© Academia Journals 2020

GENERADOR DE ELECTRICIDAD MODULAR ALIMENTADO POR MÚLTIPLES ENERGÍAS RENOVABLES

Ing. Fabián Salinas López[1], Dr. Jose Antonio Cantoral Ceballos [2], Dr. Marcelo Funes-Gallanzi[3]

***Resumen* — En el presente artículo se propone una solución tecnológica que permite obtener energía eléctrica para un grupo de personas en zonas aisladas o en condiciones hostiles, como zonas de desastre o comunidades pequeñas de difícil acceso, donde el costo de llevar servicios básicos es muy alto. Esto se logra por medio de un generador modular ecológico con salidas a 12 y 5V, que produce residuos enteramente biodegradables: sólidos esterilizados de las aguas grises con magnesio, que pueden ser utilizados como fertilizantes. Además, el generador opera de forma modular, administrando su operación con un sistema embebido, lo que permite utilizar como combustible diferentes fuentes renovables, material de bajo costo (magnesio) y/o desechos de otros procesos como aguas grises, a diferencia de hacer esto utilizando, por ejemplo, motores de gasolina a un costo y peso significativamente más alto y generando desechos altamente contaminantes.**

***Palabras clave* — sistemas embebidos, generador, energías renovables**

Introducción

La población humana crece día a día a un paso exponencial, y de igual forma se aumenta la demanda de recursos energéticos que esta población requiere para sobrevivir, siendo esta sobrepoblación una de las principales causas de los problemas socioeconómicos en el mundo.

En relación con lo previamente mencionado, existe una tendencia generalizada que conduce a la sociedad hacia el uso de fuentes de energías alternas y/o más eficientes y que tengan un menor impacto negativo en el medio ambiente. La parte negativa de esta tecnificación que estamos sufriendo es que nuestro modo actual de vida se basa en un modelo energético centrado en el consumo de combustibles fósiles (gas, carbón, petróleo). Como resultado, día a día emitimos a la atmósfera inmensas cantidades de gases de efecto invernadero, que son los principales causantes del cambio climático. Esto implica que se debe pensar en el buen aprovechamiento de los recursos naturales con los que contamos para no agotarlos, buscar fuentes de energías alternas a los combustibles fósiles, además de hacer más eficiente cada proceso que asegure nuestra supervivencia. Además, la tendencia actual de los dispositivos es a reducir su escala y volverse inalámbricos. El problema es que estando en zonas aisladas de la red eléctrica, la recarga de estos dispositivos se dificulta, y aunque siempre existe la opción de hacer uso de celdas solares, la disponibilidad de la energía solar es intermitente a lo largo del día.

En la actualidad ya se cuenta con la suficiente tecnología para hacer uso de fuentes renovables que impacten menos al medio ambiente. Las celdas solares son una opción atractiva, pero por sí solas son aún costosas como inversión inicial y ocupan grandes superficies si se desean utilizar como única fuente de energía. Además, poseen una serie de limitantes, como menciona Zekry y Shaker (2018), la radiación solar incidente o la insolación (la potencia solar incidente por unidad de área) varía de acuerdo con:

- la posición en la Tierra, debido a la inclinación en el eje de rotación
- la hora del día a causa de la rotación de la Tierra
- el mes del año, como consecuencia de la rotación de la Tierra alrededor del Sol.
- el ángulo de incidencia
- presencia de nubes en la masa de aire y efectos ambientales

Descripción del Método

Una solución a las limitantes descritas es combinar celdas solares con otras fuentes de energía renovables, desarrollando un generador modular, para que de esta manera se pueda alternar la fuente de energía principal. Esto requirió el desarrollo de un sistema de administración de energía, que se encargue de elegir la fuente de alimentación y alternar entre ellas de forma automática y/o manual de acuerdo con las necesidades del usuario o la disponibilidad

[1] Ing. Fabián Salinas López es estudiante de maestría en Sistemas Inteligentes Multimedia en CIATEQ, Zapopan, Jalisco. fabian_sl@exatec.tec.mx
[2] Dr. Jose Antonio Cantoral Ceballos es profesor investigador en ITESM Querétaro. joseantonio.cantoral@tec.mx
[3] Dr. Marcelo Funes-Gallanzi es director de investigación en AVNTK, S.C. Zapopan, Jalisco. mfg@avntk.com

de las fuentes de energía. Antes de entrar a la interconexión de los módulos, se explicará brevemente cada una de las fuentes aprovechadas por este generador.

