

# Perspectivas de la tecnología de pilas de combustible en la aviación

NIEVES LAPEÑA REY

*Responsable del Departamento de Medioambiente  
Boeing Research & Technology Europe, S.L.*



## RESUMEN

**D**ado el alto rendimiento y las ventajas medioambientales de la tecnología de pilas de combustible, así como los considerables avances que se han conseguido en el sector del automóvil en los últimos 5 años, los principales fabricantes de aeronaves están empezando a investigar su potencial aplicación en la industria aeronáutica tanto para propulsión como para generación de energía auxiliar abordo. En el último año se han culminado retos importantes con respecto a la implementación de esta tecnología en aplicaciones aeronáuticas. En este sentido cabe citar el primer prototipo tripulado propulsado por pilas de combustible que Boeing presentó en abril en el Aeródromo de Ocaña (Toledo), o el demostrador de una pila de combustible como fuente de ener-

gía auxiliar para los sistemas hidráulicos y eléctricos de un Airbus 320 presentado en Francia en febrero de este año. Aunque estos programas de investigación y desarrollo facilitarán sin duda la incorporación de esta tecnología en aplicaciones aeronáuticas, quedan todavía muchas dificultades técnicas por resolver antes de ver estos sistemas a bordo de aviones comerciales. Sin embargo, la tecnología de pilas de combustible podría tener una aplicación a más corto plazo –por ejemplo en la aviación deportiva o en misiones concretas de aviones pequeños tripulados o no tripulados–, en los que las pilas de combustible puedan ofrecer ventajas de autonomía con respecto a las baterías que se usan en la actualidad. El principal reto es indudablemente aumentar su relación peso potencia, aspecto menos importante en otros sectores industriales pero que es crucial en el sector aeronáu-



aeronáutica, que resulta preciso investigar y para los que la experiencia de otros sectores industriales no sirve de precedente. Dentro de estos se encuentran, por ejemplo, los variables rangos de presión y temperatura a los que deben hacer frente y los exigentes criterios de seguridad.

### ¿QUÉ ES UNA PILA DE COMBUSTIBLE Y CUÁLES SON SUS VENTAJAS?

Al contrario de los motores de explosión que queman combustible para generar calor, convertirlo en energía mecánica y finalmente en electricidad, una pila de combustible es un dispositivo electroquímico de alto rendimiento que convierte directamente la energía química de un combustible y de un oxidante en electricidad y calor, sin combustión o generación de energía mecánica como pasos intermedios.

La reacción electroquímica se produce en el “stack” que se compone de un número dado de celdas electroquímicas conectadas eléctricamente en series. Cada celda está compuesta por dos electrodos porosos (ánodo y cátodo) separados por un electrolito, sólido o líquido, que además de ser estanco es un conductor iónico.

Existen diversos tipos de pilas de combustible, clasificadas de acuerdo con el electrolito empleado y su temperatura de trabajo. En el caso de una pila de intercambio protónico, o tipo PEM, el electrolito polimérico tiene la capacidad de conducir protones (H<sup>+</sup>) en un cierto rango de humedad y temperatura (70-200°C). En el caso de una pila de combustible de óxido sólido, SOFC, el electrolito cerámico tiene la capacidad de conducir aniones O<sup>2-</sup> en un cierto rango de temperatura (600-1000°C). En las pilas de combustible alcalinas el electrolito es una solución alcalina con conductividad de aniones OH<sup>-</sup> a temperaturas inferiores a 80°C.

tico. También es necesario determinar su fiabilidad y su comportamiento en condiciones reales de vuelo (por ejemplo a una mayor altitud, a diferentes grados de inclinación, etc.) ya que hay muchos requisitos que son exclusivos de la industria

Todos los tipos de pilas de combustible funcionan de manera similar. El combustible se alimenta al ánodo donde se oxida liberando electrones y, en el caso del hidrógeno, protones. El oxidante, generalmente oxígeno del aire, se alimenta al cátodo donde se reduce aceptando los electrones

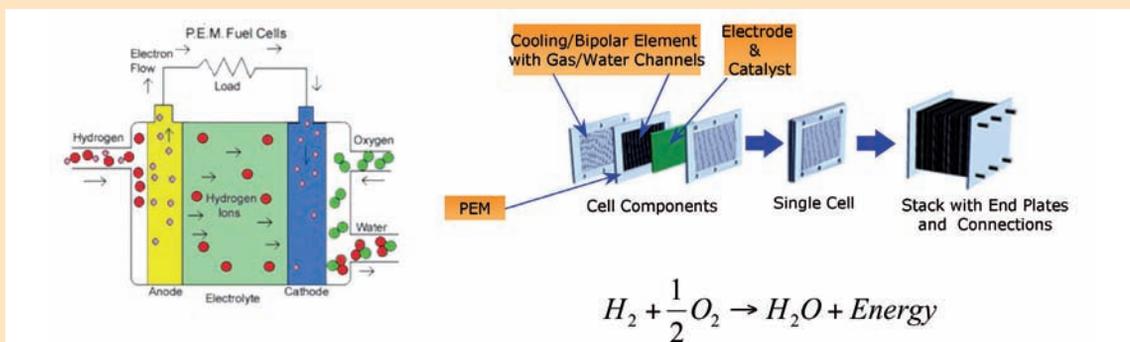


Figura 1. Funcionamiento interno de una pila de combustible tipo PEM (cortesía de Intelligent Energy).

que se transportan a través de un circuito externo. En la reacción electroquímica se produce vapor de agua, calor ya que la reacción es exotérmica y electricidad. Figura 1

Además del "stack", los sistemas auxiliares de las pilas de combustible incluyen controladores, filtros de aire, compresores, intercambiadores de calor, sensores, transductores de presión, bombas de agua, recipientes para almacenar el agua generada, racorería, valvulería y sistemas de seguridad para operar con hidrógeno, etc. Estos sistemas generalmente no están optimizados en términos de peso.

