

Incremento de la eficiencia energética y autonomía en vehículos no tripulados mediante el uso de sistemas de energía híbridos con pila de combustible

López González, Eduardo^{1,*}, Isorna Llerena, Fernando¹, Ridao Carlini, Miguel Ángel², Bordons Alba, Carlos², Elfes, Alberto³, Hernández, Emili³

¹ Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), Área de Energías Renovables. Emails: lopezge@inta.es (E.L.G.), isornaf@inta.es (F.I.Ll.)

² Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Emails: miguelridao@us.es (M.A.R.C.), bordons@esi.us.es (C.B.A.)

³ Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Robotics Group, Autonomous Systems Lab. Emails: Alberto.Elfes@csiro.au (A.E.), Emili.Hernandez@csiro.au (E.H.) Email:

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

Abstract:

Los sistemas no tripulados están adquiriendo un creciente protagonismo en numerosas aplicaciones en el ámbito civil y militar. Uno de los factores más importantes que condicionan su uso es la autonomía que pueden ofrecer estos vehículos, siendo este factor de especial importancia en vehículos con propulsión eléctrica. Hasta ahora, la mayoría de estos sistemas utilizaban baterías como única fuente de energía eléctrica a bordo, lo que limita en ocasiones el rango de operación del vehículo.

El proyecto "Improving efficiency and operational range in low-power unmanned vehicles through the use of hybrid fuel-cell power systems" (IUFCV) tiene como objeto la evaluación de la viabilidad técnica de sistemas híbridos de potencia, basados en baterías y pilas de combustible, en aplicaciones reales de vehículos no tripulados y plataformas robóticas, comparando las prestaciones de estos sistemas de potencia con los utilizados actualmente, basados exclusivamente en baterías, en términos de disponibilidad de energía y potencia, duración de las misiones y rango operativo, peso y volumen, fiabilidad y vida útil, etc. Para ello se diseñarán e integrarán sistemas de estas características en dos plataformas existentes: un AUV (Autonomous Underwater Vehicle) y un UGV (Unmanned Ground Vehicle), de forma que se desarrollarán componentes específicos (pila de

combustible, sistema de almacenamiento de hidrógeno en hidruros complejos, sistema de almacenamiento de oxígeno y sistema de producción de oxígeno, etc.) conforme a las especificaciones de estas plataformas.

Este proyecto está cofinanciado por el programa Science for Peace and Security (SPS) de la OTAN, enfocado a fomentar la cooperación científica y la investigación entre países pertenecientes a la Alianza y terceros países. El proyecto se plantea como una colaboración entre el centro de I+D australiano CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization) y dos socios españoles, el INTA y la Universidad de Sevilla

Keywords: vehículos no tripulados, pilas de combustible, sistemas híbridos de potencia, propulsión eléctrica

1. Introducción

Los sistemas no tripulados ofrecen numerosas posibilidades en aplicaciones industriales, científicas y de seguridad gracias a su capacidad de suministrar en tiempo real datos de alta calidad a menor coste que otras técnicas convencionales. Estos sistemas permiten incrementar notablemente la capacidad de administraciones públicas, cuerpos de defensa y seguridad, organizaciones de investigación, agencias de protección del medio ambiente, empresas privadas, etc. para ejecutar un amplio abanico de misiones proporcionando recursos de vigilancia y adquisición de datos, en ocasiones sobre grandes áreas y durante períodos prolongados, a bajo coste.

Entre las diferentes tecnologías a tener en cuenta en el diseño, desarrollo y operación de plataformas no tripuladas, el almacenamiento de energía a bordo es una de las más relevantes, al condicionar en gran manera las prestaciones del vehículo [1].

En determinadas misiones y aplicaciones, la propulsión eléctrica es la única opción disponible siendo necesario en este caso disponer de adecuados sistemas de almacenamiento de energía que proporcionen, entre otros requerimientos, elevada densidad de energía y potencia en masa y volumen, elevada vida útil (ciclos de carga y descarga) y condiciones seguras de operación. En la actualidad, la mayoría de los vehículos eléctricos no tripulados disponibles en el mercado utilizan baterías, fundamentalmente de plomo ácido o ion litio. Ambas son tecnologías fiables y maduras, pero sus prestaciones, incluso en el caso de ion litio, presentan limitaciones en peso y volumen, lo que afecta a la autonomía del vehículo y a la posible implementación de sensores, actuadores y otras cargas útiles 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, se presenta a día de hoy como una interesante opción en sistemas de potencia para vehículos no tripulados, mejorando notablemente las prestaciones globales del sistema, a la vez que se ofrece una mayor seguridad en la operación, al disponer de sistemas redundantes para el suministro de energía a los sistemas vitales de la plataforma.