Energía solar

La energía solar es indiscutiblemente la forma de energía renovable disponible más limpia, abundante y confiable, y puede ser aprovechada de distintas maneras para energizar cualquier dispositivo o proceso.

Materiales o dispositivos fotovoltaicos convierten la luz del sol a energía eléctrica. Un solo dispositivo fotovoltaico se conoce como una celda. Una celda individual es usualmente pequeña, y produce entre 1 y 2 watts de potencia. Para aumentar la potencia de salida de las celdas fotovoltaicas, éstas se pueden conectar entre ellas en cadenas para formar unidades más grandes conocidas como módulos o paneles. Estos paneles se pueden utilizar de forma individual, o varios de ellos conectarse para formar arreglos. Por esta estructura modular, los sistemas fotovoltaicos se pueden construir para satisfacer casi cualquier necesidad de energía eléctrica.

Para cualquier proyecto que se requiera energizar por medio de energía solar, es necesario realizar una previa estimación de la energía que entregará el arreglo, para analizar si se requerirá de baterías para almacenar energía para los periodos en los que la cantidad de luz solar no sea suficiente para la cantidad de potencia requerida, o en el caso de este proyecto, si se utilizará otra fuente de energía durante esos periodos. Para este proyecto, al requerir 12V para poder alimentar motores y obtener precisamente una salida de este voltaje, se realizó un arreglo de 2 celdas MPT15-150 conectadas en serie a la entrada de un circuito BQ24650EVM, con el objetivo de recargar una batería Li-Po y obtener una salida estable a 12V.

Hidrógeno: pilas de combustible tipo PEM

Las pilas de combustible son sistemas electroquímicos que convierten la energía química en energía eléctrica obteniendo como subproductos de la reacción, agua y calor. Una característica de estas pilas es que los reactantes, o combustibles, son suministrados de manera constante a la pila, y los subproductos de reacción eliminados de la misma. Existen diferentes tipos de pilas de combustible de acuerdo con el tipo de electrolito utilizado, sólido o líquido. La naturaleza del electrolito les confiere diferentes características de funcionamiento, como pueden ser las temperaturas óptimas de operación, materiales de construcción de la pila, los gases reactantes, su vida útil, y el área de aplicación. Entre toda la variedad de pilas de combustible, las PEM, o pilas de membrana de intercambio de protones o pilas de membrana de polímero de electrolito, por sus siglas en inglés, son la opción más prometedora para las aplicaciones móviles por su alta eficiencia, densidad de corriente y baja temperatura de operación.

Las pilas de combustible tipo PEM tienen este nombre pues el electrolito está constituido por una membrana polimérica que separa ánodo y cátodo de una celda. Esta membrana se constituye por un conductor protónico el cual permite el paso a través de él de los iones H+, pero con la característica de ser impermeable a las demás sustancias.

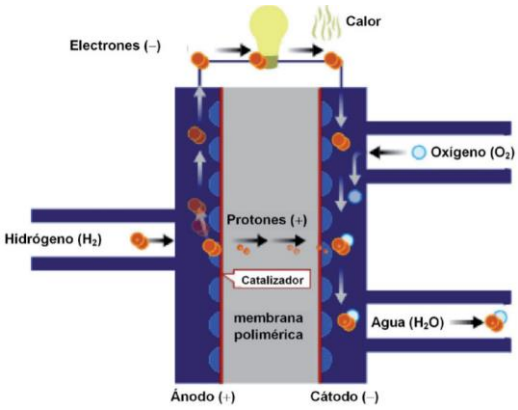

Figura 1: funcionamiento básico de pila PEM

Como puede observarse en la figura 1, y como lo afirman Barreras y Lozano (2012), para conocer el funcionamiento básico de una pila tipo PEM se podría separar ésta en 3 partes: el cátodo, un electrodo cargado negativamente; el ánodo, un electrodo cargado positivamente; y entre estos, la membrana electrolítica encargada de separar físicamente los gases a ambos lados. El combustible de la pila, el hidrógeno, es introducido a la placa bipolar por el lado del ánodo y conducido a través de una capa difusora de material carbonoso hacia la capa catalítica, donde tiene lugar la primera reacción electroquímica: la oxidación del hidrógeno (Ecuación 1).

