

ANÁLISIS DE LAS POSIBILIDADES DE USO DE LAS CÉLULAS DE COMBUSTIBLE EN BUQUES.

*José J. de Troya Calatayud – Ing. Naval – Universidad de La Coruña
Luis Carral Couce - Doctor Ing. Naval - Universidad de La Coruña
José A. Fraguela Formoso - Doctor Ing. Naval - Universidad de La Coruña
Raúl Villa Caro - Ing. Naval - Universidad de La Coruña*

0.- Resumen

El modelo energético actual, basado en los combustibles fósiles, presenta serios problemas de sostenibilidad. Por ello, resulta evidente la necesidad de buscar nuevas alternativas energéticas. La escasez de petróleo, con su consecuente encarecimiento, y la normativa ambiental de emisiones, cada vez más restrictiva, hacen del hidrógeno un vector energético atractivo.

Tanto en el ámbito estacionario como en la industria del automóvil, se han realizado avances importantes. La obtención de electricidad a partir de la combinación del oxígeno con el hidrógeno ha dado lugar a la pila de combustible, existiendo múltiples tipos en función de sus diferentes aplicaciones.

Las células de combustible poseen un gran potencial en su uso a bordo. Los posibles campos de aplicación tanto en barcos mercantes como en buques de guerra se pueden resumir en: generación de energía eléctrica ya sea de emergencia o distribución al buque, sobre todo en aguas y puertos con regulaciones medioambientales particulares, potencias pequeñas para propulsión en modos especiales (por ejemplo silencio), y si se demanda, el suministro de energía eléctrica en buques equipados con propulsión eléctrica.

Otro campo de interés que no se va a tratar en este artículo es la propulsión independiente del aire (AIP Air Independent Propulsion) muy importante en submarinos.

1.- Introducción.

Los limitados recursos naturales y un aumento de la conciencia medioambiental han causado un incremento importante de nuevos sistemas de propulsión y generación eléctrica en estos últimos años. Un papel importante lo han tenido las

células de combustible dado su desarrollo potencial. Las ventajas de las células de combustible para sistemas de propulsión independientes del aire en submarinos están ampliamente reconocidas. En el caso de buques de superficie, particularmente en el de los buques mercantes, el uso masivo de células de combustible se ha demorado probablemente hasta que los costes y la fiabilidad técnica vayan a la par de los sistemas de propulsión más convencionales.

La célula de combustible, “fuel cell”, es un convertidor electroquímico directo de energía. Transforma la energía química de ciertos compuestos directamente en energía eléctrica. Dicha transformación la realiza sin recurrir a un ciclo termodinámico, por lo que no está sujeta al límite de Carnot. La figura 1 ilustra de forma esquemática el comportamiento de una pila tipo PEMFC.

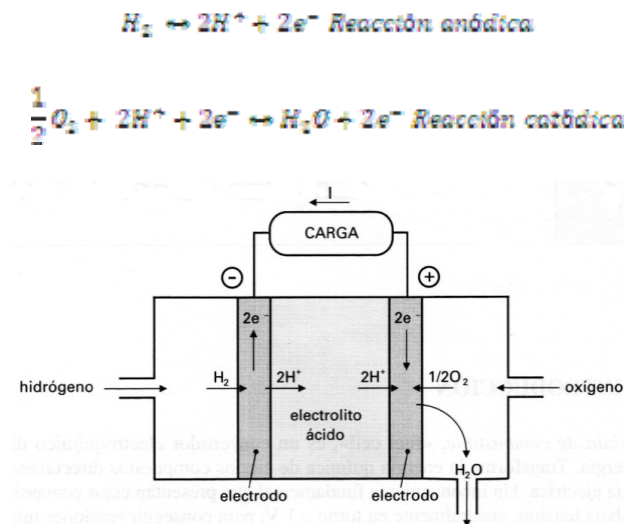


Figura 1.- Célula de combustible.

2.- Clasificación.

El criterio de clasificación más común es el que hace referencia al electrolito utilizado. Se clasifican en los siguientes tipos:

- AFC, pila de combustible alcalina “Alkaline Fuel Cell”.
- PEMFC, pila de combustible de membrana intercambiadora de protones “Proton Exchange Membrana Fuel Cell”.