2. Sistemas híbridos de potencia en vehículos no tripulados

En aplicaciones móviles, los sistemas híbridos de potencia que combinan dos o más tecnologías para el almacenamiento y generación de energía han llegado a ser comerciales en automoción,

combinando motores de combustión interna con motores eléctricos alimentados con baterías. En vehículos no tripulados con propulsión eléctrica, este concepto de hibridación también aplicable, disponiéndose de un motor eléctrico que es alimentado con diferentes sistemas de almacenamiento o generación de energía eléctrica. En particular, 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. Así, en los últimos años, se han desarrollado diferentes proyectos de demostración en diferentes ámbitos, existiendo prototipos de vehículos no tripulados terrestres (UGVs), aéreos (UAVs o RPAs), submarinos (AUVs o UUVs) y de superficie (ASVs o USVs) que disponen de esta tecnología [2,3]. Sus principales ventajas frente a los vehículos eléctricos basados exclusivamente en baterías son que pueden ofrecer una mayor densidad de energía y potencia, ofrecen redundancia en el suministro de energía eléctrica y reducen la posibilidad de fallo, mejoran la eficiencia en la utilización de la energía almacenada y ofrecen la posibilidad de usar diferentes combustibles para alimentar a la pila de combustible (hidrógeno, metanol, LPG, etc.). Por el contrario, son sistemas más complejos de integrar y gestionar, siendo necesarias unos adecuados sistemas de control para garantizar su correcta operación. Habitualmente, la pila de combustible y las baterías se disponen en paralelo, con o sin convertidores DC/DC intermedios que acondicionen la energía generada en cada dispositivo. 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.

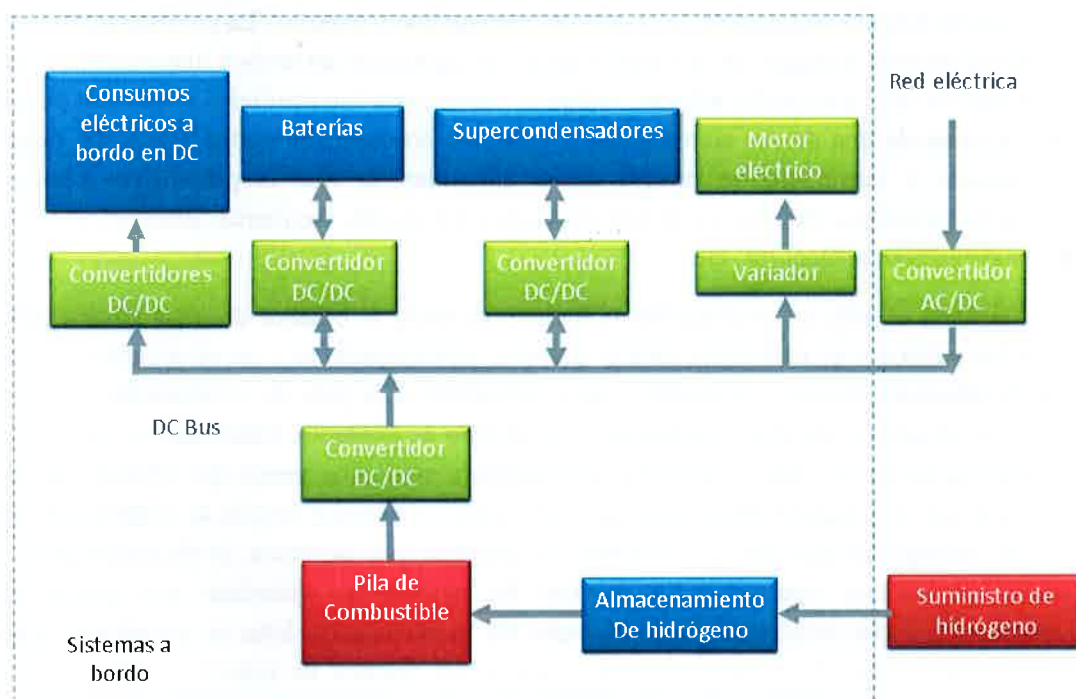


Figura 1. Configuración típica de un sistema híbrido de potencia con pila de combustible

