

## Diseño eficiente mediante algoritmo genético de placas bipolares para stacks de metanol directo con aplicaciones navales y aeronáuticas

Óscar Santiago<sup>1,2</sup>, Fernando Prado<sup>1</sup>, José Antonio Saavedra<sup>1</sup>, Rafael d'Amore-Domenech<sup>2</sup>, Antonio Villalba-Herrerros<sup>2</sup>, Miguel A. Raso<sup>3</sup>, Teresa Leo<sup>2</sup>, Emilio Navarro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio, Universidad Politécnica de Madrid, Plaza Cardenal Cisneros 3, 28040 Madrid, España.

<sup>2</sup> Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales, Universidad Politécnica de Madrid, Av. de la Memoria 4, 28040 Madrid, España.

<sup>3</sup> Facultad de C.C. Químicas, Universidad Complutense de Madrid, Plaza de Ciencias 2, 28040 Madrid, España.

**RESUMEN:** *Los vehículos aéreos y submarinos no tripulados constituyen un sector en auge. Su mercado potencial es muy amplio debido al gran número de aplicaciones que presentan estos vehículos. Sin embargo, actualmente estos dispositivos se encuentran muy limitados en su autonomía y alcance por las plantas de potencia que emplean, habitualmente baterías. Esto provoca que el tipo de misiones que pueden desempeñar sea reducido. En este contexto las pilas de combustible surgen como una posible solución para aumentar el alcance y la autonomía de los vehículos no tripulados. Gran parte del peso y del volumen de un stack de pila de combustible es debido a las placas bipolares. Por tanto, su diseño resulta fundamental en el caso de pilas de combustible destinadas a ser embarcadas en estos vehículos, donde la masa y el volumen de la carga de pago están muy restringidos. En este trabajo se ha desarrollado una herramienta basada en algoritmos genéticos que permite obtener el stack de menor peso, de menor volumen o de una menor relación de ambos. Además se comprueba que los algoritmos genéticos son un método aplicable a la optimización del diseño de stacks.*

**ABSTRACT:** *Unmanned aerial and undersea vehicles constitute a growing sector. Its potential market is very broad due to their large number of applications. However, these devices are currently constrained in range and endurance by their power plants, usually batteries. This reduces the kind of missions they can carry out. In this context, fuel cells arise as a possible solution to extend ranges and endurances of unmanned vehicles. Most of the weight and the volume of fuel cell stack is due to the bipolar plates. Therefore, the design of bipolar plates is key for fuel cells to be installed on board of such vehicles, wherein mass and volume of the payload is highly restricted. This work presents a tool that allows to obtain the configuration of the stack with lowest weight, lowest volume or lowest relation of both. In addition, it has been proved that the genetic algorithms are a suitable method for the optimization of the stack design.*

**Palabras clave:** DMFC, optimización, metodología de diseño, herramienta de diseño, placas bipolares

**Keywords:** DMFC, optimization, design methodology, design tool, bipolar plates

### 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el sector de los vehículos no tripulados, tanto aéreos como submarinos, ha experimentado un importante auge. Sus aplicaciones y posibles misiones, como el control de cultivos, la vigilancia marítima, los estudios oceanográficos o militares, entre otras, crecen cada día [1-3]. Así, el mercado potencial de este tipo de vehículos es muy amplio. Sin embargo, las actuaciones y misiones de los actuales UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) y UUVs (Unmanned Undersea Vehicles) se encuentran muy limitadas por los alcances y autonomías proporcionados por sus plantas de potencia [4]. Actualmente, estos vehículos emplean distintos tipos de baterías, fundamentalmente LiPo, Li-Ion o Ni-Cd. En este contexto se ha comenzado a investigar recientemente el posible uso de pilas de

combustible para mejorar las actuaciones de los vehículos no tripulados y ampliar así la variedad de potenciales aplicaciones de los mismos.