- DMFC, pila de combustible de metanol “Direct Methanol Fuel Cell”.
- PAFC, pila de combustible de ácido fosfórico “Phosphoric Acid Fuel Cell”.
- MCFC, pila de combustible de carbonato fundido “Molten Carbonate Fuel Cell”.
- SOFC, pila de combustible de óxido sólido “Solid Oxide Fuel Cell”.

No obstante, esta clasificación admite otra división más genérica muy común en toda la literatura. Esta se refiere a la temperatura de operación de las pilas y las engloba en dos grandes grupos:

- Pilas de combustible de baja temperatura (trabajan a unos 80 °C): AFC, PEMFC y DMFC.
- Pilas de combustible de temperatura intermedia (trabajan a unos 200 °C): PAFC
- Pilas de combustible de alta temperatura (su temperatura de trabajo se sitúa entre 650 y 1000 °C): MCFC y SOFC.

Además existe otra clasificación que las divide según su utilización en *estáticas* y *portátiles*.

3. Análisis de los diferentes tipos.

3.1.- Pila de combustible alcalina, “Alkaline Fuel Cell” (AFC).

Son pilas de baja temperatura que funcionan según los fundamentos de las pilas de combustible básicas o alcalinas, esto es, la reacción se produce gracias a los grupos hidroxilos. El electrolito es un álcali generalmente hidróxido potásico (KOH) en disolución acuosa, en concentraciones del 30 al 35% en peso y una temperatura comprendida entre los 60 y los 100 °C. Tienen el inconveniente de

que el electrolito reacciona con el CO_2 , que podría llegarle a través de impurezas en el O_2 o en el H_2 , lo que no permite emplear directamente aire para aportar O_2 ni el reformado de un combustible para aportar H_2 .

Las AFC no toleran ni siquiera bajas concentraciones de CO_2 . Por encima de 50 ppm el CO_2 reacciona químicamente con el electrolito alcalino para obturar irreversiblemente el electrolito y los electrodos con los carbonatos sólidos formados en la reacción. Teniendo en cuenta su aplicación al automóvil, buque o cualquier medio de transporte, el hidrógeno puro tendría que ser almacenado a bordo, y el aire, prácticamente la única fuente para el O_2 requerido, tendría que ser purgado para eliminar el CO_2 mediante un limpiador químico. Un combustible carbonáceo como el metanol obtenido recién salido de un reformador, no podría ser usado.

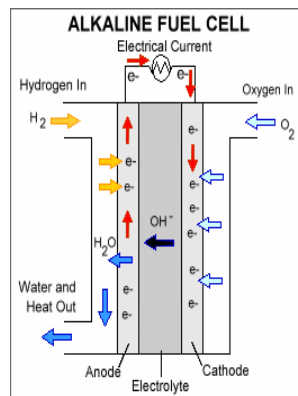


Figura 2 - Pila AFC.

Las principales aplicaciones de las AFC son en el espacio y en mucha menor medida en la automoción, donde han sido reemplazadas rápidamente por las pilas de polímero sólido.

3.2.- Pilas de polímeros sólidos (PEMFC)

Las PEMFC utilizan un electrolito formado por una matriz polimérica que está unida a grupos funcionales capaces de intercambiar cationes y aniones. En general el electrolito es un ácido con un grupo sulfónico incorporado en la matriz, que es capaz de transportar iones H^+ , mientras que el anión es inmovilizado por la estructura del polímero. Por lo tanto en estas celdas ocurren las mismas reacciones que en las celdas de electrolito ácido.

Las celdas de combustible de membrana de electrolito polimérico tienen la ventaja de que son más simples y compactas que otros tipos de celdas, y además no necesitan reservas de electrolito ni recirculación. La temperatura de operación oscila en un intervalo de 60 a 130 °C.

Por otro lado, el funcionamiento de las PEMFC a bajas temperaturas hace que la cinética de las reacciones electroquímicas sea más difícil. Debido a esto es necesario utilizar materiales electrocatalizadores. Los materiales más utilizados suelen ser metales preciosos como platino o rutenio, lo que conlleva un aumento del coste de la pila. Además el combustible se restringe casi exclusivamente a hidrógeno de elevada pureza; si se quisiese utilizar cualquier otro combustible, como gasolina, gas natural, etc., éste debería pasar por una etapa previa de reformado para producir hidrógeno.



