

## Pila de combustible de metanol directo aplicada a vehículos autónomos submarinos

Antonio Villalba-Herreros<sup>1</sup>, Oscar Santiago<sup>1,2</sup>, Rafael d'Amore-Domenech<sup>1</sup>, Ricardo Abad<sup>1</sup>,  
Teresa J. Leo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales, Universidad Politécnica de Madrid, Av. de la Memoria 4, 28040 Madrid, España

<sup>2</sup>Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio, Universidad Politécnica de Madrid, Plaza del Cardenal Cisneros 3, 28040 Madrid, España

**RESUMEN:** *Los Vehículos Autónomos Submarinos se han convertido en una herramienta indispensable en el ámbito submarino. El desarrollo de estos vehículos está sujeto al aumento de su autonomía, lo que no es posible con la utilización de baterías que constituyen la tecnología utilizada casi en exclusiva para su planta de energía. Sin embargo, las pilas de combustible se han identificado como un candidato idóneo para resolver este problema. Las pilas de combustible de metanol directo ofrecen la ventaja de que el combustible es un líquido estable a temperatura ambiente, pero presentan el reto de necesitar una solución para el tratamiento del dióxido de carbono producto de la reacción en la pila de combustible. Este trabajo muestra los resultados de los cálculos realizados para dimensionar un vehículo autónomo submarino dotado de una pila de combustible de metanol directo, asimismo establece los límites de aplicación debido al tamaño de los vehículos e identifica los principales retos a resolver.*

**ABSTRACT:** *Autonomous Underwater Vehicles have become an essential tool in the submarine ambit. Their development is subject to the enlargement of their endurance, but this is not possible using batteries that conform the main technology used in the power plant of these vehicles nowadays. However, fuel cells have been identified as a suitable candidate to solve this issue. Direct methanol fuel cells have the advantage that fuel is in stable liquid state at room temperature, but they present the challenge of treating the carbon dioxide produced by the fuel cell. This work presents the results of the calculations carried out to size an autonomous underwater vehicle powered by a direct methanol fuel cell, establishes the application limits due to size and weight and identifies the main challenges to solve.*

**Palabras clave:** DMFC, AUV, CO<sub>2</sub>, confinamiento

**Keywords:** DMFC, AUV, CO<sub>2</sub>, confinement

### 1. INTRODUCCIÓN

Los Vehículos Autónomos Submarinos (AUV's, por sus siglas en inglés) se han convertido en una herramienta indispensable en el ámbito submarino, tanto civil como militar.

Prácticamente la totalidad de estos vehículos cuenta con una planta de energía basada en baterías de ión-Litio confiriéndoles autonomías por debajo de las 40 horas de navegación a una velocidad media de 1,54 ms<sup>-1</sup> (3 kn). Pero las demandas de las nuevas misiones para las que se proyectan los AUV's del futuro implican mayores autonomías que no están al alcance de las baterías actuales [1].

Las mayores energía específica y densidad de energía de las pilas de combustible comparadas con las baterías hace que las primeras se hayan identificado como un buen candidato para aumentar la autonomía de los AUV's. Las necesidades de energía de estos artefactos hacen que no solo las pilas de combustible de electrolito polimérico

(PEMFC) sino también las pilas de combustible de metanol directo (DMFC) puedan satisfacer la demanda. Al ser un líquido estable a temperatura ambiente, fácil de obtener y almacenar, la utilización de metanol como combustible presenta ventajas frente a la utilización del hidrógeno, si bien el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), producto de las reacciones en la pila de combustible, presenta retos importantes que deben ser abordados.

Este trabajo describe el proceso de dimensionamiento conceptual de un AUV propulsado por una pila de combustible DMFC. Dicho AUV presenta unas características de tamaño y prestaciones que lo hacen encajar entre cierta población de AUV's del mercado.