En vehículos no tripulados, los sistemas híbridos con pilas de combustible y baterías pueden disponerse en configuraciones con sistemas de control activos (configuración convencional con convertidores DC/DC que acondicionan la tensión de salida de cada dispositivo) o pasivos (con

conexiones directas entre los componentes del sistema) [4]. La Figura 2 muestra ejemplos de ambas configuraciones, aplicadas a un UAV con baterías de ion litio, mostrando el esquema a) un sistema híbrido convencional y un sistema híbrido directo el esquema b).

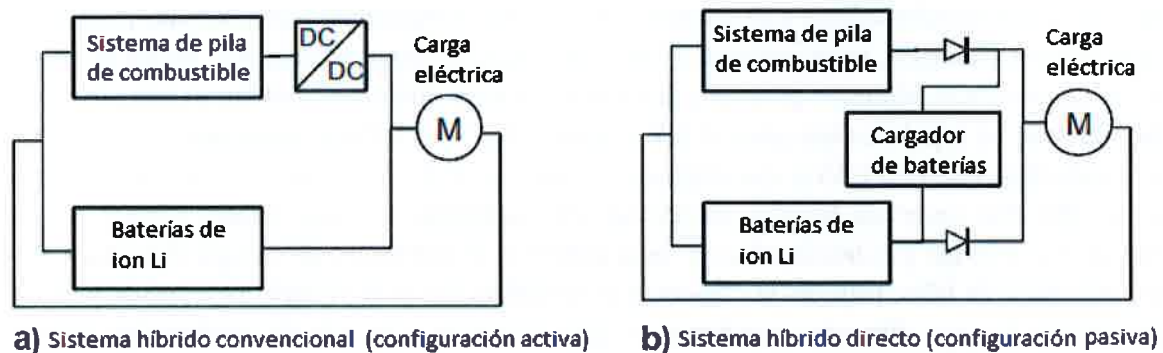


Figura 2. Configuraciones de sistemas híbridos de potencia con pilas de combustible

La elección de una configuración u otra dependerá de los requerimientos del vehículo en cuanto a potencia y energía, así como de las características del sistema de pila de combustible y baterías empleadas. La configuración pasiva, con conexión directa al bus de continua que alimenta al motor eléctrico, ofrece las ventajas de menores pérdidas, coste reducido y arquitectura simple; sin embargo, obliga a un cuidadoso diseño e integración de la pila de combustible y las baterías para garantizar un rango similar en tensión en la salida de la pila de combustible y baterías. La configuración activa con convertidores permite trabajar con un mayor rango de operación en ambos dispositivos, ya que los convertidores DC/DC permitirán adaptar cualquier variación a las condiciones del bus de corriente continua, a costa de una mayor complejidad y coste del sistema. En ambos casos, los sistemas de almacenamiento y suministro de energía deben alimentar no solo la propulsión eléctrica, sino también otros consumos eléctricos a bordo asociados a sistemas auxiliares, sensores y sistemas de guiado y navegación, actuadores, etc.

En el sistema de pila de combustible se incluye el stack; el balance de plata (BoP), compuesto por todos los subsistemas necesarios para el correcto funcionamiento y monitorización del stack; el sistema de almacenamiento y suministro de combustible a la pila de combustible, normalmente hidrógeno; y subsistema de almacenamiento y suministro de oxidante, habitualmente aire, aunque en determinadas aplicaciones como vehículos submarinos o vehículos aéreos que operan a gran altitud se requiere el uso de oxígeno almacenado a bordo. Tanto el sistema de pila de combustible como el de baterías incorporan sensores y elementos de medida que permitan la monitorización de los principales parámetros operativos, a efectos de evaluar y optimizar sus condiciones de funcionamiento, y que estas se realicen siempre de forma segura. Esto se garantiza mediante la implementación de un adecuado sistema de gestión del sistema de potencia, cuya capacidad de control sobre el mismo dependerá fundamentalmente de su configuración, activa o pasiva.