Figura 3.- Módulo comercial NEXA™ de Ballard (1,2 kW).

Las principales aplicaciones de las PEMFC son diversas, aunque destacan principalmente su uso en automóviles. Prácticamente la totalidad de los prototipos de automóviles que funcionan con pilas de combustibles utilizan esta tecnología. Además empieza a ganar terreno su uso en el ámbito residencial y doméstico para la producción de electricidad y agua caliente. La principal productora de PEMFC en el mundo es la compañía canadiense Ballard Power Systems.

Las PEMFC son producidas en unidades pequeñas de hasta 100 kW y son usadas para suministro de energía eléctrica.

Una variante de las células PEMFC son las HTPEM (High Temperature PEM) con una novedosa membrana que puede soportar temperaturas hasta 200°C. Esta temperatura más alta permite una disposición de la planta más sencilla. Las HTPEM tienen mayor tolerancia al CO, y por tanto son más aptas para el uso con combustibles reformados (metanol, gas natural y etanol)

Las HTPEM se disponen en módulos independientes normalmente de 5-15 kW, con pequeñas unidades de reformado incorporadas. Los módulos se ensamblan fácilmente en grandes conjuntos de potencia, que pueden llegar hasta 1MW. Estas tecnologías son más compactas que las tecnologías de alta temperatura MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) y SOFC (Solid Oxide Fuel Cell).



Figura 4.- Ferry FCS Alsterwasser

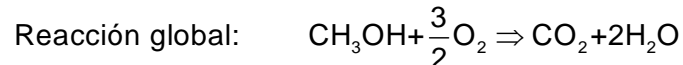
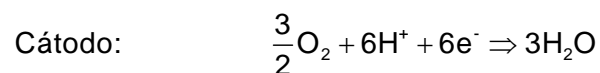
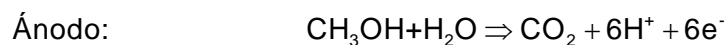
En submarinos, yates, ferris y embarcaciones de recreo se han utilizado PEMFC funcionando con hidrógeno. Como ejemplo se puede mencionar las 2x50 kW unidades del ferry *FCS Alsterwasser* en Hamburgo y la instalación de 60-70 kW del ferry *Nemo H₂* en Amsterdam. Una celda HTPEM se instaló en el ferry de puerto *MF Vagen* en Bergen, Noruega. Una instalación HTPEM de grandes dimensiones será viable en el proyecto PaXell. Además a bordo del supply *Viking Lady* se están ensayando celdas MCFC.



Figura 5.- Supply Viking Lady

3.3.- Pila de combustión directa de metanol (DMFC).

Las pilas de metanol directo son una variante de las pilas PEMFC en las que el combustible es metanol. El oxígeno actúa como oxidante, sin embargo no hay una oxidación del hidrógeno. El metanol líquido es el combustible que se oxida directamente en el ánodo.



Su uso se sitúa principalmente en el campo de la automoción. La principal ventaja es su adaptabilidad a un gran número de aplicaciones, desde mW hasta kW, ya sean portátiles o estacionarias, ya que la temperatura de trabajo no es un impedimento en ningún caso. Al trabajar con temperaturas relativamente bajas, su tiempo de encendido es bajo. Además pueden trabajar en cualquier orientación y tienen altas densidades de potencia, en comparación con otros tipos de pilas, lo que las hace idóneas para aplicaciones de transporte y portátiles.

Si bien las ventajas de éstas son elevadas desde el punto de vista de facilitar la aplicación al transporte (facilidad de manejo del combustible) un inconveniente claro es la emisión de CO₂, con lo que la reducción de este gas respecto a un motor térmico vendría dada sólo por el incremento de eficiencia.

La tecnología de las DMFC, única de las pilas de baja temperatura que no utiliza hidrógeno, es todavía relativamente nueva comparada con la tecnología de las

PEMFC, con muchos problemas todavía pendientes de solucionarse. Para lograr una alta corriente, la cantidad de platino usado como catalizador es todavía muchísimo mayor que la usada para obtener la misma cantidad en las pilas PEMFC. Además un importante problema añadido es que el metanol atraviesa la membrana desde el ánodo hasta el cátodo disminuyendo el funcionamiento del cátodo y aumentando el consumo de combustible.