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^- \qquad \text{(Ecuación 1)}$$

Existe una capa difusora, de un material altamente poroso, de forma que facilite la difusión del hidrógeno para lograr alcanzar más eficientemente las partículas del catalizador. Los protones formados pasan a través de la membrana polimérica de intercambio protónico, pero al no ser conductora, los electrones no pueden cruzarla, por lo que buscan la salida a través del circuito formado por las capas difusoras, que al ser carbonosas si conducen, y las placas, creando de esta forma la corriente eléctrica que se busca aprovechar. Por el otro extremo de la pila, aire ingresa a través de los canales del cátodo, atravesando la capa difusora y logrando que el oxígeno se combine en la capa catalítica con los protones que cruzan a través de la membrana y los electrones del circuito exterior, generando agua y calor en nuestra segunda reacción electroquímica (Ecuación 2):

$$\tfrac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O \qquad \text{(Ecuación 2)}$$

En esta última reacción se genera el agua, que, siendo purgada del sistema desde el área del cátodo utilizando una bomba peristáltica, puede ser aprovechada en el caso de una aplicación como la agrícola.

Batería Magnesio-aire

Las baterías metal-aire han atraído gran atención como dispositivos prometedores en el almacenamiento y conversión de energía electroquímica debido a su bajo impacto al medio ambiente y reducido costo. Además, como menciona Hahn et al (2015), "a 2.205 Ah/g, la capacidad Farádica del magnesio es significativamente más alta que el zinc. Su peso específico es inferior al del aluminio y aproximadamente 25% del de zinc, por lo que el magnesio tiene alto potencial de uso en baterías al tener alta densidad de energía y bajo peso" (p. 26). En la estructura básica de una batería magnesio-aire (figura 2) se tiene un ánodo de Magnesio (Mg) o una aleación de este, un cátodo de aire y un electrolito salino (agua con sales, orina de animales, etc).

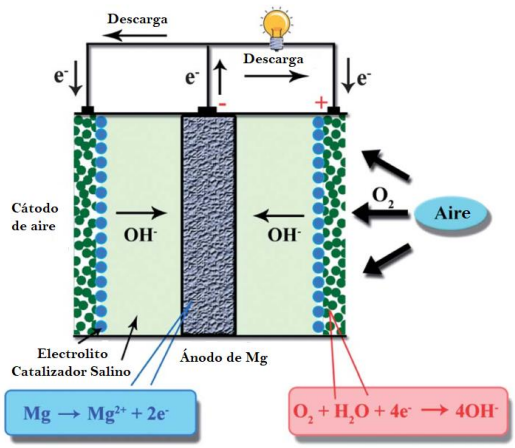

Figura 2: batería Mg-Aire

Durante el proceso de descarga, en el ánodo se tiene la siguiente reacción:

$$Mg \rightarrow Mg^{2+} + 2e^- \qquad \text{(Ecuación 3)}$$

en la cual el ánodo de Mg se oxida en Mg^{2+}, produciendo 2 electrones, mientras que en el electrodo contrario se observa la siguiente reacción:

$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^- \qquad \text{(Ecuación 4)}$$

aquí, O_2 pasa a través del cátodo de aire, el cual es reducido a OH^- por reacción entre H_2O y electrones. "El voltaje teórico de la batería Mg-aire es de 3.1V y la densidad de energía específica es de 6.8kW h kg^{-1}" (Zhang, Tao y Chen. 2014).

El ánodo de Mg tiene un rol importante en las baterías Mg-Aire, pero una reacción secundaria en éste provoca un problema que para este proyecto es bien aprovechado: la corrosión de Mg (ecuación 5). La reacción de la corrosión de forma completa se puede escribir de la siguiente forma:

$$Mg^{2+} + 2H_2O \rightarrow Mg(OH)_2 + H_2 \qquad \text{(Ecuación 5)}$$

Como se puede observar, un subproducto de la reacción es hidrógeno, el cual se puede almacenar o dirigirse directamente al módulo PEM de nuestro generador. El segundo subproducto sería hidróxido de magnesio, un compuesto inorgánico y componente común de antiácidos o laxantes.

