

Reducción de emisiones *contaminantes*

ALFREDO LÓPEZ DÍEZ

Ingeniero Aeronáutico por la E.T.S.I. Aeronáuticos

Head of Advanced Engineering, ITP

Profesor Asociado Departamento de Aeronaves y Vehículos Espaciales, Universidad Politécnica de Madrid

En 2001 la Comisión Europea promovió la edición del documento “Aeronáutica Europea: Una Visión para el 2020”, en el que se identificaban los objetivos que la aviación Europea debía alcanzar en 2020 para satisfacer las necesidades que la sociedad demandaba al transporte aéreo y conseguir que Europa alcanzara en 2020 el liderazgo en tecnología aeronáutica. Para conseguir dichas metas era necesario articular la inversión en investigación y tecnología de forma que se pudiese obtener mayor retorno gracias a la colaboración efectiva entre los diferentes agentes. El documento también recomendaba la creación de un grupo consultivo, para desarrollar y mantener una Agenda Estratégica de Investigación que ayudase a alcanzar los objetivos de la Vision 2020, así surgió en Junio del 2001 el ACARE o “Advisory Council for Aeronautics Research in Europe” formado por más de 40 organizaciones de todo tipo relacionadas con la aviación, que desde entonces ha venido jugando un papel fundamental asesorando a la Comisión Europea en todos los temas relativos a investigación aeronáutica.

A pesar de que la contribución del transporte aéreo a las emisiones de “efecto invernadero” es solo del orden del 2% del total generado por el ser humano, entre los objetivos de la Visión 2020 se estipulaba explícitamente la necesidad de reducir las emisiones contaminantes producidas por la aviación comercial con relación a los aviones más modernos en servicio en el año 2000. En particular se establecieron objetivos explícitos de reducir las emisiones producidas por el

transporte aéreo, tanto de dióxido de oxígeno (CO₂) en un 50%, de las de óxidos de nitrógeno (NOX) en un 80% y de la reducción del ruido percibido en un 50%. En todos estos parámetros la contribución de la planta propulsora del avión es fundamental, valga como muestra que en una hora, el motor de un avión de unos 150 pasajeros libera a la atmósfera 8.5 toneladas de CO₂ y 30 kg de NOX. Sin embargo, tanto el propio diseño del avión por su eficiencia aerodinámica como incluso la reducción de peso, contribuyen a las emisiones contaminantes (tanto de ruido como de CO₂ y NOX a través de la demanda de empuje al motor). Por otro lado la gestión del tráfico aéreo también puede ayudar a conseguir los objetivos medio ambientales estableciendo rutas más eficientes. Por lo que ACARE estableció un reparto entre las tres medidas principales (motor, avión y gestión de tráfico aéreo), en la que el “trozo del pastel” asignado al motor fue de un 20% de reducción en emisiones de CO₂, un 80% en NOX y 10 decibelios en ruido.

Es por ello por lo que, con el apoyo de la Comisión Europea a través de los diferentes programas marco, las empresas de motor de avión europeas, agrupadas en el denominado “Engine Industry Management Group” (del que la empresa española ITP es miembro de pleno derecho) establecieron una hoja de ruta de proyectos, con los que alcanzar dichos objetivos. Los proyectos se distribuyeron en tres tipos todos ellos relacionados entre sí, de acuerdo con el nivel de madurez tecnológica (o TRL por sus siglas en inglés) a alcanzar en cada uno de

ellos: Proyectos de investigación básica o de nivel 1 (encargados de generar tecnologías fundamentales en cada una de las disciplinas básicas como materiales, aerodinámica, fabricación, etc.), proyectos de demostración de subsistemas o de nivel 2 (en las que esas tecnologías se aplicaban a cada uno de los subsistemas principales del motor, básicamente el núcleo, el grupo de baja presión y el sistema de escape, realizando ensayos representativos a nivel de sistema) y proyectos de demostración de motor completo o de nivel 3 (en los que todos los subsistemas se agrupan en un motor, comprobando tanto en banco de pruebas como en ensayos en vuelo, los resultados obtenidos). En todos estos proyectos, se incorporaron la mayoría de Universidades y Centros tecnológicos Europeos que aportaban su conocimiento y capacidades según el tipo de proyecto del que se trataba,