3.4.- Pila de combustible de ácido fosfórico (PAFC)

En la pila de ácido fosfórico se producen las mismas reacciones de una manera similar a la pila de membrana, pero a una temperatura aproximada de 200°C (es una pila de temperatura media). Es la pila más desarrollada debido a ser la primera en ser descubierta.

Como electrolitos, los ácidos tienen la ventaja de que no reaccionan con el CO_2 , disminuyendo el coste de purificación del hidrógeno y del aire, ya que sólo será necesario para evitar el envenenamiento del ánodo por monóxido de carbono o compuestos de azufre.

La temperatura de operación de la celda suele oscilar entre los 150 y los 220°C. Este es un nivel interesante para algunas aplicaciones de cogeneración y también aprovechable mediante máquinas de absorción para producir frío.

De los datos obtenidos de las unidades en operación, que alcanzan miles de horas de funcionamiento, se deduce que el rendimiento eléctrico basado en el poder calorífico inferior está en torno al 38-40 %, y el rendimiento térmico está situado en torno al 40-45 %, por lo que se pueden alcanzar rendimientos globales del 85%.

Las principales aplicaciones de esta tecnología son la generación de energía eléctrica en el lugar de consumo (on site) y la producción masiva de electricidad. Es una tecnología que se encuentra desde hace tiempo en fase comercial.

Otros usos de estos sistemas que están empezando a funcionar son los que utilizan el metano producido en el tratamiento de aguas residuales en las

ciudades para producir energía eléctrica. Los gases de los tanques digestores, o “gases pobres” emitidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales están compuestos por un 60 % de metano, un 40 % de dióxido de carbono y ppm de H₂S. Una vez eliminado el H₂S del gas residual, éste puede ser usado en un sistema de pila de combustible.

3.5.- Pila de combustible de carbonato fundido (MCFC)

Las MCFC operan con un electrolito fundido, mezcla de carbonatos de metales alcalinos. El transporte lo realizan los iones carbonato (CO_3^{2-}) que se consumen en el ánodo y se regeneran en el cátodo.

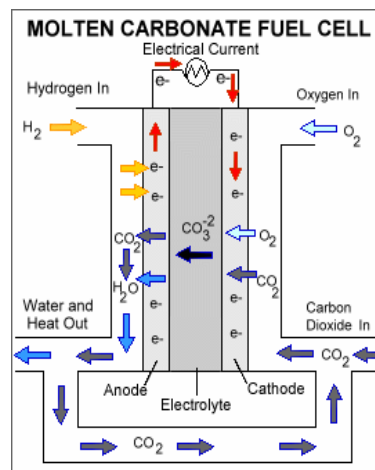


Figura 6.- Celda MCFC.

La temperatura de funcionamiento es de unos 600 a 650 °C. Se necesita esta temperatura de operación alta para alcanzar una conductividad suficiente del electrolito. Un efecto asociado con esta mayor temperatura es que no se requieren catalizadores de metales nobles para los procesos de oxidación y reducción electroquímicos, empleándose níquel sintetizado para fabricar los electrodos. Esta elevada temperatura de operación de las MCFC proporciona la oportunidad de lograr elevados rendimientos globales. Por el contrario, la alta temperatura de funcionamiento hace necesaria una estabilidad de los componentes de las celdas frente a la corrosión muy elevada, lo que no es fácil de conseguir.

La mayor ventaja de este tipo de pila es que pueden consumir fácilmente combustibles que contengan monóxido y dióxido de carbono, como los *gases que se obtienen por reformado de gas natural e incluso carbón*.

Las principales aplicaciones se prevén en el campo de la cogeneración y la generación o producción centralizada de electricidad.

3.6.- Pilas de óxidos sólidos (SOFC)

Las SOFC utilizan como electrolito óxidos sólidos, es decir, cerámicas impermeables que tienen la capacidad de conducir carga por el transporte de iones de oxígeno (O^{\equiv}) a través de una red cristalina a temperatura suficientemente alta (de 800 a 1000 °C, aunque hay intentos de desarrollar sistemas que operen a 700 °C). El material más utilizado es el óxido de circonio (ZrO_2) estabilizado en su forma cúbica con pequeñas cantidades de óxidos de calcio (CaO), ytrio (Y_2O_3), yterbio (Yb_2O_3) o una mezcla de Tierras Raras pesadas. Su atractivo se centra en su naturaleza en estado sólido, *su potencial para reformar combustibles gaseosos* en la pila de combustible y su alta temperatura de operación (que puede proporcionar calor de alta calidad para la producción adicional de energía eléctrica u otros usos). El electrolito sólido elimina los problemas de su contaminación y permite diseños que utilizan el electrolito como parte estructural.