En las pilas de combustible los gases no se mezclan físicamente y además la reacción electroquímica ocurre a más baja temperatura que la reacción de combustión que se produce en los motores convencionales, por lo que se reduce la formación de óxidos de nitrógeno,  $\text{NO}_x$ . Si las pilas de combustible están alimentadas por hidrógeno, el dispositivo electroquímico no produce ninguna emisión de óxidos de carbono, como el  $\text{CO}_2$  y el  $\text{CO}$ , y su único subproducto es el vapor de agua. El efecto del vapor de agua es infinitamente menos nocivo para el medioambiente que el de cualquier gas de base carbono. Además las pilas de combustible son más silenciosas que los motores convencionales porque generalmente no contienen piezas móviles. Cabe destacar que para hacer comparaciones justas en términos de emisiones, se debe tener en cuenta el proceso de obtención del combustible, que preferiblemente ha de lograrse a partir de fuentes renovables, así como el ciclo de vida completo del producto, incluyendo su fabricación, uso y reciclaje.

Las pilas de combustible se diferencian de las baterías en que están diseñadas para permitir el reabastecimiento continuo de los reactivos consumidos; es decir, producen electricidad de una fuente externa de combustible y de oxígeno en contraposición a la capacidad limitada de almacenamiento de energía que posee una batería. Además, los electrodos en una batería reaccionan y cambian en función de su grado de carga o descarga; en cambio, en una celda de combustible los electrodos son catalíticos y relativamente estables.

### EXPERIENCIAS CON PILAS DE COMBUSTIBLE EN EL SECTOR AERONÁUTICO Y AEROESPACIAL

Aunque en las últimas décadas se han logrado los desarrollos más significativos, la tecnología de pilas de combustible fue descubierta por el científico galés William Robert Grove (1811–1896) hace 150 años [1]. En 1839, el jurista de profesión y físico de vocación hizo público un experimento que demostraba la posibilidad de generar corriente eléctrica a partir de la reacción electroquímica entre hidrógeno y oxígeno. Su original experimento

consistía en unir en serie cuatro celdas electroquímicas, cada una de las cuales estaba compuesta por un electrodo con hidrógeno y otro con oxígeno, separados por un electrolito. Grove comprobó que la reacción de oxidación del hidrógeno en el electrodo negativo combinada con la de reducción del oxígeno en el positivo generaba una corriente eléctrica. En 1889, el químico Ludwig Mond (1839–1909) y su ayudante Carl Langer (d. 1935) publicaron sus experimentos con una pila de combustible hidrógeno/oxígeno que alcanzó 6 A/ft (superficie específica del electrodo) a 0.73 V [1]. Posteriormente Friedrich Wilhelm Ostwald (1853–1932) explicaba en profundidad el funcionamiento de una pila de combustible [1]. Francis Thomas Bacon (1904–1992) estudió los electrolitos alcalinos en los años 30 y durante la segunda guerra mundial desarrolló una pila de combustible para los submarinos de la Royal Navy británica. Más tarde, en 1958, demostró el correcto funcionamiento de una pila de combustible alcalina para el Britain's National Research Development Corporation.

Aunque limitada en términos de diferentes aplicaciones, existe una larga experiencia en el uso de pilas de combustible en el ámbito espacial. Incluso se podría decir que, a pesar de que los desarrollos actuales se han centrado en otros sectores industriales, como la automoción y generación distribuida de electricidad, fue el sector aeroespacial el que sirvió como lanzadera de esta nueva tecnología en los años 60. La NASA, en colaboración con Pratt & Whitney y General Electric, desarrolló dos sistemas de generación de electricidad basados en la tecnología de las pilas de combustible para las misiones espaciales GEMINI y APOLLO [1].

Las últimas misiones GEMINI iban equipadas con pilas de combustible PEM fabricadas por General Electric. Estas misiones sirvieron para estudiar el sistema, que desafortunadamente experimentó dificultades en cuanto a su durabilidad y gestión del agua. Cuando se intentaron resolver esos problemas se decidió que en aquellos tiempos no había esperanzas de que esta tecnología compitiera con sus rivales y las inversiones en I+D se paralizaron temporalmente.

Se apostó entonces por la tecnología de pilas alcalinas en los programas espaciales ya que operaban a una temperatura similar (inferior a 80°C). Aunque todavía muy cara, la pila de combustible de Bacon probó ofrecer suficiente fiabilidad para atraer la atención de Pratt & Whitney, que le compró la tecnología para utilizarla en la misión APOLLO, que llevó al hombre a la Luna. Las pilas de combustible alcalinas (fabricadas por Pratt & Whitney) se usaron para el suministro de electricidad a bordo e incluso se llegó a consumir el agua que producían como residuo. Ahora bien, de aquella misión se concluyó que quedaba, precisamente,

mucha investigación por delante en materia de peso, fiabilidad, coste y prestaciones, pues las pilas de combustible alcalinas tuvieron serios problemas de durabilidad y sellado.