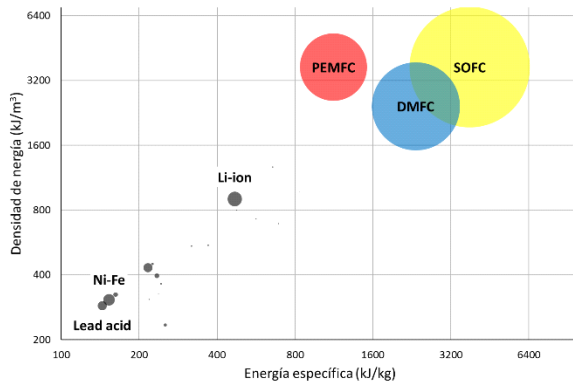


Fig. 13: Comparación de energía específica y densidad de energía de varios tipos de baterías y pilas de combustible.

## 2. EXPERIMENTAL

En este apartado se describen los pasos seguidos en el proceso de dimensionamiento del vehículo.

Se parte de una base de datos de 21 AUV's comerciales y se analizan los siguientes parámetros: tamaño, relación de aspecto, velocidad, energía almacenada y sensores embarcados por considerar que son los más significativos para tener información de las tendencias del mercado.

A partir de las curvas de Myring [2], se construye un modelo para el casco exterior del vehículo. Aplicando las reglas de American Bureau of Shipping (ABS) [3], se estima la estructura considerando el casco de presión del vehículo similar a un cilindro reforzado con cuadernas con una longitud igual a la parte cilíndrica del casco exterior y mismo diámetro.

Con la velocidad de diseño se llevan a cabo los cálculos hidrodinámicos correspondientes para estimar la potencia de propulsión necesaria.

Con ayuda de la base de datos inicial se confecciona una lista de sensores necesarios para el manejo del vehículo y el desempeño de misiones de reconocimiento del fondo marino y se establecen unos escenarios de operación obteniendo la demanda de potencia de los equipos.

La planta de energía se calcula partir de las dimensiones y masa de un stack de 100 W de potencia. La masa y el volumen del stack se ligan de forma lineal a la potencia final demandada suponiendo que se añaden más placas al stack inicial.

El cálculo de los reactantes se lleva a cabo a partir de la estequiometría de las reacciones en una DMFC con las siguientes particularidades: rendimiento de la pila de combustible 23% [4], exceso de oxígeno (O<sub>2</sub>) 25%.

Para el almacenamiento de O<sub>2</sub> se opta por O<sub>2</sub> comprimido a 350 bar a temperatura ambiente.

Con respecto al sistema de tratamiento de CO<sub>2</sub> cabe destacar que no existen en la actualidad sistemas de captura del CO<sub>2</sub> con las características de capacidad y compacidad que requieren los AUV's. Existen estudios de caracterización de materiales captadores de CO<sub>2</sub>, pero enfocados al ámbito industrial. En este caso se ha tomado la capacidad de absorción del PEI-C<sub>60</sub>, una amina soportada por un sustrato que hace que no se requiera su disolución en agua [5].

Finalmente, todos los cálculos se enlazan en un algoritmo. Los datos de entrada dicho algoritmo son: eslora  $L$ , relación de aspecto  $L/\Phi$  donde  $\Phi$  es el diámetro de la sección transversal del AUV, velocidad nominal  $v$ , autonomía  $A$ , profundidad de operación  $H$ , espesor del casco  $t$ , distancia entre cuadernas  $l$ , altura del alma de las cuadernas  $h_{sw}$ , anchura del ala de las cuadernas  $a_{sf}$ , margen máscico  $\%M$  y margen volumétrico  $\%V$ . Se define  $\%M$  como el porcentaje respecto a la masa máxima posible gracias el empuje hidrostático de la diferencia entre dicha masa máxima y la masa calculada del vehículo, y su valor debe ser positivo para que el vehículo pueda flotar. Análogamente, se define  $\%V$  como el porcentaje respecto al volumen del casco de la diferencia entre dicho volumen y la suma de los volúmenes de los diferentes componentes, y este valor debe ser positivo para poder alojar todos los componentes dentro del casco.