Existen dos tipos de pilas de combustible de óxidos sólidos. La pila plana y la tubular. Las dos principales empresas en el desarrollo de estas dos tecnologías son respectivamente Sulzer-Hexis en el desarrollo de pilas planas de óxidos sólidos y Siemens Westinghouse en el desarrollo de pilas tubulares de óxidos sólidos.

Tienen el mismo campo de aplicación que las de carbonatos. Hay sistemas experimentales de cientos de kW. El principal fabricante de las TSOFC es Siemens Westinghouse que ha desarrollado pilas tubulares de hasta 50 kW.

Los tipos de células de combustible y sus aplicaciones principales quedan resumidos en la tabla 1.

4.- Desafíos

4.1.- Nuevos combustibles

Como ya se ha visto todos los tipos de células de combustible necesitan hidrógeno puro o combustibles que puedan ser reformados a hidrógeno y CO, ya sea antes de la célula o dentro de ella. El gas que se introduce en la célula debe estar libre de sulfuros, además las células de baja temperatura tienen restricciones con la cantidad de CO que pueden tolerar. Algunos proyectos se han orientado hacia el reformado de diesel ligero marino (MDO) a hidrógeno para usarlo en las células de combustible. Sin embargo todavía no se ha tenido éxito ni con diesel ligero (MDO) ni con el pesado (HFO). Así pues, la opción más relevante a corto plazo son combustibles tales como el metanol o el gas natural licuado (LNG). Sin embargo, la red de distribución de esos combustibles es muy limitada en la actualidad.

4.2.- Costes

El coste actual de las células de combustible es alto. Esto se debe a su limitada penetración en el mercado y a que existen solamente unas pocas instalaciones en funcionamiento a plena escala.

Los costes de inversión no pueden competir directamente con los costes de los motores de combustión que están alrededor de los 3-400 \$/kW, hay que comparar la inversión a lo largo del ciclo de vida. Los precios de las células de combustible varían mucho según la tecnología empleada. Para los módulos MCFC, los precios han llegado a bajar a los 3000 \$/kW, pero también suelen ser bastante superiores. Se suele establecer un objetivo de 1500 \$/kW para su comercialización. Los fabricantes estiman que este objetivo se podrá alcanzar entre 2020 y 2025.

CARACTERISTICAS	TIPO DE PILA DE COMBUSTIBLE					
	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
ELECTROLITO	Hidróxido potásico 6-12 N	Ácido sulfónico fluorado	Metanol líquido o gaseoso	Ácido fosfórico	Mezcla de carbonatos de litio, potasio y metales alcalinotérreos estabilizado	Óxido de circonio con ytrio
COMBUSTIBLE	Hidrógeno muy puro	Gas rico en hidrógeno con poco CO	Agua/Metanol	Eliminación del azufre de los gases de alimentación	Se viene a utilizar relaciones de 4/1 de moles de H ₂ /CO ₂	Hidrógeno con CO y CO ₂
OXIDANTE	Oxígeno de alto grado de pureza (CO ₂ <50 ppm)	Aire/Oxígeno	Aire/Oxígeno	Aire seco	Se requiere una composición superior a 2 moles de CO ₂ por cada mol de O ₂	Aire
ÁNODO	Níquel de doble porosidad	Carbón poroso con platino	Catalizador con alta carga de platino	Carbón poroso dopado con platino	Polvo de níquel sintetizado con pequeñas cantidades de cromo o aluminio en espesores de 0,8-1mm	Material poroso compuesto (cerámico metálico) de óxido de níquel y circonio estabilizado con ytrio
CÁTODO	Estructura de óxido de níquel litiada porosa	Carbón poroso con platino	Platino negro	Carbón poroso dopado con platino	Óxido de níquel litiado de 0,4-0,8 mm de espesor	Manganito de lantano dopado con estroncio
TEMPERATURA(°C)	25-120	<100	<130	190	650	850-1000
PRESIÓN (BARES)	2	2	3	8	Variable de diseño	Variable de diseño
APLICACIONES	Usos militares de corta duración y proyectos espaciales	Transporte. Uso residencial en producción de electricidad y calor	Transporte	Cogeneración en unidades de 200kW _e	Cogeneración y producción centralizada de electricidad (<1MW)	Uso residencial y pymes en generación de energía eléctrica, ACS y energía térmica para calefacción. (1kW). Cogeneración y producción centralizada de energía eléctrica (<1MW)
SITUACIÓN TECNOLÓGICA	Desarrollo total	Estado precomercial	Fases iniciales de I+D	Fase comercial	Fase de I+D Experimentación con prototipos	Fase de I+D Experimentación con prototipos