El peso de los equipos a bordo juega un papel fundamental en el diseño de los UAVs y UUVs. Cuanto menor sea su peso, mayor podrá ser el peso de la carga de pago o la cantidad de combustible transportada. Esto último redundaría en un aumento de la autonomía y el alcance. Además, en aplicaciones de UUVs el volumen de los equipos a bordo también es un factor importante. Al aumentar el volumen de los equipos aumenta también el volumen del propio UUV, incrementando su superficie mojada y por tanto la resistencia al avance. Del peso y del volumen depende en muchos casos la viabilidad final y el cumplimiento de la misión del vehículo desarrollado.

En los stacks de pila de combustible, el 90% del volumen, el 85% del peso y aproximadamente el 45% del coste son debidos a las placas bipolares que componen dicho stack [5]. Las placas bipolares cumplen diversas funciones relacionadas con el correcto funcionamiento del stack:

- Distribuir de forma eficiente los reactantes correspondientes a cada celda y a los electrodos, así como evacuar los productos de reacción. Para ello, las placas bipolares cuentan con una serie de colectores y canales mecanizados.
- Conducir la corriente de una celda a la contigua.
- Separar los flujos de reactantes y evitar que estos se mezclen o que existan fugas.
- Aportar rigidez estructural al stack completo.

Por lo tanto, en pilas de combustible destinadas a UAVs o UUVs el diseño de las placas bipolares resulta crucial a fin de lograr disminuir el peso y el volumen del sistema. Tratar de encontrar el punto óptimo de diseño con herramientas CFD puede ser muy complejo y costoso desde el punto de vista computacional. Así pues, sería interesante contar con una herramienta que permitiese diseñar y dimensionar el stack de menor peso, volumen o una relación de ambos en un tiempo reducido, permitiendo además su correcto funcionamiento. Este es el objetivo del presente trabajo. Para ello se ha empleado como método de optimización un algoritmo genético (GA). Los GAs se utilizan habitualmente para optimizar funciones multiobjetivo. En este caso se quiere optimizar el peso y el volumen del stack asegurando su correcto funcionamiento.

## 2. METODOLOGÍA

La función de optimización en este caso es:

$$\Phi = (\alpha \cdot f(\text{masa}) + \beta \cdot f(\text{volumen})) \cdot f(\text{fluidodinámica}) \quad (1)$$

Dentro del paréntesis se tiene la función de peso-masa que se desea optimizar, donde  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros que debe elegir el diseñador de forma que  $\alpha + \beta = 1$  y  $\alpha, \beta \geq 0$ . La función fluidodinámica situada fuera del paréntesis actúa como un filtro. Si el diseño en estudio no cumple con unas limitaciones fluidodinámicas mínimas, entonces el posible diseño se descarta.

El primer paso para obtener el stack con las características deseadas es parametrizar el diseño de la placa bipolar. En este caso se ha supuesto un patrón de distribución del flujo a los electrodos en forma de serpentin multicanal, Fig. 1. Con esta parametrización se obtiene el menor número de

variables independientes que definen la placa bipolar. Estas variables independientes componen el denominado vector de diseño que es único para cada una. Por lo tanto, matemáticamente el problema se reduce a encontrar el vector de diseño que minimice la función de optimización, Ec. (1).

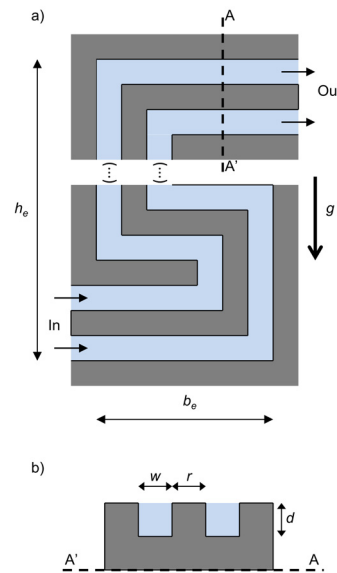


Fig. 1. Esquema de la parametrización de un serpentin multicanal.

