

# Aplicación en vehículos no tripulados de sistemas híbridos de potencia basados en pilas de combustible

López González, Eduardo<sup>1</sup> \*, Isorna Llerena, Fernando<sup>1</sup>, Argumosa Martínez, M<sup>a</sup> Pilar<sup>1</sup>,  
Maellas Benito, Jesús<sup>1</sup>, Ridao Carlini, Miguel Ángel<sup>2</sup>, Bordons Alba, Carlos<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), Área de Energías Renovables. Emails: [lopezge@inta.es](mailto:lopezge@inta.es) (E.L.G.), [isornaf@inta.es](mailto:isornaf@inta.es) (F.I.Ll.), [argumosa@inta.es](mailto:argumosa@inta.es) (M.P.A.M.), [maellasbj@inta.es](mailto:maellasbj@inta.es) (J.M.B.)

<sup>2</sup> Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Emails: [miguelridao@us.es](mailto:miguelridao@us.es) (M.A.R.C.), [bordons@esi.us.es](mailto:bordons@esi.us.es) (C.B.A.)

\* Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: [lopezge@inta.es](mailto:lopezge@inta.es) (E.L.G.)

## Resumen:

Los vehículos no tripulados se están convirtiendo en elementos clave en numerosas misiones relacionadas con la Defensa. En estas aplicaciones, los requerimientos de la misión y las prestaciones que debe ofrecer el vehículo son criterios fundamentales a tener en cuenta a la hora de seleccionar el sistema de propulsión y almacenamiento de energía a bordo. En muchas de estas aplicaciones, los vehículos eléctricos constituyen una opción interesante, y la única disponible en ocasiones. Los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica disponibles actualmente presentan limitaciones que condicionan notablemente el tiempo de operación de estos vehículos.

Los sistemas híbridos, combinando diferentes tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica, son una alternativa para mejorar las prestaciones globales del sistema, en términos de densidad de energía y potencia, con objeto de incrementar la autonomía y las prestaciones de los vehículos no tripulados. Una de estas tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica se basa en la utilización de hidrógeno en pilas de combustibles. En el presente artículo se ofrece una revisión de aplicaciones de sistemas híbridos, basados en pilas de combustible, en vehículos no tripulados en diferentes ámbitos, así como una presentación de actividades del INTA y de la Universidad de Sevilla, relacionadas con estas aplicaciones.

**Palabras claves:** vehículos no tripulados, pila de combustible, almacenamiento de energía eléctrica, sistemas híbridos de potencia, hidrógeno

## 1 Introducción

El progresivo desarrollo de tecnologías asociadas con la robótica y el control de sistemas complejos está facilitando la introducción de robots y sistemas guiados de forma remota en numerosos campos de actuación, siendo el de la seguridad y la defensa uno de los que en mayor medida están participando en actividades de I+D relacionadas con estas tecnologías. En el área de la defensa, las principales aplicaciones en las que robots y vehículos no tripulados pueden jugar un papel cada vez más importante son fundamentalmente [1]:

- Reconocimiento y exploración del entorno, proporcionando información para la toma de decisiones y eventuales acciones.

- Vigilancia de áreas, incluyendo aquí la vigilancia e intervención en fronteras terrestres y marítimas; en aeropuertos, puertos y estaciones de ferrocarril; en edificios oficiales y en instalaciones estratégicas, como serían las relacionadas con la defensa, las energéticas, comunicaciones, etc.
- Relé de comunicaciones, desplegando robots y vehículos no tripulados que actúan de forma conjunta como nodos retransmisores de comunicaciones para garantizar las comunicaciones en misiones de defensa.

El almacenamiento de energía a bordo es un aspecto clave a tener en cuenta en el diseño y operación de estos dispositivos, ya que este almacenamiento condiciona en gran manera el comportamiento y capacidades del vehículo. Uno de los principales objetivos de estos vehículos es realizar tareas, ya sea de forma autónoma o mediante control remoto, durante largos períodos de tiempo, lo que se alcanzaría mediante la incorporación de sistemas de almacenamiento de energía que ofrezcan cada vez más y mejores prestaciones [2].

Dependiendo del tipo de vehículo y de sus condiciones de utilización, el uso de energía eléctrica puede ser una opción a tener en cuenta, o la única opción disponible. Estos vehículos eléctricos no tripulados suelen utilizar baterías de plomo ácido o ión litio. Estos sistemas basados exclusivamente en baterías presentan limitaciones, en particular en la autonomía del vehículo, y en la posibilidad de implementar actuadores con elevados consumos energéticos. Aunque las tecnologías de baterías están progresando rápidamente, la utilización de sistemas híbridos de almacenamiento de energía eléctrica, combinando dos o más métodos de almacenamiento de diferentes características, pueden mejorar sustancialmente las prestaciones globales del sistema, a la vez que se ofrece una mayor seguridad en el suministro al disponer de sistemas redundantes para el suministro de energía a los sistemas vitales de la plataforma.