Tabla 1.- Características de las celdas

4.3.- Esperanza de vida

Las necesidades de mantenimiento diario de las células de combustible son bajas, pero la sustitución de la pila (stack) es necesaria. Todavía no se ha alcanzado la meta de las 40.000 horas de funcionamiento sin sufrir una degradación significativa de su rendimiento. Los esfuerzos en investigación se han fijado el objetivo de reemplazarlas aproximadamente cada 5 años, mientras que la vida de la planta se suele establecer en unos 20 años

4.4.- Costes de operación

El coste de la sustitución de una pila puede ser parcialmente compensado debido al reducido coste de mantenimiento en comparación con un motor de combustión. La más que probable introducción de impuestos a las emisiones hacen que las células de combustible sea una alternativa cada vez más atractiva. Sin embargo el perfil operativo individual de cada buque debe ser considerado en cada caso individualmente.

4.5.- Tamaño

El tamaño varía según la tecnología empleada. Sin embargo, en términos de volumen y peso por kW instalado, es muy difícil competir con los motores de combustión. El rendimiento eléctrico estimado en base al poder calorífico inferior del combustible considerado, potencia específica y densidad de potencia son comparados para dos tipos de células de combustible MCFC y HTPEMFC (célula PEMFC de alta temperatura) y dos tipos de motores de combustión interna (diesel de 4T quemando diesel y gas natural) en la tabla 2.

Generador eléctrico	Rendimiento eléctrico (%)	Potencia específica (kW/m ³)	Densidad de potencia (W/kg)
MCFC	45-50	3	15
HT-PEMFC	~ 45	30	60
Motor diesel (4T)	40	80	90
Motor gas (4T)	45	80	90

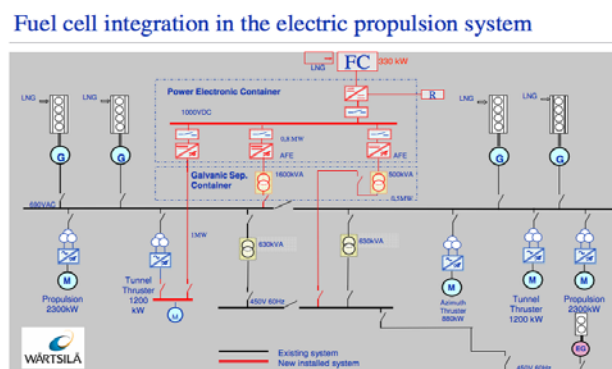
Tabla 2.- Comparativa celdas versus generador diesel.

5.- Aplicaciones navales

La asimilación de estas tecnologías es muy difícil ante un mercado incierto y también debido a los costes actuales. Las líneas de aplicación más prometedoras son:

- Soluciones en puerto, con la posibilidad de disminuir los efectos perjudiciales para la salud de las emisiones y ruidos procedentes de los barcos en los entornos urbanos. Se pueden usar como unidad auxiliar. La opción preferida podría ser la HTPEM, o una combinación híbrida de baterías y MCFC o SOFC funcionando con combustible bajos en carbono. Si hubiera hidrógeno disponible, las células PEM o HTPEM serían las adecuadas.
- Los ferris operando en rutas cortas son también candidatos para usar propulsión suministrada solamente por células de combustible, debido a su relativa baja necesidad de potencia y frecuentes posibilidades de repostar. Lo mismo se puede indicar respecto a los buques que operan en aguas interiores.
- Los cruceros también se benefician de la reducción del ruido y las vibraciones, así como de la reducción de las emisiones locales mientras están en puerto y zonas medioambientalmente sensibles. Muchos de los actuales cruceros son de propulsión diesel-eléctrica y una instalación de células de combustible puede ser fácilmente integrada en el diseño. Las unidades HTPEM son la alternativa más realista dado su alta potencia específica.