3. Descripción del proyecto

En este contexto, el proyecto “Improving efficiency and operational range in low-power unmanned vehicles through the use of hybrid fuel-cell power systems (IUFCV)” tiene como objeto la evaluación de la viabilidad técnica de sistemas híbridos de potencia, basados en baterías y pilas de combustible, en aplicaciones reales de vehículos no tripulados y plataformas robóticas, comparando

las prestaciones de estos sistemas de potencia con los utilizados actualmente, basados exclusivamente en baterías, en términos de disponibilidad de energía y potencia, duración de las misiones y rango operativo, peso y volumen, fiabilidad y vida útil, etc. Para ello se diseñarán e integrarán sistemas de estas características en dos plataformas no tripuladas existentes y operativas, una submarina y otra terrestre, de forma que se diseñarán, desarrollarán e integrarán en las mismas componentes y subsistemas específicos conforme a las especificaciones de estas plataformas.

En este proyecto participan el grupo de robótica del organismo de I+D australiano CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization), el Área de Energía del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) y el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Sevilla. INTA es responsable del diseño, desarrollo e integración del sistema de potencia basado en pila de combustible, incluyendo el almacenamiento y suministro de reactivos a estos sistemas. La Universidad de Sevilla diseñará e implementará el sistema de control y gestión de energía a bordo de las plataformas, en tanto que CSIRO es responsable del desarrollo de estas plataformas robóticas, basadas en dos prototipos existentes, de la integración final de todos los sistemas, incluyendo nuevos sensores y cargas útiles, y de la evaluación de los vehículos no tripulados en condiciones reales de operación, de acuerdo a misiones diseñadas conjuntamente con diversos usuarios finales involucrados en la propuesta, como son el Departamento de Agricultura y Pesca de Queensland (QDAF), el Instituto Australiano de Ciencia Marina (AIMS) y el grupo de Biodiversidad y Ecología de Invertebrados Marinos de la Universidad de Sevilla (BEMI-US). A continuación se detallan las principales características de ambas plataformas.

1.1. Vehículo submarino no tripulado Starbug

Este vehículo fue diseñado y construido por CSIRO para misiones de vigilancia y monitorización en aguas poco profundas, fundamentalmente en arrecifes costeros, puertos y estuarios, y lagos interiores. De hecho, esta plataforma ha sido utilizada en varias campañas de muestreo y toma de datos de parámetros ambientales y biológicos en la Gran Barrera de Coral australiana, un lugar clave para la biodiversidad a nivel mundial. Se trata de una plataforma de bajo coste, fácil de transportar y de gran maniobrabilidad, con dos cascos en forma de torpedo unidos entre sí y un casco adicional en la proa para la cámara. La Figura 3 muestra unas imágenes del vehículo.



Figura 3. Vehículo submarino no tripulado Starbug de CSIRO

En su configuración habitual, el Starbug dispone de dos cámaras para grabación en estéreo, sensor de presión, IMU, GPS, y modem acústico [5]. La Figura 4 muestra la integración de estos dispositivos en el sistema de adquisición de datos y control (SCADA) del vehículo.

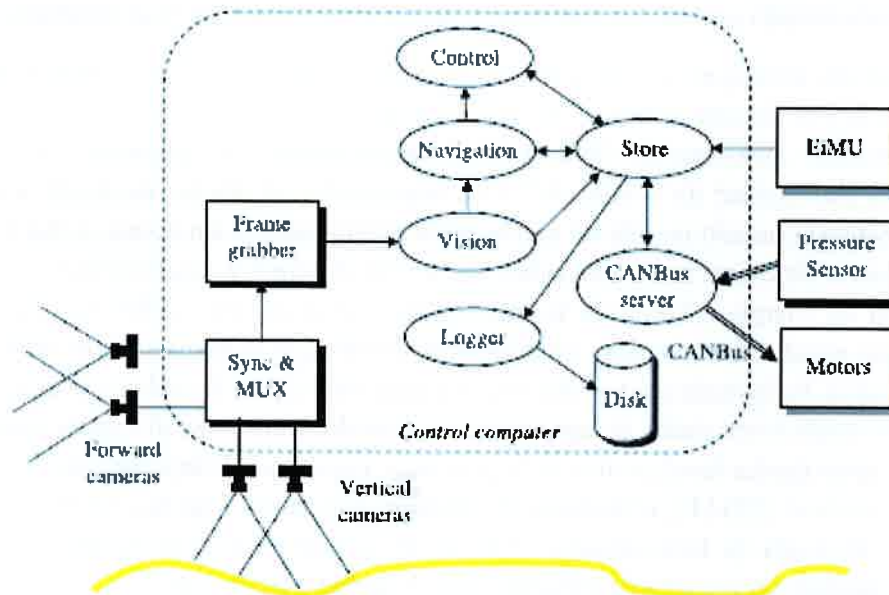


Figura 4. Sensores y sistema de adquisición de datos y control (SCADA) del Starbug