En estos sistemas híbridos, la utilización conjunta de pilas de combustible con baterías y supercondensadores está tomando un creciente protagonismo en diferentes plataformas de vehículos no tripulados, tanto autónomos como pilotados de forma remota [3]. Estos sistemas híbridos de potencia con pila de combustible son objeto de proyectos de demostración en diferentes ámbitos, existiendo prototipos de UGVs, UAVs y UUVs que disponen de esta tecnología.

## **2 Aplicaciones de pilas de combustible en vehículos no tripulados**

De forma general, las principales ventajas que los sistemas híbridos basados en pilas de combustible pueden aportar al almacenamiento de energía en estas aplicaciones serían [3]:

- Incremento de la densidad de energía y potencia respecto a configuraciones basadas exclusivamente en baterías.
- Redundancia en el suministro de energía eléctrica.
- Mayor eficiencia en la utilización de la energía almacenada.
- Flexibilidad en el combustible.
- Nulas o reducidas emisiones (térmicas, acústicas, gases contaminantes o de efecto invernadero, etc.)

Las principales incertidumbres que se ciernen sobre estos sistemas se centran tanto en las pilas de combustible [3,4,5] (coste, influencia de las condiciones de operación en la vida útil de los sistemas, insuficiente densidad de potencia para ciertas aplicaciones con el estado actual de la tecnología, insuficiente desarrollo de la normativa y regulaciones aplicables, etc.) como en los sistemas de almacenamiento o producción de hidrógeno a bordo [6].

Una configuración típica de un sistema híbrido genérico, con baterías, supercondensadores y pila de combustible alimentada con hidrógeno, sería la mostrada en la Figura 1. Estos sistemas de almacenamiento y suministro de energía deben disponer de dispositivos de acondicionamiento de potencia para alimentar a las diferentes cargas existentes a bordo, incluyendo la propulsión.

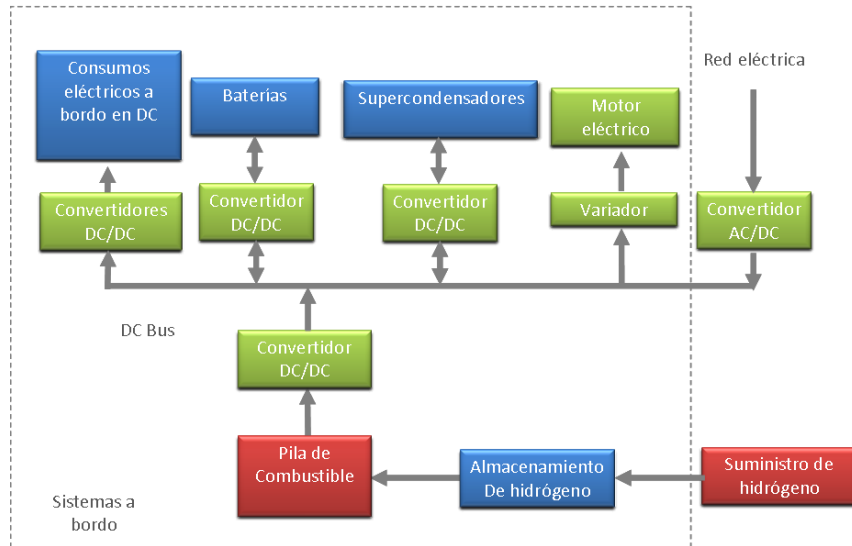


Figura 1: Configuración típica de un sistema híbrido de potencia con pila de combustible