Figura 7.- Integración de célula en la distribución eléctrica de un buque.



6.- Metanol

El metanol constituye una de las principales opciones al uso directo del hidrógeno en las aplicaciones móviles equipadas con pila de combustible. Se trata de un

combustible con el que la industria en general está mucho más familiarizada y su uso como portador del hidrógeno gana cada día más adeptos.

6.1- Propiedades

El metanol es un alcohol simple, que se encuentra en forma líquida a presión y temperatura ambiente, y es muy estable químicamente en estado puro. Presenta claras ventajas para su uso a bordo, sobre todo respecto al gasoil marino. Además de su condición líquida, tiene un alto contenido en hidrógeno si lo comparamos con el gasoil, y puede ser reformado a temperaturas más bajas (250 - 300°C).

El metanol es incoloro, con un ligero olor a alcohol. Una cuestión que afecta a la seguridad es que produce una llama invisible a la luz solar mientras arde. Sin embargo es muy corrosivo con los materiales usados en la distribución de petróleo, tales como el aluminio y otros componentes del caucho. Además, el metanol es una neurotoxina, cuya ingesta incluso en una pequeña dosis tiene consecuencias fatales.

6.2.- El proceso de reformado

El uso del metanol como portador de hidrógeno, conlleva inevitablemente (excepto en las DMFC) el uso de un reformador a bordo. Evidentemente, la utilización del metanol evita los problemas relacionados con el almacenamiento del hidrógeno a bordo. Sin embargo, el reformador supone un peso añadido en el buque, además de producir emisiones, aunque sean poco contaminantes.

Un reformador no es más que un dispositivo que, colocado a bordo, extrae el hidrógeno del metanol (o de cualquier otro combustible con presencia de carbono e hidrógeno) mediante un proceso químico denominado reformado. El reformado consiste básicamente en el “cracking” de un combustible fósil en sus más básicos elementos y productos de hidrógeno y carbono sin producirse la combustión de éstos.

Existen básicamente tres tipos de reformado, el reformado con vapor, el reformado por oxidación parcial y el reformado autotérmico. Cualquiera de ellos

puede ser usado para reformar el metanol a bordo, y existen ya equipos que utilizan todas estas tecnologías de reformado.

7.- Conclusiones

El rendimiento eléctrico de las células de combustible depende de la tecnología de células que se aplique, con valores en rango del 35-50%. Este rendimiento es ligeramente superior al demandado por la generación de electricidad usando motores de combustión interna con el estado del arte actual. Sin embargo, una integración óptima del sistema como resultado de una integración de la generación eléctrica y térmica es fundamental. Una reducción significativa en costes es necesaria para que sea competitiva en el transporte marítimo. Con la reciente comercialización de algunas aplicaciones terrestres, hay esperanza en que los costes bajen. En las aplicaciones navales la reducción en peso y tamaño son fundamentales.

El uso de células de combustible en buques todavía requiere esfuerzos en investigación y desarrollo antes de que esta tecnología pueda complementar las tecnologías actuales para suministro de potencia. Sin embargo en un futuro cercano se espera que haya un nicho de aplicaciones en algunos buques especiales, particularmente con sistemas híbridos.

8.- Bibliografía

- Fuel cells for ships. Research and Innovation, Position Paper 13 – 2012. DNV.
- La pila de combustible. Juan A. López Satre, J. Israel Díaz García, Cristina Romero-Ávila García. 2004. Universidad de Valladolid.
- El hidrógeno y la energía. José Ignacio Linares Hurtado. Beatriz Yolanda Moratilla Soria. ICAI. Colección avances de ingeniería. 2007.
- El hidrógeno. Fundamento de un futuro equilibrado. Mario Aguer Hortal. Ángel L. Miranda barreras. Ed. Díaz de Santos. 2007.
- Fuel cells. Principles and Applications. B Viswanathan. M Aulice Scibioh. Universities Press. 2007