El vehículo se mueve mediante seis propulsores que permiten la traslación hacia delante, lateral y vertical, aunque la capacidad de movimiento lateral es marginal respecto a las otras dos. En la configuración actual no se utilizan superficies móviles de control, con objeto de minimizar las aperturas de los cascos y aumentar la fiabilidad del sistema. Los propulsores se controlan mediante un bus CAN, que se utiliza también para la transmisión de todas las señales suministradas por los sensores internos y externos. Sus principales especificaciones son:

- 1) Dimensiones totales: 1.20 m x 0.45 m x 0.15 m
- 2) Dimensiones de cada casco: 0.86 m (largo) x 0.15 m (diámetro)
- 3) Material del casco: aluminio
- 4) Peso: 26.00 kg
- 5) Profundidad máxima: 100 m
- 6) Velocidad máxima: 1,5 m/s
- 7) Autonomía máxima (a 0,7 m/s): 4 horas

La versión más utilizada de la plataforma cuenta con 4 baterías de 12 V de plomo ácido, con una capacidad de 6.4Ah. Aunque existen planes para remplazar esta tecnología por ion litio, esta es la configuración que se tomará como referencia en el proyecto, permitiendo la integración del sistema de potencia de pila de combustible incrementar la autonomía esperada del vehículo a 8-10 horas.

Este sistema de pila de combustible, que operaría de forma conjunta con las baterías, se compondría en este caso de un stack de pila de combustible de polímero sólido (PEFC), de una potencia estimada del orden de 400 W, operando con hidrógeno y oxígeno. El stack dispone de refrigeración líquida, siendo necesario diseñar e implementar un circuito de refrigeración que permita evacuar el calor generado por la pila de combustible al exterior del submarino. Los gases procedentes de los sistemas de almacenamiento de hidrógeno y oxígeno son debidamente acondicionados y monitorizados. El almacenamiento de hidrógeno previsto inicialmente se realizará en hidruros, metálicos o complejos como el borohidruro de sodio (NaBH_4), realizándose la selección definitiva del medio de almacenamiento en base a criterios como peso y volumen disponible para el sistema de almacenamiento en el vehículo, caudal de hidrógeno requerido, necesidades de transferencia de calor, precio, vida útil en ciclos de carga/descarga, disponibilidad comercial, logística de repostado o reciclado de los cartuchos, etc.

El almacenamiento de O_2 se realizará en una primera fase en depósitos a presión, que se ubicarán entre los dos cascos cilíndricos del vehículo actual. Esta configuración se utilizará para las pruebas preliminares del vehículo con pila de combustible. En paralelo, se desarrollará un sistema de generación in-situ de oxígeno a partir de agua oxigenada (H_2O_2), almacenada en forma líquida a bordo [6,7]. La seguridad es uno de los factores clave a tener en cuenta en el diseño, desarrollo e integración de estos sistemas, disponiéndose de diferentes medidas, como detectores de posibles fugas de hidrógeno, que eviten la formación de posibles atmósferas explosivas a bordo, garantizando la operación del vehículo en condiciones seguras.

En el caso del Starbug, se contempla una configuración activa del sistema híbrido de potencia, integrando un convertidor DC/DC que acondiciona la tensión generada en la pila de combustible, con objeto de adecuarla a la del bus de corriente continua que suministra la energía eléctrica a los motores y a todos los sistemas del vehículo. Los principales parámetros de estos subsistemas son monitorizados y registrados en un SCADA específico para el sistema de potencia, conectado a su vez con el SCADA global del vehículo, con objeto de garantizar el adecuado funcionamiento de este sistema de potencia desde el punto de vista de prestaciones, rendimiento energético y seguridad.