### 2.1 Vehículos no tripulados terrestres (UGVs)

La automoción es uno de los sectores en los que la utilización de pilas de combustible, conjuntamente con hidrógeno como combustible, puede aportar más ventajas en términos de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, de contaminación atmosférica en grandes urbes, de integrar energías renovables autóctonas en el sector y reducir la dependencia energética de otros países a la vez que se incrementa la seguridad en el suministro, y de facilitar la progresiva implantación de vehículos eléctricos al incrementar la autonomía de los mismos respecto a los basados exclusivamente en baterías. Este potencial ha permitido un importante desarrollo de la tecnología, de forma que en 2015 saldrán al mercado diferentes modelos con pilas de combustible de varios fabricantes, en series limitadas de producción. Estos vehículos serán fundamentalmente híbridos, siendo sus configuraciones similares a las que se utilizan en vehículos terrestres no tripulados, en general con menores requerimientos de potencia y capacidad de almacenamiento de energía. El Departamento de Defensa norteamericano, a través de diferentes programas, ha sido particularmente activo en este campo. Así, en 2009, el robot Talon, construido por Foster-Miller y propulsado por una pila PEMFC de Protonex de 250 W demostró un incremento de rango de funcionamiento de 15 a 45 km, comparándolo con el sistema de propulsión original basado sólo en baterías [7]. La empresa Adaptive Materials y TARDEC (US Army Tank Automotive Research, Development and Engineering Center) desarrollaron y evaluaron un robot iRobot Scout UGV con un sistema de propulsión híbrido de baterías y una pila de combustible SOFC de 150 W alimentada por propano, que alcanzó una velocidad constante de 4.8 km/h durante 65 km, superando los resultados alcanzados por la versión de baterías [8]. Para solventar las dificultades asociadas a la producción o transporte del hidrógeno utilizado en las pilas de combustible hasta el lugar de uso de los UGVs, se están desarrollando proyectos que contemplan la producción de este hidrógeno en el propio vehículo, a partir de combustibles que dispongan de infraestructuras de distribución y suministro, como puede ser el gasoil [9].

### *2.2 Vehículos no tripulados submarinos (UUVs)*

En estos vehículos también se contemplan las pilas de combustible como una prometedora opción para incrementar la autonomía de los actuales sistemas de potencia, basados principalmente en baterías de ion litio. Sin embargo, para este tipo de aplicaciones, la utilización de pilas de combustible se enfrenta a retos específicos, como serían la necesidad de almacenar no sólo el combustible sino también el oxidante necesario para que la reacción electroquímica tenga lugar en estos dispositivos. Habitualmente este oxidante es oxígeno, almacenado en forma de aire a presión u obtenido a partir de otros compuestos químicos mediante reacciones controladas. Uno de los proyectos de demostración más importantes en este ámbito ha sido el URASHIMA, desarrollado en Japón, en el que Mitsubishi Heavy Industries instaló un sistema de pila de combustible en un vehículo submarino de la Agencia Japonesa de Ciencias del Mar y Tierra. Este vehículo no tripulado cuenta con el record mundial de distancia recorrida de forma continua en una misión, alcanzando 317 km en 56 horas, 800 m de profundidad y 3 nudos de velocidad, disponiendo de dos stacks de pila de combustible de polímero sólido con una potencia total de 4 kW, almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos y de oxígeno en forma líquida [10].

En Alemania, el Ministerio Federal de Educación e Investigación BMBF financió en 2004 el proyecto DeepC, desarrollado por un consorcio de empresas, universidades y centros de investigación. Este AUV cuenta con dos stacks de pila de combustible de polímero sólido de 30 celdas cada uno, con una potencia total de 3.6 kW, almacenándose los reactivos como gases a alta presión. El vehículo se diseñó para operar a 4.000 m de profundidad, en períodos de hasta 60 horas y rangos de 400 km, a 4 nudos de velocidad de crucero [11]. En Estados Unidos, DARPA financió en los años 90 un proyecto para propulsar vehículos UUV con pilas de combustible de 15 kW. El UUV fue operado satisfactoriamente durante más de 500 horas. Más recientemente, la Oficina de Investigación Naval de la Estados Unidos (ONR) está financiando un proyecto que desarrolla un sistema de pila de combustible con almacenamiento criogénico del oxígeno y el hidrógeno, destinado a un vehículo submarino no tripulado de gran desplazamiento (LDUUV en inglés), con objeto de alcanzar misiones de 70 días [11]. Otros proyectos de la Armada estadounidense en UUVs con pila de combustible se centran en la tecnología de óxido sólido [12].

### *2.3 Vehículos no tripulados aéreos (UAVs)*

Este tipo de aeronaves es objeto de un creciente interés por sus potenciales aplicaciones en el ámbito civil y militar, suponiendo un método más seguro, económico y con menor impacto ambiental cuando se trata de volar cargas ligeras en misiones aéreas. En cuanto a la seguridad, la sensibilidad social hacia la minimización de bajas humanas en misiones de riesgo es uno de los principales atractivos de estos dispositivos. Los UAVs se están aplicando a diferentes tipos de misiones, especialmente para vigilancia y reconocimiento. La mayoría de estos aviones son propulsados por motores de combustión interna o reactores. Sin embargo, la propulsión eléctrica está ganando protagonismo, especialmente en mini-UAVs y de corto alcance, aunque también se han desarrollado plataformas HALE (High Altitude, Long Endurance) con motores eléctricos. En estos sistemas de propulsión, y por las limitaciones ya mencionadas que presentan las baterías utilizadas a día de hoy, es donde las pilas de combustible pueden jugar un papel activo para incrementar la autonomía de las aeronaves, y donde se están desarrollando la mayor parte de prototipos y plataformas de demostración [13].