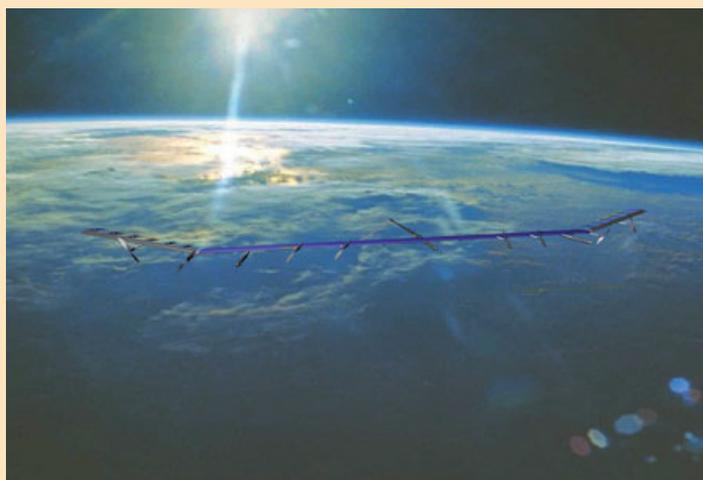
Sin embargo, desde los años 80 han sido otros sectores industriales los que más han invertido en investigación de la tecnología de pilas de combustible. El sector del automóvil ha desarrollado las PEM y el sector de generación estacionaria de energía ha desarrollado las SOFC, que todavía no ofrecen suficientes prestaciones para aplicaciones de transporte.

Los recientes desarrollos de las PEM en el sector del automóvil, y especialmente los avances en las membranas, han empujado en cierta medida a la pérdida de interés por la tecnología de pilas alcalinas en muchos sectores industriales. Sin embargo, el programa espacial sigue apoyándolas. Los sistemas del APOLLO han mejorado considerablemente y se siguen usando hoy en día como fuentes de energía en la lanzadera espacial. Así mismo, el agua producida se consume a bordo. El sistema es de UTC y utiliza hidrógeno líquido como combustible. Boeing (a través de su empresa subsidiaria Rockwell) y UTC (a través de Rocketdyne) comparten la responsabilidad de instalar el sistema de pilas de combustible así como de diseñar el sistema de propulsión de la lanzadera. Los sistemas de pilas de combustible están localizados en la parte delantera de la lanzadera. Hay tres "stacks" que trabajan como fuentes independientes de energía proporcionando 28 voltios de corriente continua, respectivamente. Cada uno de estos tres subsistemas es reusable, mide 36x38x100 cm y pesa 116 kg. Aunque la fiabilidad de estos sistemas está muy demostrada, el sector sigue interesado en la tecnología PEM. Sin embargo, el futuro de la lanzadera espacial es incierto.

Otro programa de investigación que pretendía estudiar la aplicación de pilas de combustible en el sector aeronáutico fue el Programa Helios, que se llevó a cabo en Estados Unidos entre el año 1999 y el 2003 [2]. El prototipo era una aeronave no tripulada a gran altitud (30.000 m) con configuración de ala volante propulsada por motores eléctricos. Fue desarrollada por AeroVironment en colaboración con la NASA. Se pretendía que la generación de electricidad se produjese por medio de un sistema de celdas fotovoltaicas y un sistema regenerativo de pilas de combustible. Durante el día el Helios utilizaría la energía de las celdas fotovoltaicas para la propulsión y para la producción de hidrogeno (mediante electrólisis de agua). Durante la noche el sistema trabajaría con las pilas de combustible. De esta manera el sistema podría haber llegado a operar de forma autónoma durante una semana. En el 2000 se instalaron los 62.000 paneles fotovoltaicos en una envergadura de ala de más de 75 metros. En el año 2001, el

Helios batió el record de altitud de 30.000 metros en un vuelo de 17 horas. El programa esperaba finalizar en el año 2008 pero desgraciadamente el ala se rompió cayendo en el Océano Pacífico en junio del 2003 y no llegó a volar con las pilas de combustible a bordo.

El 26 de mayo del 2005 AeroVironment realizó con éxito en Arizona los vuelos de prueba de otra plataforma aérea no tripulada desarrollada con un objetivo parecido al Helios pero sin utilizar energía solar. Fue un prototipo a escala del llamado Global Observer [3]. La plataforma aérea no tripulada contaba con una arquitectura eléctrica distribuida en la que pilas de combustible alimentadas por hidrógeno líquido proporcionaban la energía necesaria para los motores eléctricos que movían 8 hélices. El Global Observer tendrá la capacidad de permanecer a gran altitud (20.000 m) durante al menos 1 semana y contará con una carga de



pago de unos 450 kg. Los ámbitos de aplicación son el reconocimiento aéreo de zonas fronterizas, telecomunicaciones, monitorización meteorológica o medioambiental, etc.

La NASA sigue interesada en aplicaciones de reconocimiento a gran altitud de gran autonomía. DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) ha lanzado recientemente el programa VULTURE cuyo objetivo primordial es el desarrollo de un nuevo concepto de aeronave no tripulada avanzada capaz de permanecer en posición a gran altitud durante más de 5 años ininterrumpidamente para realizar misiones de inteligencia, comunicaciones, exploración y reconocimiento aéreo sobre zonas de interés [4]. En la actualidad los únicos sistemas capaces de ofrecer varios años de cobertura sobre un área fija son los satélites geosíncronicos que orbitan a 35.780 km sobre la tierra.