1.2. Vehículo terrestre no tripulado Husky

El grupo de robótica de CSIRO dispone de un UGV todoterreno modelo Husky de la empresa Clearpath. Esta plataforma se utiliza para prototipado rápido y pruebas en campo de sensores y actuadores, gracias a sus posibilidades de programación en Robot Operating System (ROS) y otros lenguajes y herramientas de amplia difusión, como Labview, C++ y Python. En la plataforma se ha integrado un brazo robótico Terabot- S, de Oceaneering International, tal y como muestra la Figura 5.

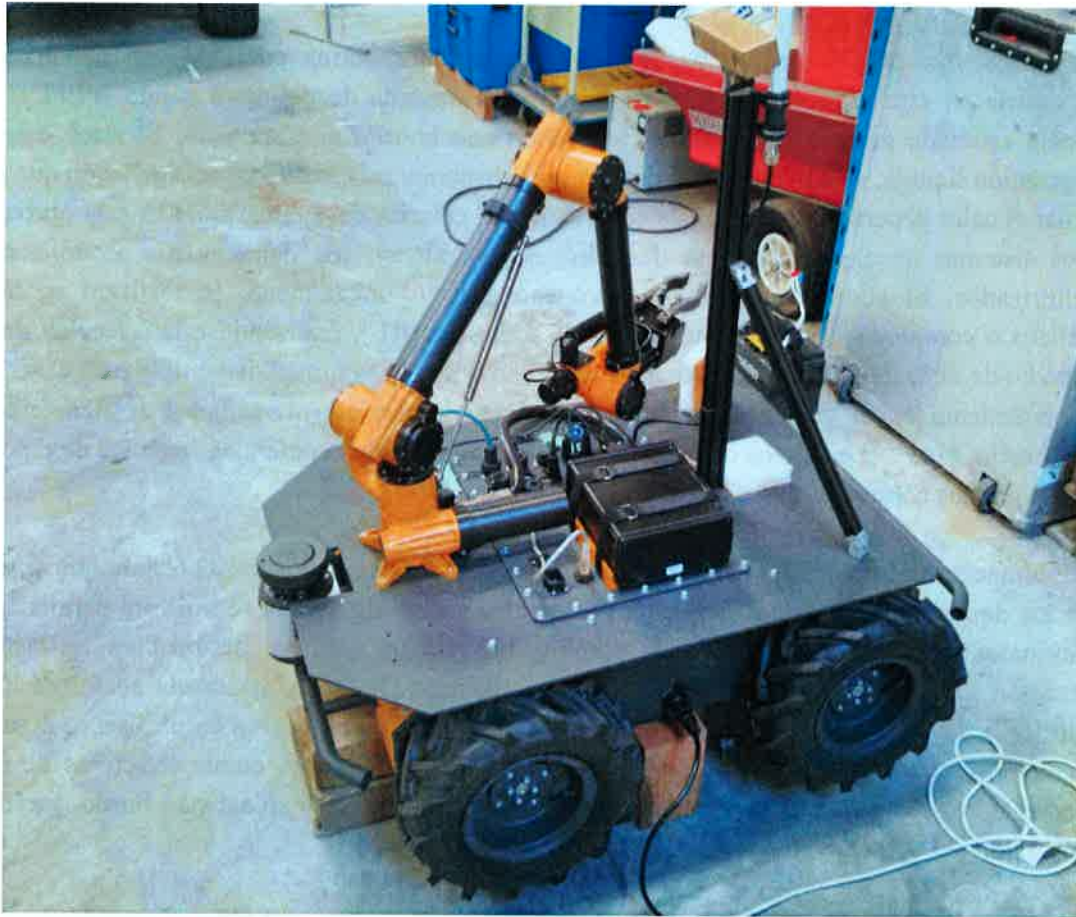


Figura 5. Plataforma Husky y brazo robótico en CSIRO

Las principales especificaciones de la plataforma Husky son, de acuerdo al fabricante Clearpath Robotics [8]:

- 1) Peso del vehículo: 50 kg
- 2) Carga útil máxima (sobre asfalto/ terreno llano): 75 kg
- 3) Carga útil máxima (todo terreno): 20 kg
- 4) Velocidad máxima: 3.6 km/h
- 5) Baterías: Plomo-ácido, 24 V y 20 Ah de capacidad
- 6) Autonomía: 3 horas nominal, 8 horas básico