La eficiencia de una turbina de gas, básicamente se puede evaluar considerando qué proporción de la energía química contenida en el combustible es transformada en potencia que propulse al avión, fundamentalmente se puede medir por el flujo de combustible que se necesita para obtener el empuje necesario del motor, parámetro que se conoce como Consumo Específico de Combustible o SFC por sus siglas en inglés. Para poder identificar la influencia de cada uno de los contribuyentes esta eficiencia normalmente se divide en dos partes: el rendimiento térmico que representa el porcentaje de energía química del combustible que se transforma en el movimiento de giro de los ejes del motor y

el rendimiento propulsivo que significa cuanto energía mecánica de ese giro se convierte empuje del motor. El rendimiento térmico aumenta principalmente con las temperaturas y presiones máximas que el aire alcanza en el interior del motor, para ello es necesario desarrollar innovadores diseños aerodinámicos para mejorar los la eficiencia aerodinámica de los compresores y turbinas del motor que permitan aumentar la relación de compresión global (OPR por sus siglas en inglés), y nuevos materiales y tecnologías refrigeración para poder aumentar al máximo las temperaturas obtenidas en la cámara de combustión (o TET, por temperatura de entrada a la Turbina). Los motores que estaban en servicio en el año 2000 tenían una relación de compresión del orden de 35 y temperaturas de entrada a turbina del orden de 1500 °C, con lo que se obtenían unos valores de rendimiento térmico de aproximadamente el 45%. El valor teórico máximo que se podría obtener del rendimiento térmico estaría alrededor de un 60%, para acercarse a ese valor se estableció como objetivo aumentar la relación de compresión hasta un valor de 60, y la temperatura de entrada a turbina hasta del orden de 1700 °C. Por otro lado el rendimiento propulsivo depende principalmente de la relación de derivación del motor (más conocida por su definición en inglés “bypass ratio” o BPR), es



Ensayos en vuelo del Advance Low Pressure System.

combustible para producir la combustión aumentando radicalmente la temperatura de esa mezcla de aire y combustible. Los motores en servicio en el año 2000 tenían una relación de derivación del orden de 5, con lo que se obtenía una eficiencia propulsiva cerca del 75%. Para aumentar la relación de derivación se necesitan fanes de mayor diámetro en relación al núcleo del motor, lo cual a su vez tiene un impacto negativo tanto en el peso de la planta propulsiva, como en su instalación en sí en el avión, por lo que se hace necesario desarrollar

dinámica (que permite reducir el número de álabes) o por el desarrollo de nuevos materiales más ligeros (como materiales compuestos en el fan o Aluminuros de Titanio en la turbina). El aumento del tamaño del fan tiene otro efecto perjudicial en la configuración del motor, ya que cuanto mayor es su diámetro es necesario reducir las revoluciones de giro para evitar que se formen ondas de choque en los extremos de los álabes del fan, por lo que la turbina que proporciona potencia al fan debe tener más etapas de expansión, debido a su baja velocidad de giro



Airbus A320neo propulsado por un PW1000G.

decir la relación entre cantidad de flujo de aire que entra en el motor succionado por el fan y la que se deriva hacia el núcleo del motor dónde se encuentra la cámara de combustión, en la que esa porción de flujo de aire se mezcla con el

metodologías para reducir el peso de los principales elementos del motor asociados al fan (conocido genéricamente como sistema de baja presión que consta básicamente del fan en sí y de la turbina de baja) ya sea por la optimización aero-

que las hace aerodinámicamente menos eficiente, con lo que los límites efectivos de relación de derivación alcanzables por un turbofan convencional (o DDTF por “Direct Drive Turbo Fan) se encuentran del orden de 10. Por ello desde ini-

cios del siglo XXI se han considerado arquitecturas de motor como el turbofan engranado (o GTF por sus siglas en inglés), en el que la turbina que mueve el fan, lo hace a través de una sistema de engranajes que permite su giro a revoluciones mucho más altas que el fan, con lo que se pueden conseguir relaciones de derivación de hasta un valor de 15, claro está siempre que la mejora propulsiva obtenida (se podrían obtener valores de eficiencia propulsiva del orden 85%) compense el incremento de peso y pérdidas generado por la caja de engranajes y sus sistemas asociados. Este concepto de motor, llevado al extremo para aumentar la relación de derivación hasta valores de 35, lleva a la arquitectura de “Open Rotor” que alcanza valores de eficiencia propulsiva cercanos al límite teórico del 95%. El fan se sustituye por dos etapas

propulsiva aumentando la relación de derivación (VITAL, DREAM y ENOVAL) o en proyectos explícitos para la reducción de ruido (SILENCER y OPENAIR). Los resultados de todos estos proyectos, alimentan los demostradores de tecnología de motor a escala real, primero con el programa EEF AE y continuando con el programa Clean Sky, en el que uno de sus programas de Demostración de Integración de Tecnología, conocido por SAGE (por Sustainable And Green Engine) está dedicado a la planta propulsiva.