Electrónica

Para el procesamiento de la administración de energía se requirió el uso de una tarjeta Raspberry Pi 3 Model B, por su practicidad de uso y librerías disponibles, por ejemplo, para el lenguaje Python. La electrónica del generador se encuentra dividida en 2 áreas de componentes: la primera manejando 12V para el manejo de las celdas solares, almacenamiento de energía eléctrica en la batería Li-Po, apertura o cierre de válvulas solenoides para el movimiento de hidrógeno y el manejo de bomba peristáltica para el purgado de fluidos. La segunda maneja 5V, permitiendo alimentar perfectamente la Raspberry Pi, así como los sensores INA219 para el monitoreo de corrientes y voltajes del sistema; el sensor de presión SSMAND010BG2A5 de Honeywell para el monitoreo de la presión de hidrógeno, el cual mide hasta 10 bar y funciona a 5V, usando el bus I2C; se utiliza un sensor MQ-8 Hydrogen Click de MikroElektronika, un sensor que trabaja a 5V y permite hacer la medición de la concentración de hidrógeno para la detección de alguna fuga; y por último la carga de una segunda batería a través de un circuito Powerboost 1000C, mismo que se encarga de alimentar en paralelo la Raspberry Pi.

Interconexión del Sistema Modular

El generador se compone de distintos módulos interconectados (figura 3), cada uno alimentado por una fuente de energía distinta, por lo que el administrador gestionará cual módulo administrará de energía al sistema dependiendo de la disponibilidad de los recursos que se tengan. Se podrá realizar almacenamiento del exceso de energía a través de una batería Li-Po de 12V y una más de 5V, sirviendo de respaldo para los circuitos de 12 y 5V respectivamente. Este último tendrá especial importancia pues será el que alimente a la Raspberry Pi.

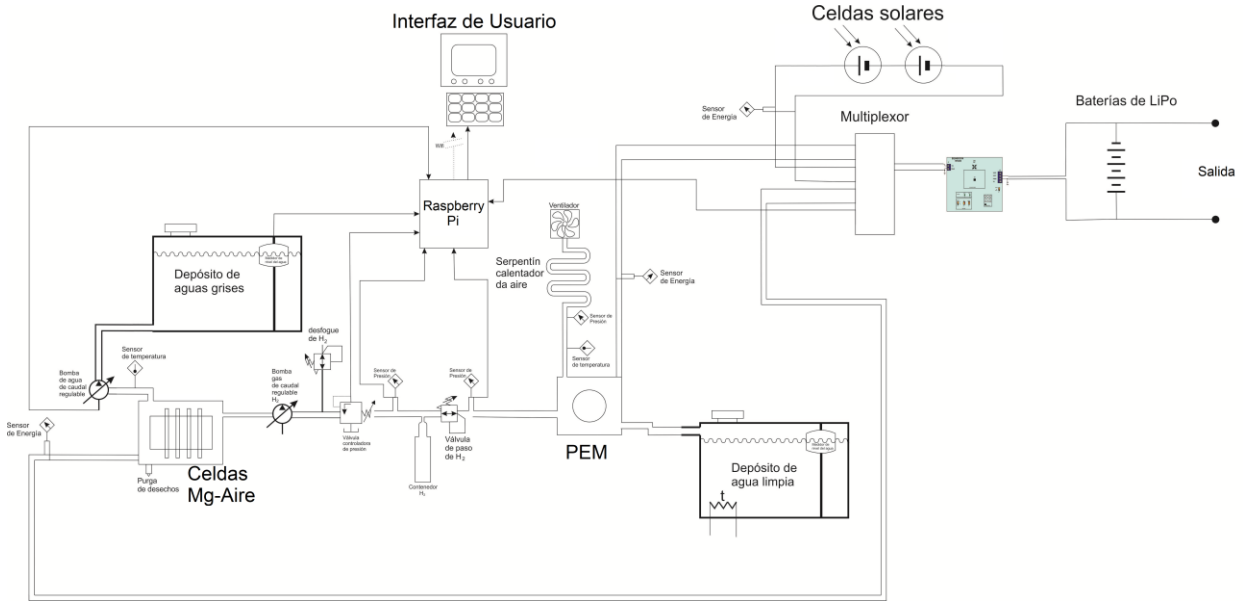

Figura 3: interconexión de módulos

El diseño inicial de este generador se constituye primeramente de un par de celdas solares conectadas en serie para aprovechar la energía del Sol. Como parte de este primer módulo se adiciona un circuito BQ24650EVM de Texas Instruments para controlar la carga de una batería de Li-Po a 12V para almacenar parte de la energía producida y de esta forma tener un respaldo en caso de que ninguna otra fuente de energía se encuentre disponible. Para esto, se

utilizan los sensores INA219, monitoreando voltaje/corriente en las terminales de la batería. La salida del circuito BQ24650EVM se conecta a un circuito step-up/boost para subir el voltaje y mantenerlo estable en 12V. De este punto se coloca nuestra primera salida a 12V. Seguido de este punto se conecta un circuito step-down, reduciendo el voltaje de 12 a 5V para alimentar todo circuito que maneje dicho voltaje. Como parte final de la electrónica se incorpora el circuito PowerBoost 1000C, con el objetivo de alimentar el Raspberry Pi, cargar una pila como último respaldo de energía, y, por último, obtener una salida a 5V.