En cuanto a plataformas HALE, el proyecto HELIOS es uno de los más representativos. Este proyecto fue desarrollado por la NASA para aplicaciones de estudio meteorológico, y empleaba un sistema de almacenamiento de energía eléctrica en hidrógeno, que integraba la producción de hidrógeno a partir de energía solar fotovoltaica, su almacenamiento y posterior utilización en pilas de combustible de polímero sólido. El avión disponía de 38 kW de paneles fotovoltaicos, un electrolizador de 30 kW, una pila de combustible de 10 kW y una capacidad de almacenamiento de energía de 120 kWh, alcanzándose una densidad de almacenamiento de energía en masa de 450 Wh/kg. [14]. El prototipo HELIPLAT, es la versión europea del anterior UAV, también seleccionó un sistema de electrólisis a bordo. El diseño consiste de igual modo en un ala voladora. El proyecto se desarrolla en principio con el mismo objetivo que el proyecto americano de conseguir elevada altura (17-20 km) y gran autonomía [14,15].

En el terreno de los mini-UAVs, los primeros pasos se dieron en 2003 con el AeroVironment Hornet Micro Air Vehicle, subvencionado por DARPA, en el que una pila de combustible de 10 W actuaba como elemento estructural. A pesar de ofrecer una autonomía potencial notablemente superior a la versión con baterías, en los ensayos en vuelo que se realizaron solo se alcanzaron 15 minutos antes de que las membranas de la pila de combustible se secasen, lo que indicaba el gran esfuerzo de I+D que había que realizar para que esta tecnología pasase de laboratorio a aplicaciones prácticas [16]. AeroVironment ha utilizado también pilas de combustible de Protonex para desarrollar una versión con un sistema híbrido de pila de combustible y baterías de ion litio de su UAV Puma, que ha alcanzado una autonomía de 9 horas frente a las 2,5 horas de la versión con baterías [17]. Protonex ha sido particularmente activa en el desarrollo de sistemas de pilas de combustible en este campo. En 2009 obtuvo un contrato del DoD para desarrollar un sistema de pila de combustible de alta eficiencia en miniatura para UAVs, que ha sido evaluado en un avión Raven de AeroVironment, pasando de una autonomía de 1,5 horas en la versión de baterías a 3 horas cuando se utiliza el sistema de pila de combustible [18]. También de Protonex ha sido el sistema de pila de combustible utilizado por el vehículo desarrollado en el NRL (Naval Research Laboratory), el UAV Ion Tiger. Este UAV ha alcanzado una autonomía de 26 horas con una pila de combustible de polímero sólido de 550 W, utilizando hidrógeno comprimido [19]. Las pilas de combustible de óxido sólido también se han hecho un hueco en este campo, fundamentalmente gracias a la posibilidad de utilizar otros combustibles como el propano. Lockheed Martin ofrece el modelo Stalker XE, que permite más de 8 de operación frente a las 2 horas del modelo Stalker convencional [20].

Horizon Energy Systems es una empresa radicada en Singapur que ofrece sistemas de potencia, basados en pilas de combustible de polímero sólido, específicos para UAS, incluyendo diferentes opciones de almacenamiento de hidrógeno. Estos sistemas, por ejemplo, son utilizados por BlueBird Aero Systems en lo que se anunció como el primer sistema aéreo no tripulado (UAS) con pila de combustible comercialmente disponible, denominado "Boomerang". El Bluebird "Boomerang" es un UAS eléctrico de 9 kg con una autonomía de 9 horas. Este UAS de pilas de combustible ya tiene licencia para vuelos en Israel [21]. Además de aviones, también se han desarrollado proyectos de demostración del uso de pilas de combustible en minihelicópteros no tripulados. El más relevante es el realizado en 2009 por la empresa UTC en su centro tecnológico. En este proyecto se integró una pila de combustible de 1.75 kW de potencia máxima en un minihelicóptero de 10 kg GTOW, con una carga útil de 2,3 kg y un diámetro de rotor. El prototipo con pila de combustible alcanzó una autonomía de vuelo de 20 minutos, utilizando hidrógeno almacenado a 290 bar [22].

