo se sitúa más alejado que la sonda invasiva del plano de salida, lo que permite ver la formación de otras especies, pudiendo diferenciar los NOx o los SOx, entre otras, sin afectar al comportamiento del motor, ya que se hacen pasar los gases de la combustión producidos a través de dicho anillo. En función de la distancia y de la cinética química de las reacciones de los gases de escape, se podrán medir las concentraciones finales emitidas a la atmósfera en funcionamiento real cuando la aeronave está volando en altura de crucero. Finalmente, también cuenta con capacidad para analizar los gases emanados por el *breather* del motor, altamente contaminantes por la presencia de partículas de aceite, fundamentalmente aromáticos y partículas no volátiles, especialmente nocivas cuando la aeronave está en tierra.

Futuro

Debido a toda esta enorme capacidad tecnológica, España, y más concretamente el Ministerio de Defensa, está en disposición de enfrentarse a un reto tecnológico de primer nivel, como es nuestra participación en el programa NGWS, más específicamente en lo relativo al desarrollo de la planta propulsiva. Este programa supondrá no solamente un incremento de la capacidad de nuestras FF. AA., sino que contribuirá a la sostenibilidad y mejora de nuestras infraestructuras tecnológicas, clave para afrontar otros retos de futuro (p. ej., propulsión mediante H₂ criogénico). La posición privilegiada que tiene el Ministerio de Defensa para afrontar estos retos de altísima tecnología es un orgullo nacional y una seguridad de éxito internacional.



Motor con SPE (Special Test Equipment) instalado en la celda de ensayos. (Fuente: INTA)