Como segundo módulo se tiene una celda Mg-Aire, que consiste en un contenedor con un líquido (orina, agua de mar o salada, aguas grises) que se deja entrar en contacto con magnesio, lo cual produce por kilogramo:

$$\underset{1Kg}{Mg} + \underset{1.5Kg}{H_2O\ (sucia)} \rightarrow \underset{2.417Kg}{Mg(OH)_2} + \underset{83gr}{H2}$$

Esta reacción produce energía eléctrica para un sistema de control o electro-mecánico, e hidrógeno. El hidrógeno generado puede guardarse en pequeñas cantidades en un contenedor, o ser dirigido como entrada al módulo de la celda de combustible PEM por medio del uso de válvulas solenoides para permitir o bloquear el paso del hidrógeno.

Como asegura Linares, J., Moratilla, B. (2007), el hidrógeno tiene una muy baja energía de activación comparado con otros combustibles, es decir hay que añadir muy poca energía a una mezcla potencialmente inflamable para que se inicie la combustión. Esto es una gran ventaja en procesos de combustión y sobre todo en procesos electroquímicos (como el de las pilas de combustible), pero es una gran desventaja desde el punto de vista de seguridad, ya que cualquier chispa puede activar la reacción no deseada. Debido al pequeño tamaño de su molécula, el hidrógeno es altamente fugable, por lo que las instalaciones de almacenamiento y distribución de hidrógeno deben estar especialmente bien selladas y correctamente inspeccionadas para detectar las fugas. El hecho de que hidrógeno es invisible e inodoro hace que los escapes sean indetectables con los sentidos por lo que se requiere tener equipos de detección. Por todas estas razones, se incluyeron en distintos puntos del generador, sensores de hidrógeno que alertan al usuario a través de la interfaz gráfica ante la existencia de fugas.

Un subproducto de la reacción del líquido con Mg es hidróxido de magnesio que, al no ser soluble en agua, se deposita al fondo en un tanque secundario junto con el excedente de líquido, y que puede ser convertido a óxido de magnesio por medio de calor, el cual es un producto agrícola (alimento de vacas o fertilizante). Si se utiliza inicialmente agua potable con sal, este producto puede ser utilizado como un antiácido y laxativo (leche de magnesia) para consumo humano, lo cual podría ser muy útil si se utiliza el generador en una zona de desastres.

Una vez logrando una presión de alrededor de 1.5 atm a la salida de la celda Magnesio-aire, el hidrógeno se libera hacia el tercer módulo, la celda PEM, junto con aire precalentado a 80ºC por el líquido, siendo el resultado electricidad y agua potable caliente a la salida de la celda PEM, que es transferida a un tanque térmico aislado. La reacción es la siguiente:

$$\underset{83gr}{2H_2} + \underset{664gr}{O_2} \rightarrow \underset{747gr}{2H_2O}$$

Por lo tanto, 1 kilogramo de magnesio produce ¾ de litro de agua potable. Considerando que el magnesio tiene una densidad de 1,740 Kg/m3, se puede concluir que esta cantidad de magnesio ocupa 575 cm3 de espacio para trasportarlo, es decir menos espacio que el agua que produce.

Comentarios Finales

Resumen de resultados

El resultado principal de este proyecto fue el desarrollo de un prototipo funcional a pequeña escala (10-100W) de un generador modular y ecológico de electricidad y agua potable. Este sistema puede proveer eficientemente electricidad con carga fluctuante (1.244kWh) y agua (¾ de litro) por kilogramo de magnesio, usando un equipo de peso estimado de 5 kg vacío. Tomando como ejemplo una necesidad de 400 Wh por día de un rescatista en una zona de desastre, en una misión de 10 días el sistema puede proveer toda la energía necesaria más 2¼ litros de agua caliente con 10 kg de magnesio. Por lo tanto, este sistema reduce la necesidad de reaprovisionamiento y aumenta la autosuficiencia del personal a un costo competitivo.