El SAGE es el programa de mayor presupuesto de Clean Sky (con un 27% del total de los 1600 millones de Euros financiados al 50% entre la industria y la comisión europea) y consiste en 6 diferentes tipos de demostradores de motor que van desde arquitectura “Open Ro-

presamente para ello (como el SAGE 3 con importante participación española de ITP), con los que la tecnología desarrollada ya se está introduciendo en nuevos motores de producción con un mínimo riesgo técnico.

La iniciativa Clean Sky se ha mostrado tremendamente efectiva no solo en el desarrollo y validación de tecnología aeronáutica si no en asegurar que toda la cadena de generación de tecnología aeronáutica europea orienta sus esfuerzos a un objetivo común, facilitando la participación no solo de grandes empresas (que reciben un 24% de la financiación total), sino también Universidades y centros de investigación (con un 40% de la financiación), así como de pequeñas y medianas empresas (que han recibido un 36% de la financiación) que les ha permitido invertir en tecnología para poder competir en el negocio aeronáutico, en el que muchos de ellos ni siquiera estaban. En total hay más de 500 entidades participantes en Clean Sky de las que 64 son españolas. La contribución española en Clean Sky, en cuanto a número de entidades participantes, está solo por detrás de Francia (con 96 participantes) Alemania (con 80) y Reino Unido (con 69).

Los resultados de los primeros proyectos (EEFAE, NEWAC, VITAL, DREAM y SILENCER, así como de varios proyectos básicos de nivel 1) no se han hecho esperar, por lo que a principios de la segunda década del siglo XXI se lanzó el desarrollo de nuevos motores que mejoraban significativamente la eficiencia respecto de los que estaban en servicio al iniciar el siglo, basándose en la tecnología desarrollada y demostrada en dichos proyectos. En particular si se usa como referencia el motor Rolls-Royce Trent 800 que equipaba al Boeing 777 en el año 2000, con la entrada en servicio del Airbus 380 en 2007 propulsado por el Trent 900, se redujeron sus emisiones de CO₂ en un 7%, las de NO_x en un 20% y las de ruido percibido en 4 decibelios. Posteriormente, en el año 2011, el Boeing 787 con el motor Trent 1000 introdujo unas mejoras comparadas con el Trent 800 de 12% en emisiones de CO₂, 30% de NO_x y 5 decibelios de ruido. Ya más recientemente, el motor Trent XWB del Airbus 350 que entró en servicio en 2014, ofrece una mejora de 15% en CO₂, 40% en NO_x y 6 de-



Maqueta de Open Rotor del programa Clean Sky.

de hélices de alta velocidad contra rotorias, evitando el peso de la carcasa del fan, pero incluyendo desafíos mayores en la integración con el avión, así como la dificultad adicional de alcanzar los objetivos de ruido.