Aparte de Estados Unidos, en otros países también se están realizando proyectos de desarrollo y demostración de sistemas híbridos con pilas de combustible para su uso en vehículos aéreos no tripulados. En Israel, su Ministerio de Defensa ha financiado un proyecto de la empresa Aerospace Industries (IAI) en este ámbito, desarrollando el mini-UAV Bird Eye 650, propulsado por una pila de combustible de Horizon Energy Systems, que ha alcanzado una autonomía de 6 horas, el doble que el avión basado sólo en baterías [23]. Horizon Energy Systems también ha suministrado los sistemas de combustible utilizados por grupos de investigación en Corea del Sur y Rusia para su integración en los mini-UAVs EAV-1y CIAM-80, respectivamente. El coreano EAV-1 se basa en la plataforma RemoEye-006, y con la versión de pila de combustible alcanzó una autonomía de 5 horas, 3 horas que versión de baterías [24]. China también cuenta con proyectos de demostración de UAS con pilas de combustible, como el prototipo “Feiyue-1” desarrollado en la Universidad de Tongji, que con una envergadura de ala de 5 m y un peso de 20 kg ha sido capaz de volar en 2013 durante dos horas y media [25]. La Tabla 1 muestra de forma resumida las principales características de algunos de estos prototipos [16, 28].

<b>Integrador/Desarrollador</b>	<b>Prototipo</b>	<b>Fabricante de la pila</b>	<b>Tipo</b>	<b>Envergadura (m)</b>	<b>MTOW (kg)</b>	<b>Potencia (W)</b>	<b>Autonomía (h)</b>
Lynntech/AeroVironment	Hornet	Lynntech	PEM	0,381	0,17	---	0,25
AeroVironment	Global Observer	---	PEM	15,24	---	---	24
FH-Wiesbaden	Hy-Fly Spider-Lyon	Heliocentris	PEM	2	1,75	65	0,025
Naval Research Lab. Adaptative Materials (AMI)	---	AMI	SOFC	---	---	60	4,3
Georgia Inst. of Tech.	---	BCS	PEM	6,58	16,4	550	0,75
Cal Strate Lab.	---	Horizon	PEM	5,49	12,9	513	0,25
Smartfish/DLR	Hyfish	Horizon	PEM	1	6,1	1300	0,25
AFRL/AeroVironment	Puma	Protonex	PEM	2,6	6,5	---	9
Cal State LA/Oklahoma State Univ.	Pterosoar	Horizon	PEM	4	5	150	12
Korea Advanced Institute of Science and Tech.	---	Horizon	PEM	1,2	2	---	10
Boeing	Dimona	Intelligent Energy	PEM	16,3	841	---	0,5
AMI/AeroVironment	Puma	AMI	SOFC	2,6	---	---	7
United Technologies Research Center Adaptative Materials/Univ.of Michigan	FC Helicopter	UTC	PEM	---	---	---	---
DLR	Endurance	AMI	SOFC	1524	5,3	---	10,25
DLR	Antares	BASF	PEM	20	660	25000	5
BlueBird Aero Systems	Boomerang	Horizon	PEM	2,75	9	500	9
Naval Research Lab.	XFC	Protonex	PEM	---	---	---	6
Naval Research Lab.	Ion Tiger	Protonex	PEM	---	---	500	24
EnergyOr	Faucon2	EnergyOr	PEM	3	9	310	10

Tabla 1: Principales características de prototipos de UAV con pila de combustible

En Europa, la Comisión Europea ha financiado proyectos de I+D en este ámbito, como el Proyecto SUAV (Microtubular Solid Oxide Fuel Cell Power System development and integration into a Mini-UAV). Este proyecto tiene como objetivo diseñar, optimizar y construir un stack de 100-200 W de mini pila de combustible de óxido sólido, con objeto de integrarlo en un sistema híbrido de potencia que incluya, además del stack de pila de combustible, un banco de baterías. Otros componentes del sistema serían el procesador de combustible, para producir gas reformado a partir de propano, y otros dispositivos eléctricos, mecánicos y de control que constituyen el balance de planta del sistema. El diseño de esta mini pila vendrá condicionado por el peso y volumen disponible en el vehículo aéreo no tripulado [26]. En España, además del proyecto AVIZOR del INTA que se verá en detalle en el siguiente capítulo, cabe destacar el que están ejecutando LIFTEC, CEU-UCH y la empresa Medavia, en el que se desarrolla una pila de combustible de alta temperatura ultraligera para aviones no tripulados (UAV) de menos de 30 kilos de peso [27].

### **3 Actividades del INTA relacionadas**

El Área de Energías Renovables del INTA viene trabajando en tecnologías del hidrógeno y pilas de combustible desde hace más de 20 años, participando en numerosos proyectos nacionales y europeos. En muchos de estos proyectos se han contemplado diferentes aplicaciones de sistemas de generación de energía eléctrica basados en pilas de combustible, principalmente de polímero sólido, tanto móviles como estacionarias.