La novedosa plataforma aérea del proyecto VULTURE estará basada en configuraciones más

*Figura 2. Concepto de la plataforma aérea que se utilizará en el proyecto VULTURE [4].*

pesadas que el aire. No sólo ha de llevar una carga de pago cercana a los 454 kg con un consumo de 5 kW sino que ha de mantener suficiente velocidad para soportar vientos de 18.300 a 27.500 m; es decir, una aeronave con capacidad de operar casi como un satélite pero con mayor disponibilidad y cobertura, lo que constituye un reto tecnológico casi futurista. Para ello es necesario desarrollar tecnologías fiables y gestionar a bordo la energía para asegurar el éxito de las misiones de reconocimiento de gran autonomía. Tecnologías que permitan el almacenamiento de energía, el repostado o reparación en vuelo se verán favorecidas. La NASA ha descartado el uso de zeppelines o de tecnología radioactiva por lo que tanto las pilas de combustible como los paneles solares de alto rendimiento están en mente del equipo de proyecto. Las empresas seleccionadas por la NASA para la primera fase de este proyecto son Aurora Flight Sciences, Boeing y Lockheed Martin. Boeing ha seleccionado a Versa Power Systems Inc., como proveedor de pilas de combustible tipo SOFC para este proyecto. Así mismo, Boeing ha seleccionado a Qinetiq como colaborador, que utilizará la experiencia adquirida en el desarrollo del Zephyr, una aeronave no tripulada de gran altitud y gran autonomía que utiliza un sistema regenerativo. Durante el día vuela con energía solar y durante la noche vuela con la energía de baterías recargables de Litio/Sulfuro. Las baterías se recargan durante el día con la energía solar remanente. Figura 2.

Al menos cinco aviones no tripulados experimentales propulsados por pila de combustible han efectuado vuelos de baja altitud hasta la fecha de hoy.

- El modelo a escala del Global Observer de AeroVironment, EE. UU [3].

- El avión desarrollado por el Aerospace Systems Design Laboratory y el Georgia Tech. Research Institute de Georgia Institute of Technology, EE. UU, que voló en Agosto del 2006 [5].

- SpiderLion, un avión desarrollado por Navy Research Labs y Protonex Technology Corporation que voló en marzo del 2006 [6].

- HYFISH, un avión desarrollado por el instituto alemán DLR (Deutsche Raum und Luftfahrt), la empresa suiza Smartfish y Horizon Fuel Cell Technology que voló en abril del 2007 [7].

- SAE Pterosoar, desarrollado por California State University, Oklahoma State University, Horizon Fuel Cell Technology y Millennium Cell [8].

El avión HYFISH, de hélice entubada, parece ser demasiado veloz para efectuar operaciones efectivas de reconocimiento. Los otros tres aviones son también de ala fija y han sido diseñados para tener una gran autonomía. En cambio, requieren largas pistas de despegue y aterrizaje, disponen de pequeñas cargas de pago y, probablemente, no son fáciles de transportar.

Otro UAV que ha volado este verano con una pila de combustible es El Puma de AeroVironment, pero en este caso era una SOFC. El primer vuelo con autopiloto duró 7 horas mientras que con baterías la autonomía del vehículo es solamente de 2 horas de vuelo. La pila alimentada por metano y fabricada por Adaptive Materials Inc. proporcionó la energía para el motor eléctrico y para una cámara de video [9].

## LA ACTUALIDAD

Muy recientemente, investigadores e ingenieros del Departamento de Medioambiente del Centro Europeo de Investigación y Tecnología de Boeing en España (Boeing Research & Technology Europe), y colaboradores industriales y académicos principalmente europeos han llevado a cabo con éxito en el aeródromo de Ocaña (Toledo) las pruebas de vuelo de un avión eléctrico propulsado únicamente por pilas de combustible de intercambio protónico y una batería de ión litio. Este hito demuestra por primera vez en la historia de la aviación la viabilidad de un vuelo de crucero tripulado y nivelado con una pila de combustible como única fuente de energía [10]. Este proyecto forma parte de la estrategia medioambiental de Boeing, que fomenta el desarrollo progresivo de productos y tecnologías de bajo impacto medioambiental para su aplicación en la industria aeronáutica y aeroespacial. Los vuelos de prueba forman parte del programa de investigación de la compañía, que evalúa el uso potencial y los beneficios de esta tecnología sobre el medioambiente. El prototipo de avioneta eléctrica no emite CO<sub>2</sub>, ni CO u óxidos de nitrógeno, NO<sub>x</sub>. Los únicos productos de la reacción son vapor de agua y calor. Una característica adicional del prototipo es su baja huella acústica.