A continuación se deben determinar los valores de las magnitudes físico-químicas propias de las sustancias involucradas en las condiciones de trabajo. Es necesario estimar por tanto las densidades y viscosidades del metanol y del oxígeno. La densidad del oxígeno se calcula suponiendo comportamiento de gas ideal, mientras que su viscosidad se estima mediante la teoría cinética de Chapman-Enskog [6]. Para el cálculo de la densidad y viscosidad de la disolución de metanol se han desarrollado sendos ajustes semi-empíricos a partir de datos experimentales publicados [7]. Las funciones resultantes dependen de la temperatura y de la concentración de metanol en la disolución.

Fijada la aplicación, la potencia e intensidad de diseño del stack son conocidas. Si además se cuenta con la curva de polarización de la pila de combustible es posible estimar los caudales de los reactantes que deben suministrarse a la pila de combustible, así como el área de los electrodos. Dicha curva de polarización puede obtenerse bien mediante la aplicación de un modelo previamente validado o por ensayos de monocelda.

El siguiente paso implicaría generalmente unas decisiones de diseño, por ejemplo, si el cátodo debe ser pasivo o activo, o qué tipo de configuración fluidodinámica debe tener el stack que se está diseñando, en U o en Z. La distribución en U permite ahorrar espacio ya que las entradas y salidas de flujos del stack están sobre una misma superficie.

Sin embargo, la distribución de caudales a las diferentes celdas es menos uniforme que con el diseño en Z. Con la herramienta desarrollada en este trabajo es posible probar las distintas configuraciones en un tiempo razonable. Así el diseñador dispone de más información para tomar las decisiones.

Es en este punto del diseño del stack cuando entra en juego el algoritmo genético. Se fijan unos límites superior e inferior para los valores de las variables incluidas en el vector de diseño. Estos son los intervalos en los que se busca el óptimo del diseño de las placas bipolares y por ello es muy importante escogerlos adecuadamente. Seguidamente y reproduciendo los pasos característicos de un algoritmo genético se genera de forma aleatoria un conjunto de vectores de diseño. Estos vectores de diseño generados evolucionarán a lo largo de una serie de iteraciones sometiéndose de forma cíclica a los procesos de selección, cruzamiento y mutación. Los valores de las variables asociadas al algoritmo genético pueden modificarse fácilmente en la herramienta desarrollada a fin de mejorar la convergencia del algoritmo. Además de incluir los operadores habituales de los algoritmos genéticos en la resolución del mismo, se incluye también un módulo elitista. La inclusión de este módulo evita que se pierdan diseños óptimos intermedios al someter a los vectores de diseño a los distintos procesos. La pérdida de óptimos es especialmente crítica en funciones de optimización no continuas como es el caso de la empleada en este trabajo debido al filtro que aplica la función fluidodinámica, Ec. (1).

Para poder comparar los distintos vectores de diseño es necesario conocer el valor de la función de optimización correspondiente a cada uno de ellos. Para ello, hay que calcular el peso y el volumen del stack a que da lugar el correspondiente vector de diseño. Además, es necesario hacer un estudio fluidodinámico de dicho stack. Este análisis persigue conocer la distribución de caudales en cada celda, la caída de presión en cada celda y colector, así como en el stack completo y conocer la velocidad de los fluidos en cada celda. Fijados unos valores mínimos de las variables fluidodinámicas es posible decidir si un vector de diseño se acepta o desecha. La resolución de las ecuaciones fluidodinámica del stack permite asegurar el correcto funcionamiento del mismo. Así, en un diseño correcto, el punto con menor velocidad de la disolución de metanol tendrá que ser tal que aun así permita arrastrar las burbujas de CO<sub>2</sub>. Para resolver las ecuaciones fluidodinámica del stack se emplea un proceso recurrente en el cual se tienen en cuenta las pérdidas de presión por fricción, por gravedad y por la presencia de codos en la configuración en estudio [8,9].