De particular interés para la utilización de pilas de combustible en vehículos autónomos son los proyectos DELFÍN y AVIZOR. El proyecto DELFÍN (Desarrollo de Vehículo Eléctrico de Baja Firma Infrarroja) es una de las actividades que se están ejecutando en el marco del Programa no agregado “Pilas de Combustible para Defensa”, financiado por el Ministerio de Defensa y desarrollado por el INTA en colaboración con el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Sevilla, y cuyo objetivo es evaluar la viabilidad de uso de pilas de combustible de polímero sólido en vehículos eléctricos terrestres, tripulados y no tripulados, en aplicaciones civiles y militares. Este proyecto se está desarrollando en varias etapas con diferentes objetivos. En una primera fase se modificó un vehículo eléctrico comercial, utilizado como plataforma de demostración, con la inclusión de un sistema de pila de combustible de 12 kW alimentado con hidrógeno, almacenado a 200 bar. Este sistema de pila de combustible de polímero sólido actuaba como sistema auxiliar de potencia (APU), permitiendo recargar las baterías originales del vehículo cuando su tensión alcanzaba un valor mínimo. De esta forma el vehículo se podía recargar en marcha en lugares sin red eléctrica. Esta solución permitió incrementar notablemente la autonomía del vehículo, pasando de los 40 km del vehículo original a unos 100 km. Adicionalmente, puesto que la pila de combustible estaba sobredimensionada respecto a la potencia requerida en el motor, se tenía la posibilidad de utilizar esta pila como un grupo generador para alimentar sistemas de comunicaciones o herramientas.

En una segunda fase, el sistema de pila de combustible se diseñó de forma modular específicamente para su integración con el sistema de propulsión del vehículo, desarrollando un sistema híbrido con baterías y supercondensadores para la gestión eficiente y optimizada entre los flujos de energías del sistema de generación de energía eléctrica a bordo (las pilas de combustible), los sistemas de almacenamiento (baterías y supercondensadores) y las cargas en el vehículo, tanto para propulsión como para otros consumos. Básicamente, este sistema híbrido consta de un bus de corriente continua al que están conectados, mediante adecuados

convertidores DC/DC uni o bidireccionales, todos estos componentes, como se mostraba en la Figura 1. Esta configuración está controlada por un sistema de supervisión y control que gestiona su operación conforme a diversos criterios: máximo rendimiento, máxima vida útil, máxima potencia, máxima autonomía, etc. Adicionalmente, el sistema de almacenamiento de hidrógeno se ha modificado, integrando un depósito a 350 bar. Este sistema híbrido se está operando para evaluar su viabilidad en vehículos eléctricos de baja potencia, hasta 5 kW, y con requisitos particulares de peso y volumen, suministrando energía tanto para propulsión como para cargas útiles, por lo que los resultados y las soluciones desarrolladas en este proyecto son aplicables a robots y vehículos terrestres no tripulados en este rango de potencia, que cubre en la actualidad gran parte de los dispositivos existentes [29,30,31,32].

El proyecto AVIZOR consiste en el desarrollo y demostración práctica de vuelo de un vehículo aéreo no tripulado con propulsión eléctrica basada en pila de combustible de polímero sólido, utilizando la plataforma SIVA (Sistema Integral de Vigilancia Aérea) desarrollada por INTA. El SIVA es un sistema formado por aviones no tripulados, capaces de realizar misiones de vigilancia y observación de forma automática. Con el proyecto AVIZOR se busca evaluar las posibilidades de estas tecnologías en este tipo de aplicaciones, en orden a reducir la detectabilidad de los vehículos, reduciendo las emisiones térmicas y acústicas, incrementar la eficiencia del sistema de propulsión y la autonomía del vehículo eléctrico, en relación con una propulsión basada exclusivamente en baterías, a la vez que se utiliza un combustible, hidrógeno, limpio y que puede ser producido localmente a partir de energías renovables.

El peso máximo del avión es de 300Kg, con una autonomía prevista de aproximadamente 1 hora, volando entre 1000 m y 3000 m. El sistema de pila de combustible tiene una potencia máxima de 27 kW, trabajando en modo dead-end (sin recirculación del combustible) y refrigeración con agua. La pila de combustible utiliza oxígeno como oxidante, evitando la utilización de compresor de aire y sistema de humidificación de gases. El sistema cuenta también con el apoyo de baterías ion-litio, capaces de aportar una potencia de 8kW durante 2 minutos. El motor eléctrico instalado tiene una potencia nominal de 30 kW.

El almacenamiento de los reactivos se realiza en forma de gas a presión. En el caso del oxígeno, este se almacena en dos depósitos a 200 bar, situados en el cono de cola. El hidrógeno se almacena a 350 bar en depósitos situados debajo de las alas. En la actualidad se está finalizando la integración de componentes y pruebas preliminares en tierra como paso previo a las pruebas en vuelo. No obstante, durante la fase de diseño y en estas pruebas preliminares, se ha comprobado que, frente a otros prototipos que se están desarrollando con fines similares, tanto el diseño del AVIZOR como las características de mecánica de vuelo no son las más adecuadas. Sin embargo, de la experiencia y los datos alcanzados en este proyecto, se obtendrá una valiosa información que permitirá definir el potencial real de estas tecnologías y su rango de aplicación en UAVs, considerando tanto el estado actual de las mismas como los previsibles avances que se alcanzarán en los próximos años en términos de densidad de potencia y energía en masa y volumen, así como en reducción de costes. [33, 34]. La Figura 2 muestra un detalle del prototipo.