El avión, fabricado en material compuesto, es un motovelero (el SuperDimona HK36TTC de Diamond Aircraft Industries, Austria) de gran superficie alar (15 m<sup>2</sup>) y alto rendimiento aerodinámico (L/D=27). En el marco de este proyecto, la aeronave ha sido modificada para albergar la nueva planta de potencia. El motor convencional y el tanque de avgas se han sustituido por un motor eléctrico, la pila de combustible, las baterías, un tanque de hidrógeno gaseoso comprimido y el sistema de refrigeración que comprende tres radiadores, el intercooler y el condensador de la pila de combustible y el radiador del motor. Uno de los retos más importantes a los que se ha enfrentado el equipo del proyecto ha sido la necesidad de integrar a bordo los numerosos equipos adicionales manteniendo el peso total, la distribución de pesos y el centro de gravedad del motovelero. Es de mencionar que el prototipo realizó las pruebas de vuelo con un 10% de sobrepeso tomando como referen-

cia el peso máximo al despegue certificado para el Diamond Superdimona, lo que conlleva limitaciones operativas de velocidad y cargas. Así mismo se ha hecho un considerable esfuerzo para limitar las modificaciones externas de la aeronave con el fin de mantener su alto rendimiento aerodinámico. Otros retos importantes fueron el diseño del sistema de refrigeración, el diseño del sistema de combustible, el diseño del sistema eléctrico y, en especial, la gestión de potencia de las dos fuentes durante el despegue y ascenso.

La nueva planta de potencia está basada en un sistema híbrido de pila de combustible tipo PEM y una batería de ión litio que alimenta a un motor eléctrico de corriente continua sin escobillas que mueve una hélice de paso variable. La pila de combustible se alimenta de hidrógeno gaseoso comprimido a 350 bares y de aire, y es la fuente de energía primaria que proporciona la electricidad necesaria para un crucero nivelado. Las baterías proporcionan la energía auxiliar para las etapas de despegue y ascenso. Las dos fuentes de energía se han dimensionado para cumplir con los requisitos del estándar EASA CS-22 en términos de la distancia máxima de despegue (TOD) y del mínimo radio de ascenso (ROC), que en motoveleros debe ser superior a 1.5 m/s.

En febrero y marzo de este año se realizaron con éxito las pruebas de vuelo del demostrador. La distancia de despegue fue aproximadamente 450 m. El prototipo ascendió a una altitud de 1,066.8 m ASL a 100 km/h con una velocidad de ascenso de 1.5 m/s usando la energía de las baterías de ión litio y de la pila de combustible. Una vez alcanzada la altitud de crucero el piloto desconectó la batería. El perfil de altitud registrado en un GPS certificado por ICAO demostró que el motovelero mantuvo un crucero nivelado únicamente con la energía de la pila de combustible. Este ha sido el primer vuelo tripulado con una pila de combustible y constituye un hito importante en el camino hacia un transporte aéreo más respetuoso con el medioambiente. Los colaboradores de este proyecto son: Diamond Aircraft Industries, UQM Technologies, MT Propeller, Técnicas Aeronáuticas de Madrid (TAM), Intelligent Energy, GORE, SAFT France, Aerlyper, SENASA, Adventia, Air Liquide Spain, Swagelok, Ingeniería de Instrumentación y Control (IIC), Inventia, Universidad Politécnica de Madrid (INSIA y DIE), INDRA, Tecnobit y Comunidad Autónoma de Madrid. Figura 3.

En febrero del presente año, Airbus también dio un paso importante al presentar sus primeras ex-



periencias en pilas de combustible tipo PEM a bordo de un avión comercial de investigación [11]. El proyecto es una cooperación entre Michelin, DLR y Airbus para hacer avanzar la tecnología de combustible en los aviones civiles. La compañía realizó vuelos de prueba con un A320 que llevaba a bordo una pila de combustible de 20kW fabricada por Michelin. La energía generada por este dispositivo permitió alimentar el motor eléctrico de la bomba del circuito hidráulico del avión lo que permitió accionar los alerones, el timón y otros sistemas de control de vuelo del avión. Durante el vuelo de prueba se produjeron unos 10 litros de agua. El sistema se puso a prueba en condiciones de fuertes oscilaciones de gravedad (cargas "G"), lo que, según Airbus, confirma su robustez. El sistema fue también capaz de entregar energía eléctrica de forma instantánea a bajas temperaturas de operación.

El objetivo de estos ensayos fue la generación de energía auxiliar, totalmente distinto al objetivo del avión demostrador de Boeing, que utilizó pilas de combustible para la propulsión de un motovelero. Tanto el proyecto de Boeing como el de Airbus se presentaron en Mayo en el Salón Aeronáutico Internacional de Berlín (ILA). El proyecto de Boeing se presentó también en el Farnborough Airshow en junio.

#### PERSPECTIVAS DE FUTURO A CORTO-MEDIO PLAZO

A pesar de que, actualmente, las pilas de combustible no pueden competir en términos de peso-potencia con motores convencionales, sí parece que ofrezcan ventajas con respecto a las baterías

Figura 3. Avión demostrador de pilas de combustible de Boeing [10].

de litio polímero en aviones no tripulados (UAVs) en algunas misiones específicas. Dichas ventajas se traducen principalmente en un aumento considerable de la autonomía del vehículo. Además, la tecnología de pilas de combustible tipo PEM ofrece una ventaja muy importante en aplicaciones militares: su baja huella térmica. Para contrarrestar la baja densidad energética (kWh/kg) de los sistemas de propulsión basados en esta tecnología tan atractiva desde el punto de vista medioambiental, es fundamental que la aeronave sea muy eficiente desde el punto de vista aerodinámico.