Una vez terminadas las iteraciones del algoritmo genético, se selecciona el vector de diseño de esta generación que presenta un menor valor de la función de optimización. Ese vector es el mejor diseño que se ha alcanzado al ejecutar el algoritmo genético. Cabe mencionar que el algoritmo genético es un proceso fuertemente estocástico. Por lo tanto, si el mismo algoritmo genético se ejecuta dos veces seguidas con las mismas variables de entrada, las soluciones finales serán probablemente similares, pero distintas.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig. 2 se presenta la primera pantalla de la herramienta desarrollada, en la cual se puede seleccionar el tipo de configuración de stack que se desea resolver. Se tienen cuatro opciones según el tipo de flujo, en U o en Z, y dependiendo de si el cátodo es activo o pasivo.

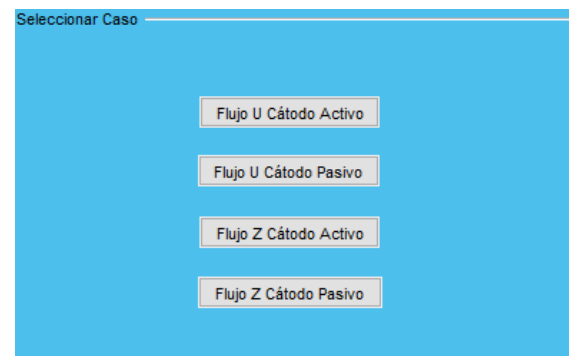


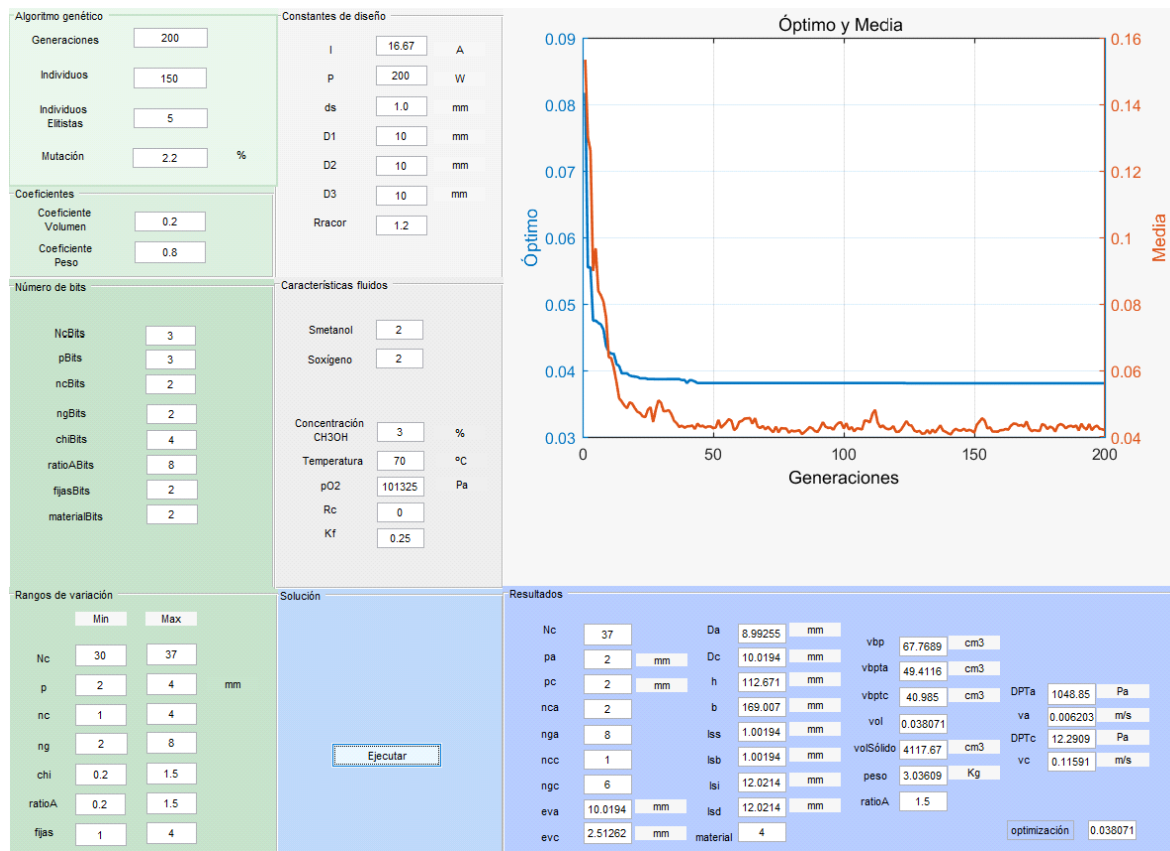
Fig. 2. Primera pantalla de la herramienta desarrollada en la que puede elegirse el tipo de configuración que se desea resolver.