Figura 2: Proyecto AVIZOR

#### **4 Conclusiones**

El presente trabajo ofrece una revisión del estado actual de sistemas híbridos de potencia basados en pilas de combustible utilizados en vehículos no tripulados, en aplicaciones terrestres, submarinas y aéreas. Se observa una importante actividad en los principales países desarrollados, especialmente en Estados Unidos, con preponderancia de prototipos de vehículos aéreos pilotados remotamente. Se prevé que el mercado y las potenciales aplicaciones de los vehículos no tripulados o tripulados remotamente crezcan notablemente en los próximos años. Sólo en aplicaciones militares en Estados Unidos, se estima que el mercado de los UAVs alcance una tasa anual de crecimiento del 12% en el período 2013-2018, con un volumen de negocio de 86500 millones de dólares en este periodo [35]. En menor medida, las aplicaciones terrestres y submarinas de vehículos no tripulados también tendrán un crecimiento sostenido en los próximos años. En este contexto, y por sus particulares características, los vehículos no tripulados con propulsión eléctrica irán adquiriendo cada vez un mayor protagonismo [36].

Las ventajas ya mencionadas que los sistemas híbridos basados en pilas de combustible pueden ofrecer en estos futuros escenarios, en particular en cuanto a incremento de autonomía en las misiones y reducción de emisiones (térmicas, acústicas, gases, etc.) se refiere, con los consiguientes beneficios operacionales y medioambientales, hace que estas tecnologías puedan jugar un importante papel en determinados nichos y aplicaciones. La idoneidad de estos sistemas deberá evaluarse en cada caso dependiendo de los requerimientos particulares de las misiones que deben realizar. Estas tecnologías se beneficiarán también de importantes sinergias entre el sector civil y militar, ya que muchas de las soluciones que se proponen para vehículos no tripulados son similares a las que se están desarrollando en sectores de gran importancia desde el punto de vista económico y tecnológico, como es el de la automoción o el de vehículos industriales.

En España se están llevando a cabo proyectos de demostración en este campo, a pesar de contar con menor apoyo de instituciones y empresas que otros países de nuestro entorno. Sería deseable que estas actividades preliminares de I+D no queden como hitos aislados, sino que permitan la creación de grupos y redes estables de investigación, conectados con la industria, que permitan posicionar favorablemente a nuestro país en un área estratégica de gran potencial de crecimiento tecnológico y económico.