Existen muchas variaciones de celdas de hidrógeno, pero la tipo PEM fue la primera en ser utilizada y es aún la más robusta, económica y con las condiciones de operación más fáciles de obtener, como control de humedad (que es fácil en este arreglo) y temperaturas de 70-95 ºC, aunque cada celda solo produce 0.7 V por lo que se debe hacer una

pila en serie de estas. Otra razón importante para elegir este tipo de celdas es que es que pueden variar su potencia, rápidamente manteniendo su eficiencia, frente a variaciones en la carga eléctrica.

Basados en una densidad de energía de 33.3kWh/Kg y una eficiencia de 0.45% operando a 1.25 atmósferas, la siguiente cantidad de energía puede ser obtenida a partir de .083 Kg de $2H_2$:

$$0.083\ (Kg) \times 33.33\ (kWh/Kg) = 2.7639\ kWh$$
$$2.76\ (kWh) \times 0.45\ (\%) = 1.244\ kWh$$

Para fines de comparación, la densidad de energía de baterías de LiPo es 0.20kWh/Kg, de forma que el peso de estas baterías para producir esta cantidad de energía puede ser calculada como:

$$1.244\ (kWh) / 0.20\ (kWh/Kg) = 6.22\ Kg$$

Es decir que 1 kilogramo de magnesio puede producir más de seis veces la energía que el mismo peso de baterías junto con ¾ litro de agua potable. Otro aspecto importante es que el agua potable se obtiene caliente por lo que puede ser usada para hacer comida, té/café o para mantenerse caliente.

La fuente de alimentación del módulo Mg-Aire es el magnesio, un elemento con muchas características que lo tornan atractivo como fuente de energía. El magnesio es muy común, no es combustible en forma sólida, puede ser guardado en atmósferas normales y hasta húmedas, ya que se le forma una capa protectora de (hidro)óxido.

Una vez utilizado el cartucho de magnesio se convierte en un deshecho ecológico 100%: hidróxido de magnesio, uno de los pocos compuestos no-solubles del magnesio. De hecho, este compuesto tiene propiedades de suprimir el humo y extinción de incendios. Esto se debe a la descomposición endotérmica que sufre a 332°C (630°F):

$$Mg(OH)_2 \rightarrow MgO + H_2O$$

La energía absorbida por esta reacción actúa retrasando el encendido de sustancias volátiles. El agua liberada diluye gases combustibles e inhibe oxigeno de ayudar la combustión. Usos anti-incendio comunes de hidróxido de magnesio como retardador de incendios incluye plásticos, techos y recubrimientos.

Por otro lado, el hidróxido de magnesio puede simplemente ser retirado del sistema y desecharse o ser mezclado con tierra, ya que es un material ecológico, a diferencia de cualquier batería.

Estas baterías (Mg-Aire) tienen gran potencial pues el Mg es abundante en cualquier país de nuestro planeta, tiene un alto grado de reacción, es ligero, de baja toxicidad y es relativamente seguro. Milusheva et al (2011) asegura que son ecológicamente limpias, el Mg no es tóxico, no se generan substancias tóxicas durante su operación y el electrolito salino es no es químicamente agresivo. Además, una batería Mg-aire se puede reutilizar reemplazando el ánodo de Mg y el electrolito gastados por un ánodo de Mg y un electrolito nuevos, volviendo a la batería “rellenable”.

Referencias

Salem M., Shaker, A., y Zekry, A. (2018). “Solar cells and arrays: Principles, analysis and design”. *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*, 1, 4.

Chen, J., Tao, Z., y Zhang, T. (2014). “Magnesium-air batteries: from principle to application”. *Materials Horizons*, 1, 196.

Linares, J., Moratilla, B. (2007). “El hidrogeno y la energía”. *Avances de ingeniería. Análisis de situación y prospectiva de nuevas tecnologías energéticas*, 2, 84

Barreras, F., Lozano, A. (2012). “Hidrógeno. Pilas de combustible de tipo PEM”. Recuperado desde: http://www.energia2012.es/sobre-energ%C3%ADa/otras-fuentes-de-energ%C3%ADa/hidr%C3%B3geno-pilas-de-combustible-de-tipo-pem

Glaw, F., Hahn, R., Lang, K., Mainert, J. (2015). “Sea water magnesium fuel cell power supply”. *Journal of power sources*, 288, 26.

Milusheva, Y., Boukoureshtlieva, R., Hristov, S., y Kaisheva, A. (2011). “Environmentally-clean Mg-air electrochemical power sources”. *Bulgarian Chemical Communications*, Volume 43, Number 1 (pp. 43-44)