Cabe destacar que aunque ya existen varios prototipos, los avances se han enfocado más a batir récords de permanencia que a desarrollar una plataforma aérea práctica, de fácil manejo, lanzamiento y recuperación, fácil de transportar, respetuosa con el medioambiente y con capacidad de realizar misiones de reconocimiento. Así pues, a corto plazo se esperan nuevos desarrollos enfocados a misiones de reconocimiento a baja altitud. En este sentido continuaremos pendientes de los avances de AeroVironment, Georgia Institute of Technology, Navy Research Labs, el DLR (Deutsche Raum un Luftfahrt), California State University, Oklahoma State University, BR&TE y muchos otros grupos de investigación.

A medio plazo, se esperan desarrollos enfocados a misiones de gran altitud y gran autonomía. Para ello es necesario no sólo el diseño de sistemas capaces de operar eficientemente a altitudes de 20.000 a 30.000 m sino el desarrollo de otras tecnologías que mejoren la gestión de energía a bordo. En este sentido, será interesante seguir de cerca los avances de AeroVironment y del proyecto VULTURE.

### PERSPECTIVAS DE FUTURO A LARGO PLAZO

En la última década se han llevado a cabo numerosos estudios para la incorporación de más sistemas eléctricos en aviones comerciales, que ayudan a reducir los costes y el peso ofreciendo también una mayor fiabilidad. Actualmente se resta eficiencia a los motores mediante su acoplamiento mecánico a un eje que proporciona suficiente po-

tencia para alimentar los sistemas hidráulicos, neumáticos, mecánicos y eléctricos. El rendimiento del motor de propulsión sin estos dispositivos podría alcanzar una eficiencia de hasta un 50%. Sin embargo, estos dispositivos son necesarios para el control del avión y en la arquitectura actual reducen la eficiencia de los motores a aproximadamente un 15%. El concepto del "More Electric Airplane" busca la supresión de los acoplamientos mecánicos a ejes que se sustituyen por una combinación de sistemas neumáticos y eléctricos. Además muchos de los sistemas neumáticos actuales se reemplazarían por sistemas eléctricos y habría una implantación de sistemas de generación distribuida repartidos por la aeronave. Con este cambio en la arquitectura del avión se consigue además una reducción sustancial del peso de los subsistemas, una reducción del consumo de energía secundaria (no propulsora) y una reducción de los costes de producción y mantenimiento. Figura 4.

El interés de los fabricantes de aeronaves en la tecnología de pilas de combustible radica en que estos dispositivos producen electricidad de una forma más limpia y eficiente que los motores de combustión y podrían encajar en el concepto del "More Electric Airplane".

En la actualidad se está estudiando exhaustivamente el sistema eléctrico de varios tipos de avión teniendo en mente la incorporación de la tecnología de pilas de combustible a bordo de aviones comerciales para alimentar cargas auxiliares o para sustituir baterías y turbinas en algunas aplicaciones específicas. Sin embargo la baja fiabilidad que ofrece la tecnología de pilas de combustible hoy en día, así como su baja potencia específica y los rangos de presión y temperatura tan amplios a los que están sometidos algunos de estos sistemas, no permiten contemplar la posibilidad de sustituir sistemas de emergencia, como por ejemplo la turbina RAT, por pilas de combustible a corto o medio plazo.

Una de las aplicaciones que se están empezando a considerar es el uso de pilas de combustible tipo SOFC en las APUs. La APU (Auxiliary Power Unit) es una pequeña turbina de gas que suminis-

Figura 4. Arquitecturas convencional y más eléctrica (Boeing Research & Technology Europe).

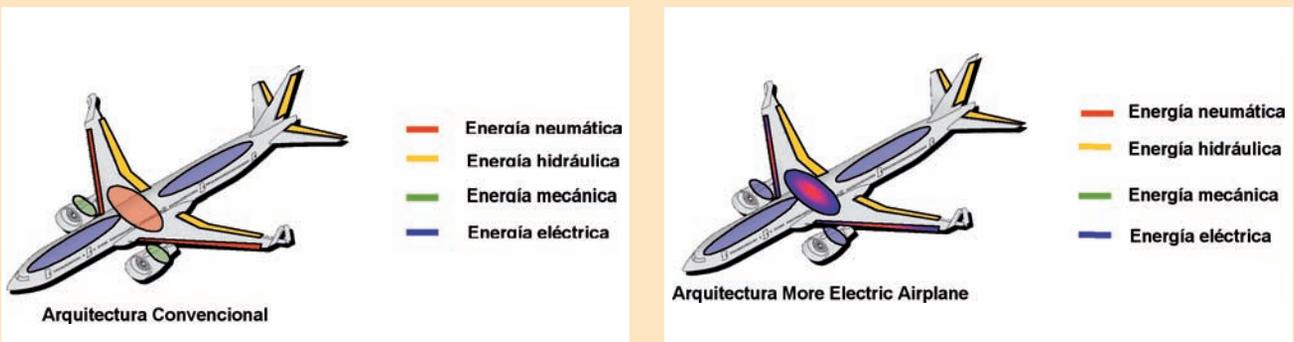
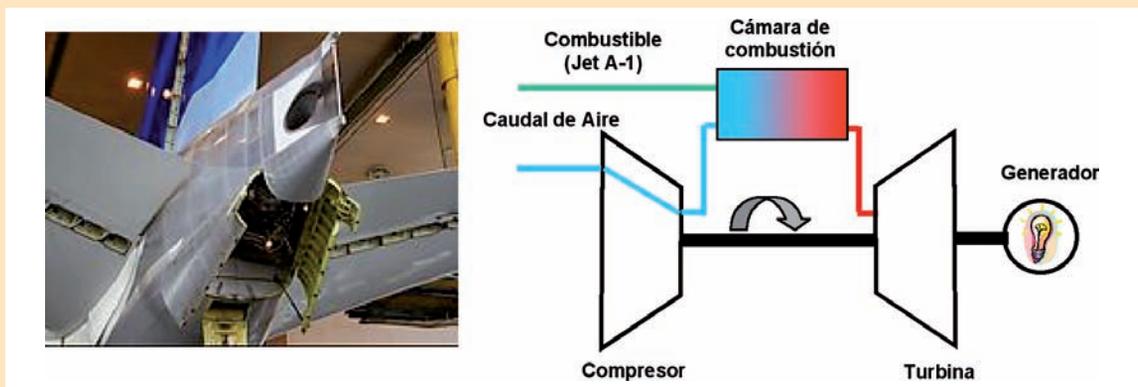