## 5 Bibliografía

- [1] <http://www.hisparob.es/?q=wiki/defensa-tierra-mar-y-aire>
- [2] Visions to 2020 and Beyond: The Strategic Research Agenda for Robotics in Europe ; European Robotics Technology Platform; 07/2009
- [3] T. Gross, A. Poche and K. Ennis; Beyond Demonstration: The Role of Fuel Cells in Dod's Energy Strategy; LMI; 2011
- [4] Naval Research Laboratory, "Ion Tiger Fuel Cell Unmanned Air Vehicle," Science Daily, July 2010.
- [5] S.B. Kesner, J.S. Plante, P. Boston, T. Fabian and S. Dubowsky; Mobility and Power Feasibility of a Microbot Team System for Extraterrestrial Cave Exploration; Proceedings of the 2007 IEEE International Conference Robotics and Automation, Roma, Italy, 2007.
- [6] M.A. Rubio, A. Urquia, and S. Dormida, "Diagnosis of Performance Degradation Phenomena in PEM Fuel Cells," International Journal of Hydrogen Energy, 2009, pp. 1-5.
- [7] J. Baldic, P. Osenar, N. Lauder, P. Launie, ; Fuel cell systems for long duration electric UAVs and UGVs; Proc. Defense Transformation and Net-Centric Systems 2010, April 2010
- [8] Fuel Cells Bulletin Volume 2012, Issue 5, May 2012, Pages 4–5
- [9] Fuel Cells Bulletin Volume 2011, Issue 10, October 2011, Pages 4
- [10] O. Maeda, S. Ishiguro, K. Yokoyama, K. Hirokawa, A. Hashimoto, Y. Okuda and T. Tani; Development of Fuel Cell AUV "URASHIMA"; Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Technical Review Vol. 41 No. 6, December 2004.
- [11] A. Mendez , T. J. Leo and M. A. Herreros; Current State of Technology of Fuel Cell Power Systems for Autonomous Underwater Vehicles, Energies 2014, 7, 4676-4693
- [12] J. Keller, "Navy to Power Unmanned Underwater Vehicles with Fuel Cell Stack Technology from Delphi," Military and Aerospace Electronics, March 2010.
- [13] O. González-Espasandín, T. J. Leo and E. Navarro-Arévalo; Fuel Cells: A Real Option for Unmanned Aerial Vehicles Propulsion, Hindawi Publishing Corporation, The Scientific World Journal, Volume 2014, Article ID 497642.
- [14] Fuel Cells for Land, Sea and Air Vehicles; NATO RTO TECHNICAL REPORT TR-AVT-103; Report of the Applied Vehicle Technology Panel Fuel Cells Working Group AVT-103; May 2006
- [15] G. Romeo, E. Cestino, F. Borello and M. Pacino; Very-Long Endurance Solar Powered Autonomous UAVs: Role and Constraints for GMEs Applications; 28<sup>th</sup> International Congress of the Aeronautical Sciences – ICAS 2012; Brisbane, Australia, 2012
- [16] B. A. Moffitt; A Methodology for the Validated Design Space Exploration of Fuel Cell Powered Unmanned Aerial Vehicles; Georgia Institute of Technology, May 2010
- [17] AeroVironment Press Release, "AeroVironment Puma Small UAS Achieves Record Flight of Over Nine Hours Using Fuel Cell Battery Hybrid System," March 2008.
- [18] "SUAS Power System Considerations," presentation by Ryan Miller, Air Force Research Laboratory, March 2011.
- [19] Naval Research Laboratory, "Surveillance Vehicles Soar on Fuel Cell Power," *Spectra Magazine*, Fall 2010.
- [20] <http://www.lockheedmartin.com/us/products/stalker-uas.html>
- [21] Horizon Fuel Cell Technologies Press Release, "BlueBird Aero Systems, Horizon Unveil World's First Commercial Fuel Cell UAS," August 6, 2009.
- [22] Fuel Cells Bulletin Volume 2010, Issue 1, January 2010, Page 4.
- [23] Fuel Cells Bulletin Volume 2010, Issue 9, September 2010, Pages 4–5.
- [24] Fuel Cells Bulletin Volume 2010, Issue 12, December 2010, Page 5.
- [25] <http://www.ecns.cn/cns-wire/2012/12-31/43211.shtml>.
- [26] <http://www.suav-project.eu/SUAV.html>
- [27] J. Renau, , J. Barroso, J. Miralles, J. Martín, F. Sánchez, A Lozano and F. Barreras; Diseño y fabricación de una pila PEM de mediana potencia para unidad de potencia de un HALE UAV; Actas del Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad; Madrid, 2013.
- [28] Fuel Cells Bulletin Volume 2011, Issue 9, September 2011, Pages 4–5

- [29] C. Montero, A. Oliva, D. Marcos, E. González, C. Bordons, M.A. Ridaio, E.F. Camacho, E. López; Fuel Cell and Power Control for a Hybrid Vehicle. Experimental Results; IECON 2012 - 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society; Montreal, Canadá 2012.
- [30] J. I. León Galvan, C. Montero, D. Marcos. Naveira, M. Rodríguez, C. Bordons Alba, M. Á. Ridaio, E. Fernández Camacho, E. López, M. F. Rosa Iglesias; Practical Implementation of an Hybrid Electric-Fuel Cell Vehicle; 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2009); Oporto, Portugal 2009.
- [31] M. A. Ridaio, C. Bordons, E. López, D. Marcos; Development and Experimental Evaluation of the Control System of a Hybrid Fuel Cell Vehicle; 59th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry; Sevilla, España , 2008.
- [32] C. Bordons, M. A. Ridaio, E. López, D. Marcos, F. Isorna and F. Rosa; Development And Experimental Evaluation of the Control System of a Hybrid Fuel Cell Vehicle; I Simposium Ibérico de Hidrógeno, Pilas de Combustible y Baterías Avanzadas (HYCELTEC 2008); Bilbao, España, 2008.
- [33] E. Chacón, G. Martínez, C. Anchuelo, R. Cuevas; Unmanned Aerial Vehicle Driven by Fuel Cell Technology "AVIZOR"; 18th World Hydrogen Energy Conference 2010 - WHEC 2010; Essen, Alemania, 2010.
- [34] G. Martínez Fuente; Proyecto AVIZOR; Boletín de Observación Tecnológica en Defensa nº 26 - 1er Trimestre de 2010.
- [35] U.S. Military Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Market Forecast 2013-2018; Market Research Media Ltd, 2013.
- [36] P. Harrop, Unmanned Aerial Vehicles: Electric UAVs 2014-2024; IDTechEx ; 2014.