Esta plataforma ha sido utilizada por CSIRO en diferentes proyectos, integrando sobre todo sensores de detección de gases para aplicaciones en minería. En estas aplicaciones se ha observado que la autonomía real de la plataforma en las condiciones de uso es significativamente menor de la esperada, lo que supone un importante hándicap a la hora de supervisar y monitorizar galerías de cierta longitud, limitando así la efectividad de la plataforma. Otras aplicaciones en las que se ha utilizado esta plataforma, como la agricultura de precisión, se ven también penalizadas por esta limitación de autonomía en el vehículo, teniendo en cuenta en particular las grandes extensiones de terreno cultivable en las que estos sistemas autónomos o no tripulados deberían operar.

En este sentido, en este proyecto se pretende incrementar la autonomía de esta plataforma hasta 6 horas de uso nominal efectivo, manteniendo sus principales capacidades en cuanto a carga útil. Para ello se diseñará, desarrollará e integrará un sistema híbrido de potencia basado en una pila de combustible de polímero sólido (PEFC) de 300 W, de cátodo abierto y refrigerada por aire. El hidrógeno para esta pila se almacenará en cartuchos de hidruros metálicos, en una configuración “plug & play”, de forma que los cartuchos vacíos se reemplazan en el lugar de uso por cartuchos cargados de hidrógeno en las instalaciones del usuario final. El oxígeno necesario para la reacción electroquímica en la pila de combustible se toma directamente del aire ambiente. Al igual que en el sistema de potencia del vehículo submarino, se dispondrán las adecuadas medidas para garantizar la operación segura del sistema, así como de un SCADA que monitorice y permita evaluar las prestaciones de este sistema de potencia.

4. Conclusiones

El proyecto “Improving efficiency and operational range in low-power unmanned vehicles through the use of hybrid fuel-cell power systems (IUFVCV)” evaluará la viabilidad técnica de sistemas híbridos de potencia, basados en baterías y pilas de combustible, en dos aplicaciones reales de vehículos no tripulados, un vehículo submarino y una plataforma terrestre. Las prestaciones de estos sistemas de potencia se compararán con los utilizados actualmente, basados exclusivamente en baterías, en términos de disponibilidad de energía y potencia, duración de las misiones y rango operativo, peso y volumen, fiabilidad y vida útil, etc. Este proyecto se desarrollará en tres años, previéndose disponer de los sistemas de potencia de ambas plataformas a principios de 2018, realizándose los ensayos en condiciones reales, que permitirán evaluar la viabilidad de estos sistemas para las aplicaciones definidas, en 2019.

Agradecimientos

El proyecto “Improving efficiency and operational range in low-power unmanned vehicles through the use of hybrid fuel-cell power systems” (IUFVCV) está cofinanciado (Ref, 985079) por el programa Science for Peace and Security (SPS) de la OTAN, cuyo objetivo es fomentar la cooperación científica y la investigación entre países pertenecientes a la Alianza y terceros países.

Referencias

1. Visions to 2020 and Beyond: The Strategic Research Agenda for Robotics in Europe; European Robotics Technology Platform; 07/2009
2. T. Gross, A. Poche and K. Ennis; Beyond Demonstration: The Role of Fuel Cells in Dod’s Energy Strategy; LMI; 2011
3. Aplicación en vehículos no tripulados de sistemas híbridos de potencia basados en pilas de combustible, DESEI+D 2014
4. A. Nishizawa, J. Kallo, O. Garrot, J. Weiss-Ungethüm; Fuel cell and Li-ion battery direct hybridization system for aircraft applications, Journal of Power Sources 222 (2013) 294-300
5. M. Dunbabin, J. Roberts, K. Usher, G. Winstanley and P. Corke, A Hybrid AUV Design for Shallow Water Reef Navigation, , Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, April 2005
6. Hasegawa S., Shimotani K., Kishi K., and Watanabe H. 2005 Electricity generation from decomposition of hydrogen peroxide Electrochem. Solid-State Lett., 8 A119-A121;

IV Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad, 2016

7. J. I. Hur and C-J Kim, Self-contained oxygen supply for self-regulating miniature fuel cell, PowerMEMS 2012, Atlanta, GA, USA, December 2012
8. <https://www.clearpathrobotics.com/husky-unmanned-ground-vehicle-robot/>, 2016