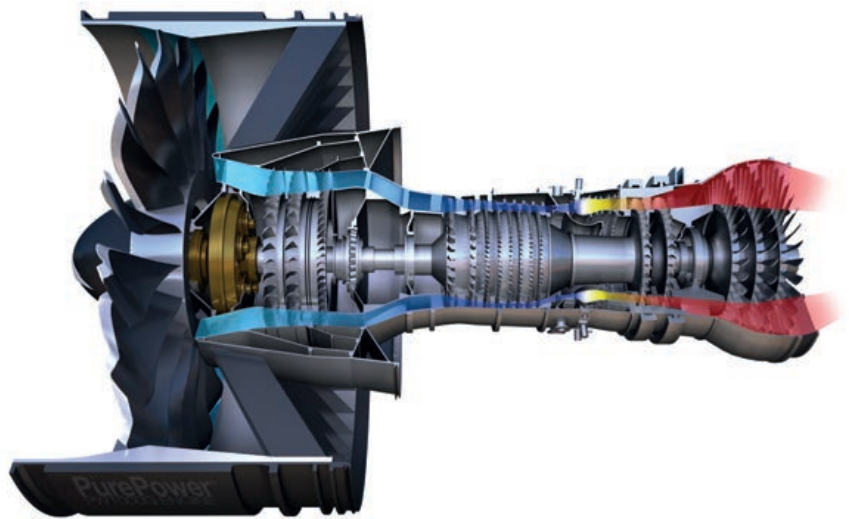
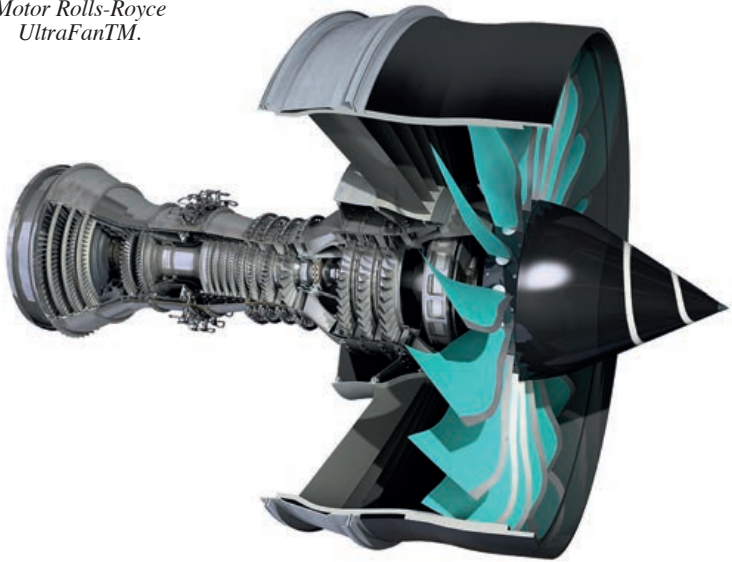
Es por ello por lo que los proyectos de subsistemas se centran bien en mejorar la eficiencia del núcleo del motor, con tecnologías para aumentar la relación de compresión y la temperatura de entrada de turbina de los motores del futuro con objeto de incrementar el rendimiento térmico (NEWAC, LEMCOTEC e E-Break), bien en mejorar la eficiencia

de hélices de alta velocidad contra rotorias, evitando el peso de la carcasa del fan, pero incluyendo desafíos mayores en la integración con el avión, así como la dificultad adicional de alcanzar los objetivos de ruido. Es por ello por lo que los proyectos de subsistemas se centran bien en mejorar la eficiencia del núcleo del motor, con tecnologías para aumentar la relación de compresión y la temperatura de entrada de turbina de los motores del futuro con objeto de incrementar el rendimiento térmico (NEWAC, LEMCOTEC e E-Break), bien en mejorar la eficiencia

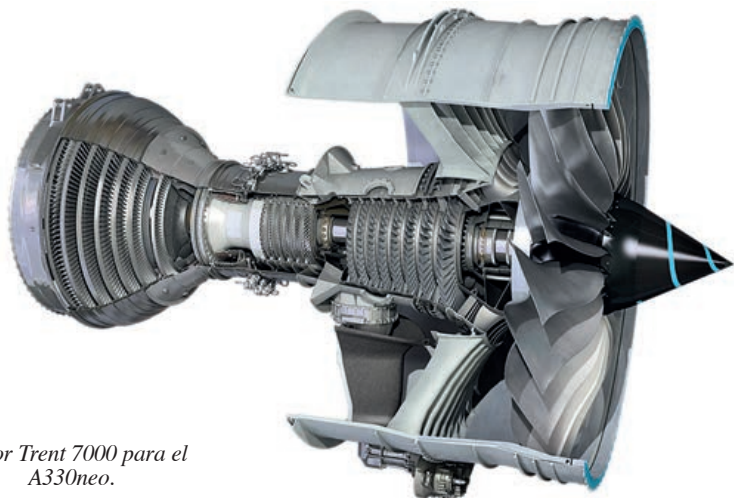
cibelios de ruido. Es de destacar la contribución fundamental de la tecnología desarrollada en España por ITP aplicada en todas las turbinas de baja presión de la familia Trent. Por otro lado en aviones de fuselaje estrecho (que son, con mucho, la mayoría de los que están en servicio) nuevos fabricantes de aviones han aparecido en escena utilizando motores de última generación desarrollados a partir de finales de la primera década del siglo: tanto el C-Series de Bombardier como el MC-21 de Irkut llevan turbofan engranados Pratt&Whitney PW1000G que llevan tecnología desarrollada por la compañía alemana MTU y, por otro lado, el avión chino COMAC C919 lleva el motor LEAP del consorcio CFM (con la partición al 50% de Snecma).