En la Fig. 3 se muestra un caso de prueba para una configuración “Flujo en U y Cátodo Pasivo”.

### 4. CONCLUSIONES

La herramienta de diseño de stacks DMFC desarrollada en este trabajo permite obtener el stack de menor peso, de menor volumen o de una menor relación de ambos de forma rápida (uno pocos minutos). Además, puede trabajar con cuatro tipos de configuraciones diferentes dependiendo de la configuración del flujo, en U o Z, y de que el cátodo sea activo o pasivo.

Gracias al corto tiempo de ejecución de la herramienta, es posible realizar diversas pruebas a fin de obtener los diferentes resultados que proporcionan distintas funciones de optimización así como distintas configuraciones. Además, permite analizar cuáles son las variables más influyentes en el diseño del stack



**Fig. 3.** Caso de prueba resuelto para la configuración “Flujo en U y Cátodo Pasivo”. Puede verse la evolución del valor de la función de optimización del mejor diseño en cada iteración. También puede verse cómo disminuye la media del valor de la función de optimización en cada generación.

Con este trabajo se muestra también la viabilidad del uso de algoritmos genéticos en la optimización del diseño de stacks de pila de combustible. Sin embargo, debido a la gran cantidad de variables que intervienen, a la dificultad intrínseca del problema y a la no continuidad de la función de optimización es necesario incluir un módulo elitista a fin de mejorar la convergencia del algoritmo.

### Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación parcial de este trabajo al Ministerio de Economía y Competitividad y 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] Fuel Cells Bulletin 6 (2015) 4.
- [2] Fuel Cells Bulletin 8 (2015) 3.
- [3] J.B. Lakeman, A. Rose, K.D. Pointon, D.J. Browning, K.V. Lovell, S.C. Waring, J.A. Horsfall, J. Power Sources 162 (2006) 765-72.
- [4] M. Gadalla, S. Zafar, Int. J. Hydrogen Energy 41 (2016) 6422-32.
- [5] Y.C. Park, S.H. Lee, S.K. Kim, S. Lim, D.H. Jung, D.Y. Lee, S.Y. Choi, H. Ji, D.H. Peck, Int. J. Hydrogen Energy 35 (2010) 4320-8.
- [6] R.C. Reid, J.M. Prausnitz, B.E. Poling. The Properties of Gases & Liquid. 4<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill: Singapore, 1987, 388-485.
- [7] S.Z. Mikhail, W.R. Kimel, J. Chem. Eng. Data 6 (1961) 533-7.
- [8] J. Koh, H. Seo, C. Lee, Y. Yoo, H. Lim, J. Power Sources 115 (2003) 54-65.
- [9] S. Maharudrayya, S. Jayanti, A.P. Deshpande, J. Power Sources 138 (2004) 1-13.