Figura 5. Unidad de potencia auxiliar (APU) (Boeing Commercial Airplanes).



tra la energía neumática necesaria para encender los motores o para alimentar el sistema de control medioambiental de cabina (aire acondicionado) así como energía eléctrica durante operaciones en tierra. La mayoría de las APUs pueden también operar en vuelo como unidades de reservas de energía eléctrica en caso de emergencia. Figura 5.

La APU consiste en un compresor, una cámara de combustión en la que se añade energía al aire que viene del compresor al quemar el combustible y una turbina, que mueve el compresor y que mueve también un generador de electricidad. La APU se puede utilizar como fuente de electricidad o como fuente de aire comprimido usándose en este caso para poner en marcha los motores principales del avión o para el acondicionamiento ambiental de la cabina de pasajeros cuando el avión está en tierra con los motores parados.

En el concepto del "More Electric Airplane" se puede plantear la sustitución de la APU por una pila de combustible que respondiera a las peticiones de electricidad que recibiera para poner en marcha los motores principales del avión, o para proporcionar la energía necesaria al sistema ambiental de la cabina de pasajeros (supuesto eléctrico) o para cualquier otra necesidad de energía (alumbrado, catering, etc.). Hay que tener en cuenta que las APU tienen un pobre rendimiento, sobre todo si se comparan a las pilas de combustible, con el consiguiente ahorro de energía y la disminución de la generación de gases de invernadero en el caso en el que se pudieran usar las pilas de combustible. Además la APU podría funcionar también en vuelo generando electricidad y agua que podría utilizarse en el sistema de agua y residuos del avión o para los sistemas anti-hielo. Esto último ayudaría a contrarrestar su más elevado peso en vuelos de largo recorrido.

Gracias a su alta temperatura de operación (700-1000°C, frente a 70 – 80°C de las PEM) las SOFC ofrecen las ventajas adicionales de la posible integración con unidades de procesamiento del combustible así como con turbinas de gas en ciclos combinados. Operando a la presión atmosférica, el máximo rendimiento de un sistema SOFC

es aproximadamente de un 45%. Sin embargo, cuando un generador SOFC y una turbina se combinan en un sistema híbrido SOFC/GT, se pueden obtener rendimientos globales del sistema de hasta un 70% debido a la mejora en el comportamiento de la pila a presiones elevadas y a la conversión del calor generado por la SOFC en potencia en la turbina. Un aumento de rendimiento en la APU conllevaría una reducción del consumo de combustible y consecuentemente una reducción de la emisión de gases de efecto invernadero tanto en los aeropuertos, donde existen tantas restricciones, como en vuelo.

Sin embargo, los requisitos de potencia de una APU en un avión tipo Boeing 737 son de 250-400KWe, dependiendo del modelo. Por desgracia la tecnología SOFC está menos avanzada que la tecnología PEM y esta aplicación por el momento se ve lejana.

## OTRAS ALTERNATIVAS

Una alternativa al uso de pilas de combustible es el uso de hidrógeno en motores convencionales. El "The Zero CO<sub>2</sub> Emissions Technology Project" fue un proyecto de investigación de NASA Glenn Research Center que comenzó en el año 2000 para explorar aviones con hidrógeno como combustible [12]. El objetivo es eliminar por completo las emisiones de CO<sub>2</sub> en la aviación civil ligera. La primera alternativa que se propuso fue la modificación de los sistemas de propulsión para que funcionasen con hidrógeno. La segunda fue el desarrollo de pilas de combustible ultraligeras. A día de hoy los resultados del proyecto permanecen confidenciales.

La NASA ya estudió aviones propulsados por hidrógeno en el año 1956 con el bombardero Martin B-57. Uno de los dos motores funcionaba con hidrógeno líquido. Los soviéticos también hicieron en 1988 un avión de pasajeros, el Tupolev Tu-154, en el que uno de los tres motores se alimentó de hidrógeno. También realizaron varias pruebas de vuelo con metano líquido como combustible para uno de los tres motores.