La contribución del motor a la eficiencia del avión, es tal que una de las tendencias actuales seguidas por los principales fabricantes de avión actualmente es la de equipar aviones existentes con motores de última generación para mejorar sustancialmente las prestaciones del avión, incluyendo eso sí, también mejoras específicas en ciertos componentes del avión. El ejemplo más representativo de esta teoría es el Boeing 737 que a pesar de haber nacido en los años 60, ha sido capaz de mantenerse en primera línea gracias a sucesivas actualizaciones de motor. La última versión, el B737 Max, lleva motores CFM LEAP lo que le permitirá mantenerse en servicio hasta los años 2030. Airbus también ha aplicado la doctrina “neo” (por New Engine Option), tanto al A320neo como al A330neo, que son básicamente nuevas motorizaciones de los aviones existentes con PW1000G o LEAP (en el caso del A320neo) y Rolls-Royce Trent 7000 (para el A330neo). También en los extremos inferior y superior del mercado, se están apuntando a la “moda” de cambiar el motor a un avión existente, por ejemplo el nuevo avión regional de Embraer, el E-Jet E2, se llama así principalmente por su nuevo motor el PW1000G que sustituye a los de la primera generación, y en aviones de gran tamaño, gran parte de la mejora del Boeing 777X se obtiene de su nuevo motor General Electric GE9X (con participación de la italiana GE Avio y la alemana MTU), por no mencionar el tantas veces sugerido A380neo, que todavía está pendiente de

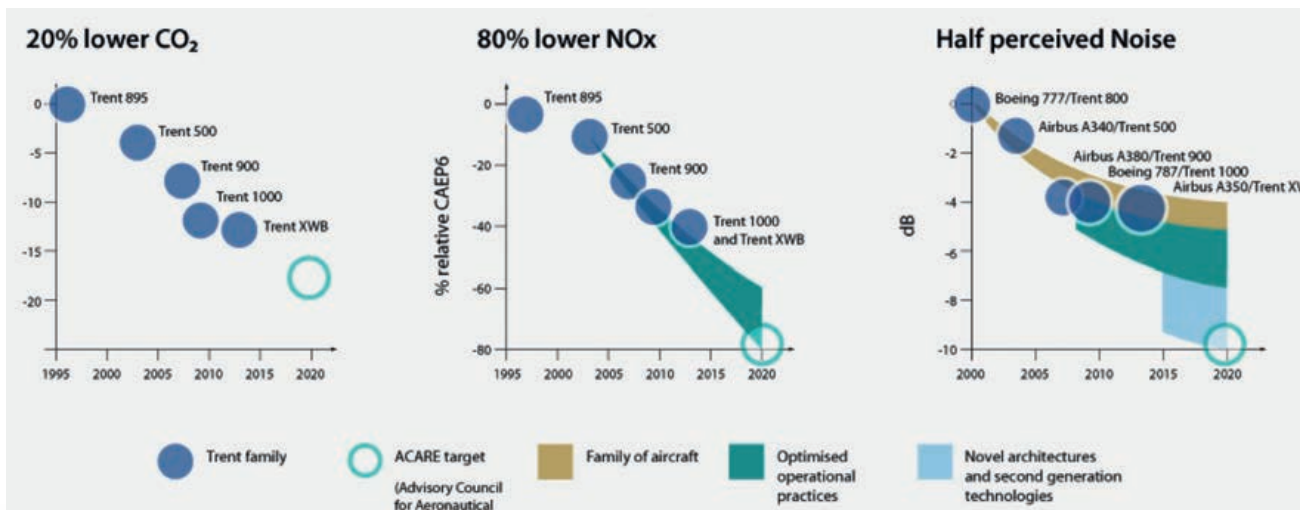
Motor Rolls-Royce UltraFan™.



Sección transversal del Turbofan Engranado PW1000G.



Motor Trent 7000 para el A330neo.



Contribución a la reducción de emisiones de CO₂ y NO_x en relación a los motores en servicio en el año 2000 de los diferentes programas de desarrollo de tecnología de motor de nivel 2.

ver la luz. Todos estos motores han sido capaces de mejorar tanto a la eficiencia térmica como la propulsiva de los que sustituyen, aumentando tanto la relación de compresión como la de derivación gracias, en gran medida, a las tecnologías desarrolladas y validadas en los programas europeos de desarrollo tecnológico realizados en la primera década del presente siglo.