Para resolver los cálculos se establece la función objetivo siguiente:

$$F.O. = (\%M)^2 + (\%V)^2 + (1/v)^2 + (1/A)^2 \quad (1)$$

La minimización de la función objetivo, Ecuación (1), supone una solución con el máximo margen máscico y volumétrico y la mayor velocidad y autonomía.

Debido a que el grado de definición del vehículo no es muy elevado, en especial el sistema de tratamiento de CO<sub>2</sub>, se han establecido las siguientes restricciones a la solución:  $\%M > 10\%$  y  $\%V > 10\%$ . Estos márgenes se consideraron suficientes para contrarrestar todas las posibles desviaciones.

La autonomía objetivo se fija en 60 horas, que resulta un 50% superior a la máxima autonomía ofrecida en el mercado utilizando baterías.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio indican que es posible la aplicación de una DMFC en un AUV con las características descritas en el punto 2.

Hay que resaltar que esta solución sólo es válida para vehículos con una eslora a partir de los 4,5 m y una relación de eslora/diámetro menor de 6.5, es decir, la pila de combustible solo es embarcable en vehículos con una masa superior a una tonelada y

una relación  $L/\phi < 6,5$  que pueden ser considerados como AUV's de gran porte.

El algoritmo de cálculo arroja una autonomía de 52 horas cuando se utilizan los parámetros del AUV A18-D de Eca Group [6], el cual ofrece una autonomía de 30 horas a  $1.54 \text{ ms}^{-1}$  (3 kn), es decir, un la autonomía es un 73% superior a la inicial para las mismas prestaciones y tamaño.

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo ponen de manifiesto la posibilidad de utilizar una pila de combustible de metanol directo como planta de energía en vehículos autónomos submarinos aumentando su autonomía con respecto a una planta de energía basada en baterías.

El metanol es un líquido estable a temperatura ambiente, y esto hace que su utilización en lugar de hidrógeno simplifique la operación del vehículo.

Se deben realizar esfuerzos por mejorar las técnicas de captación de dióxido de carbono producido para disminuir el tamaño del filtro correspondiente. Este elemento es el más voluminoso del sistema e impide la aplicación de esta tecnología a AUV's de pequeño porte.

Los cálculos realizados son conservadores. Un mayor grado de definición en los componentes del AUV hará posible ampliar el espectro de aplicación de esta solución.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen a la ETSI Navales de la Universidad Politécnica de Madrid (España) la financiación parcial de este trabajo a través de la fundación SOERMAR, al Ministerio de Economía y Competitividad y a al Fondo Social Europeo a través del Proyecto de investigación ENE2014-53734-C2-2-R y a la Comunidad de Madrid y al Fondo Europeo de Desarrollo Regional a través del Proyecto de Investigación S2013MAE-2975 PILCONAER.

#### Bibliografía

- [1] A. Mendez, T.J. Leo Mena, M.A. Herreros, Current State of Technology of Fuel Cell Power Systems for Autonomous Underwater Vehicles, *Energies*. 7 (2014) 4676–4693. doi:10.3390/en7074676.
- [2] D.F. Myring, A Theoretical Study of Body Drag in Subcritical Axisymmetric Flow, *Aeronaut. Q.* 27 (1976) 186–194. doi:10.1017/S000192590000768X.
- [3] ABS, Rules for Building and Classing Underwater Vehicles, Systems and Hyperbaric Facilities, (2015) 205.
- [4] S.H. Seo, C.S. Lee, A study on the overall efficiency of direct methanol fuel cell by methanol crossover current, *Appl. Energy*. 87 (2010) 2597–2604. doi:10.1016/j.apenergy.2010.01.018.
- [5] E. Andreoli, E.P. Dillon, L. Cullum, L.B. Alemany, A.R. Barron, Cross-Linking Amine-Rich Compounds into High Performing Selective CO<sub>2</sub> Absorbents, *Sci. Rep.* 4 (2014) 7304. doi:10.1038/srep07304.
- [6] A18-D / AUV / Autonomous Underwater Vehicle | Eca Group, (n.d.). <http://www.ecagroup.com/en/solutions/a18-d-auv-autonomous-underwater-vehicle> (accessed July 7, 2017).