Los motores de combustión podrían utilizar hidrógeno para eliminar las emisiones de CO<sub>2</sub> y reducir considerablemente las emisiones de NO<sub>x</sub> mediante el uso de tecnologías que proporcionen mezclas pobres en combustible. Se emitiría por supuesto vapor de agua, cuyo impacto a altitudes de crucero inferiores a 11 Km. es menos nocivo que los gases de efecto invernadero que producen los motores convencionales alimentados por keroseno. Las aeronaves podrían disminuir la emisión de vapor de agua volando más bajo pero en detrimento del consumo de combustible. Sin embargo, el almacenamiento de hidrogeno es un reto difícil de solucionar a bordo de una aeronave. Y al igual que para usar pilas de combustible a bordo sería preciso desarrollar no sólo la infraestructura y los estándares necesarios en otros sectores industriales sino desarrollar los sistemas necesarios para asegurar que se cumplen los exigentes criterios de seguridad que requiere el sector aeronáutico.

## CONCLUSIONES

Cabe destacar que si bien en los últimos años se han llevado a cabo logros importantes, quedan todavía muchos años y considerables desarrollos técnicos, principalmente en términos de mejora de su relación peso-potencia y su fiabilidad, para que esta tecnología pase de ser una promesa a una realidad práctica y factible en la aviación. Se estima que hacen falta por lo menos 15 años de investigación y desarrollo así como importantes inversiones económicas para la aplicación de pilas de combustible como fuentes de potencia auxiliar en la aviación comercial y ni se contempla la sustitución de los motores convencionales en aviones comerciales. Sin embargo sí existen hoy en día aplicaciones nicho en las cuales las pilas de combustible pueden ofrecer ventajas competitivas con respecto a los sistemas de propulsión convencional. Nos referimos a la aviación ligera, aviación deportiva y a los aviones no tripulados.

Desde el punto de vista medioambiental, el combustible más aceptable sería el hidrógeno. Sin embargo, en la aviación la sustitución del keroseno por hidrógeno parece hoy en día inviable no sólo por el considerable reto que supone el transporte y almacenamiento de hidrógeno sino por las exigentes medidas de seguridad que requiere este sector, que conllevarían sin duda sistemas más pesados. Cabe la alternativa de reformar hidrocarburos a bordo, pero ha de mejorar la integración dinámica de los dos sistemas así como su relación peso-potencia. Además sería necesario emplear sistemas de desulfurización o hidrocarburos con más bajo contenido en azufre, para evitar la degradación de los catalizadores que se emplean en los electrodos. Igualmente, habría que desarrollar

unos estándares para la utilización tanto de hidrógeno como de las pilas de combustible en aviación que ayudasen al proceso de certificación de las aeronaves, ya que hoy en día todavía no existen.

Boeing continuará ganando experiencia práctica con esta tecnología y seguirá investigando combustibles alternativos para reducir el impacto medioambiental de la industria aeronáutica.

## REFERENCIAS

- [1] Fuel Cell Technology Handbook, Edited by Gregor Hoogers, 2003, CRC Press, ISBN 0-8493-0877-1.
- [2] HELIOS PROGRAM de AeroVironment: [http://www.avinc.com/ADC\\_Project\\_Details.asp?Pr odid=46](http://www.avinc.com/ADC_Project_Details.asp?Pr odid=46)
- [3] Global Observer de AeroVironment: [http://www.avinc.com/ADC\\_Project\\_Details.asp?Pr odid=35](http://www.avinc.com/ADC_Project_Details.asp?Pr odid=35)
- [4] VULTURE PROGRAM: [http://www.boeing.com/news/releases/2008/q2/080421d\\_pr.html](http://www.boeing.com/news/releases/2008/q2/080421d_pr.html)
- [5] Fuel Cell UAV de Georgia Institute of Technology: <http://gtresearchnews.gatech.edu/newsrelease/fuel-cell-aircraft.htm>
- [6] SpiderLion de Navy Research Labs y ProtoneX: [http://findarticles.com/p/articles/mi\\_qa5438/is\\_200603/ai\\_n21387405](http://findarticles.com/p/articles/mi_qa5438/is_200603/ai_n21387405)
- [7] HYFISH de Deutsche Raum un Luftfahrt (DLR), Smartfish y Horizon Fuel Cell Technology: <http://www.horizonfuelcell.com/hyfish.htm>
- [8] SAE Pterosoar de California State University, Oklahoma State University, Horizon Fuel Cell Technology y Millennium Cell: <http://ecotality.com/life/category/biodiesel/page/2/>
- [9] Puma de AeroVironment: [http://www.avinc.com/pr\\_detail.asp?ID=52](http://www.avinc.com/pr_detail.asp?ID=52)
- [10] Fuel Cell Demonstrator Airplane de Boeing: [http://www.boeing.com/news/releases/2008/q2/080403a\\_nr.html](http://www.boeing.com/news/releases/2008/q2/080403a_nr.html)
- [11] Airbus fuel cell demonstrator: [http://www.airbus.com/en/presscentre/pressreleases/pressreleases\\_items/08\\_05\\_26\\_a320\\_fuel\\_cell.html](http://www.airbus.com/en/presscentre/pressreleases/pressreleases_items/08_05_26_a320_fuel_cell.html)
- [12] NASA Zero CO2 Emissions Technology Project: <http://www.isset.org/nasa/nano/www.grc.nasa.gov/WWW/AERO/base/zero.htm>

*Dedicado al equipo de pilas de combustible del Departamento de Medioambiente de Boeing Research and Technology Europe, por su apoyo incondicional al proyecto del Avión Demostrador de Pilas de Combustible de Boeing.*•