Los últimos programas de desarrollo de tecnología iniciados en esta década (OPENAIR, LEMCOTEC; E-Break, ENOVAL, así como varios proyectos nivel 1 de investigación fundamental), una vez validados en los demostradores, del programa Clean Sky 2, (continuidad del Clean Sky) acabaran de poner a disposición de los fabricantes de motor

la última generación de tecnologías que permitan mejorar aún más los logros obtenidos por los motores que han entrado en servicio en la segunda década del siglo XXI. En particular Clean Sky 2, puesto en marcha oficialmente en 2014, es el mayor programa Europeo de desarrollo de tecnología en aviación lanzado hasta ahora. Cuenta con un presupuesto de cerca de 4000 millones de euros, de los cuales la Comisión Europea contribuye con 1700 Millones, y los 2300 restantes son aportados por la industria. Al igual que la primera edición, Clean Sky 2 cuenta con una serie de demostradores de motor que van desde motores de pistón para aviación general, hasta ensayos en vuelo del concepto “open rotor” desarrollado en Clean Sky, pasando

por la nueva generación de turbohélices para transporte regional, pero incluyendo demostradores de la siguiente generación de turbofans de empuje medio engranados, y, el demostrador de motor del concepto UltraFan™ de Rolls-Royce, que básicamente consiste en una arquitectura engranada pero aplicada a motores de alto empuje para aviones de fuselaje ancho.

La tabla adjunta contiene el resumen de la contribución a la reducción de emisiones de CO₂ y NO_x en relación a los motores en servicio en el año 2000 de los diferentes programas de desarrollo de tecnología de motor de nivel 2. En cuanto al nivel de reducción de ruido percibido, el programa SILENCER contribuyó en una bajada de 5 decibelios, el pro-



yecto OPENAIR (OPTimisation for low Environmental Noise impact AIRcraft) redujo este valor hasta 8 decibelios, y finalmente se espera que con las mejoras del ENOVAL se alcancen reducciones cercanas a 10 decibelios. Ante este panorama se puede afirmar, sin lugar a dudas, que los programas de desarrollo de tecnologías de propulsión llevados a cabo por la industria europea de motores de aviación desde el inicio del siglo XXI, han contribuido fundamentalmente a que los nuevos motores estén entrando en servicio en la segunda mitad de esta década de forma que hayan cumplido los objetivos marcados en el año 2000 por el grupo de expertos en el documento “Aeronáutica Europea: Una Visión para el 2020”.

Sin embargo, el crecimiento sostenido del tráfico aéreo de un 5% anual previsto tanto por la industria como por diversos organismos, considerando incluso la renovación de la flota actual por aviones de última generación haría que, por ejemplo, las emisiones de CO2 producidas por el transporte aéreo aumenten desde los casi 500 millones de toneladas, a la atmósfera en el año 2010, hasta 2000 toneladas el año 2050. Por ello, de igual forma que en el año 2000, la Comisión Europea en diciembre de 2010, estableció un grupo de trabajo con representantes del sector aeronáutico de altísimo nivel que generase un documento con el mensaje principal de definir los mecanismos para promover el liderazgo de la industria aeronáutica Europea de forma competitiva y respetuosa con el



Motor Trent XWB para el A350.

medio ambiente con el horizonte del año 2050. Así surgió el informe “Flightpath 2050, la visión Europea para la Aviación” que, al igual que el documento generado 10 años atrás, incluía objetivos específicos de reducción de emisiones contaminantes que, evidentemente van mucho más allá de los establecidos para 2020. En particular se espera reducir las emisiones de CO2 en un 75%, los óxidos de nitrógeno en un 90% y del ruido percibido en 65%, todo ello en relación a los aviones que entraron en servicio en el año 2000. Una vez que ya casi se han “exprimido” al máximo las arquitecturas y conceptos de avión y motor, durante estas dos primeras décadas del siglo, para alcanzar los objetivos del 2050,

será necesario realizar cambios radicales tanto en los aviones como en sus plantas motrices para poder alcanzar los objetivos del 2050. Esto incluye no solo nuevos conceptos de avión (como el Blended Wing Body), o de motor (como la propulsión turbo eléctrica híbrida distribuida), sino también el uso extendido de combustibles alternativos mucho más respetuosos con el medio ambiente. Para ello tanto la Comisión Europea, como la industria deberán lanzar nuevos programas de desarrollo de tecnología de todos los niveles de madurez tecnológica, de forma que se repita la historia de éxito de la Visión 2020, pero esto es otra historia que merece un artículo en sí mismo. •

