

Prácticas de aplicación a la docencia para la caracterización de pilas de hidrógeno

Santiago García-Alonso^{*a}, José Miguel Monzón-Verona^b, Álvaro Medina^c

^aDpto. de Ingeniería Electrónica y Automática, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus Universitario de Tafira, 35017 Las Palmas, España; ^bDpto. de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus Universitario de Tafira, 35017 Las Palmas, España; ^cUniversidad de Huelva, Dr. Cantero Cuadrado 6, 21004 Huelva, España

RESUMEN

Las prácticas de laboratorio son un pilar básico en muchos planes de estudio, especialmente en las áreas de Ingeniería, Arquitectura y Ciencias. Su diseño está orientado hacia la resolución práctica de problemas y favorece notablemente el aprendizaje del alumnado y el enraizamiento de los nuevos conocimientos adquiridos. Del mismo modo, en el laboratorio se potencian algunas competencias transversales como la autonomía o la comunicación eficaz oral y escrita. Por ello en este trabajo presenta la elaboración de una innovadora guía de prácticas aplicadas a la docencia que permite adquirir al alumnado una formación sólida y rigurosa sobre las pilas de hidrógeno. En concreto, se exponen un total de seis experiencias en el laboratorio que parten desde un nivel básico hasta alcanzar una mayor dificultad en la práctica final. Asimismo, para asegurar que la obtención de energía eléctrica mediante la pila de combustible sea completamente de origen renovable, se recurre a la tecnología solar fotovoltaica como aportador de energía eléctrica al sistema.

Keywords: Prácticas, laboratorio, docencia, competencias transversales, pilas de hidrógeno, nuevas tecnologías, energía fotovoltaica, ingeniería ambiental.

1. INTRODUCCION

Las pilas de hidrógeno son dispositivos electroquímicos que constituyen una de las grandes apuestas para sustituir a los métodos que emplean combustibles fósiles como principales fuentes de energía. La utilización de dichos recursos para la producción, transformación y uso de la energía ha acrecentado, en gran medida, la crisis medioambiental actual manifestada por fenómenos como la lluvia ácida o el efecto invernadero.

El deseo por frenar dicho problema crítico ha provocado que una multitud de entidades, organizaciones y gobiernos hayan comenzado a invertir aún más en el empleo del hidrógeno como principal combustible dadas sus nulas emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases contaminantes. No obstante, el desarrollo de una sociedad concienciada acerca de las nuevas tecnologías verdes parte desde la educación.

Precisamente por este motivo se ve conveniente desarrollar unas prácticas innovadoras de laboratorio que ayuden a difundir las energías renovables entre los alumnos de las distintas universidades [1].

Además, las pilas de combustible cuentan con una amplia gama de aplicaciones relacionadas con una gran multitud de sectores (industria militar y espacial, vehículos, suministro de energía, aplicaciones portátiles, etc.), que las hacen competitivas frente a otras tecnologías [2, 3].

Dado que los vehículos privados representan, aproximadamente, la mitad del sector del transporte mundial, una de sus mayores utilidades en un próximo futuro, se centra en el área de transportes, siendo los más destacados los nuevos diseños de coches eléctricos los cuales transforman el hidrógeno almacenado en el depósito de combustible en electricidad para alimentar el motor eléctrico.

Por este motivo, en este trabajo se exponen unas prácticas aplicadas a la docencia que permiten adquirir a los graduados universitarios de titulaciones técnicas una formación sólida y rigurosa sobre las pilas de hidrógeno. En concreto, se

expone un total de seis experiencias en el laboratorio que parten desde un nivel básico hasta alcanzar una mayor dificultad en la práctica final.

El presente trabajo tiene como principal objetivo servir de guía para el correcto desarrollo de prácticas enfocadas en el estudio de la tecnología relacionada con las pilas de hidrógeno [4-7]. En dichas experiencias se recogen, de un modo innovador, desde los aspectos fundamentales para entender su funcionamiento, hasta consideraciones más específicas del tema, pudiendo proporcionar al estudiante un conocimiento amplio aspectos tratados en otras áreas de la ciencia, como son la Ingeniería Ambiental, la Ingeniería Energética, la Electroquímica o la Termodinámica.

Por consiguiente, el objeto último de este documento consiste en la formación de los estudiantes acerca de las pilas de combustible, en especial la de tipo PEM, ver figura 1, centrándose en su caracterización y en la aplicación de la energía solar fotovoltaica para asegurar que la producción de energía sea de la forma más limpia posible.



Figura 1. Pila de combustible PEM

Para ello se ha planteado un total de seis prácticas las cuales pueden ser divididas en dos bloques. El primero de ellos comprende los aspectos generales a tratar sobre la pila de hidrógeno, como pueden ser el manejo y entendimiento del electrolizador como unidad productora de hidrógeno, la caracterización de una pila de combustible y la asociación de distintas unidades tanto en serie como en paralelo para tratar de incrementar la potencia generada. El segundo grupo incluye el acercamiento del alumno al funcionamiento de los paneles fotovoltaicos, primero mediante la caracterización de unidades de dimensiones reales y, más adelante, del módulo solar de un kit experimental. Por último, se fusionan todos los conceptos analizados previamente para tratar de observar el desempeño del sistema conformado por el módulo solar y la pila de combustible.

Una pila de combustible es un dispositivo electroquímico similar a una batería de alta tecnología que se recarga continuamente [8] y que transforma la energía química del combustible (en este caso el hidrógeno) que la alimenta en energía eléctrica, siendo capaz de suministrar dicha energía eléctrica de manera continua siempre y cuando el aporte de combustible sea constante [9].

La energía solar fotovoltaica es aquella que aprovecha la radiación solar y la transforma de forma directa en energía eléctrica a partir del efecto fotovoltaico. Dicho fenómeno consiste en la transmisión de electrones a través de un material, considerado semiconductor, cuando este es iluminado con radiación solar electromagnética [10]. En consecuencia, se trata de una energía limpia, de carácter renovable ya que su fuente es inagotable y no desprende gases de efecto invernadero ni ningún otro tipo de emisiones contaminantes [11]. A pesar de que el efecto fotoeléctrico ya era conocido en el siglo XIX, la tecnología fotovoltaica comenzó a desarrollarse durante la década de los 50, en plena carrera espacial [12].

2. METODOLOGÍA

Para poder desarrollar las prácticas adecuadamente es imprescindible conocer primero las normas de seguridad que han de tenerse en cuenta a la hora de realizar las prácticas. Seguidamente, es necesario considerar la información técnica de los elementos empleados en las prácticas; esta información nos la facilita normalmente el fabricante. A continuación, se detallarán las normas a tener en cuenta para la instalación y montaje general de las diferentes prácticas. Para terminar, se expondrán las consideraciones necesarias para el mantenimiento y servicio de los distintos equipos.

2.1 Normas de seguridad

Ante el uso de cualquier instrumento o equipo de laboratorio se debe guardar una serie de medidas de protección, seguridad y prevención de riesgos. En consecuencia, la primera tarea que se debe realizar antes de realizar las prácticas consiste en leer de forma detenida y rigurosa las instrucciones y las normas de seguridad de este. Puesto que el equipo de tecnología de hidrógeno constituye un modelo de pequeña escala con el fin de servir como material didáctico al alumnado, este solo puede ser utilizado con fines académicos o para el almacenamiento de pequeñas cantidades del gas y no para la producción en masa de hidrógeno o electricidad para uso general.

Los experimentos se han de llevar a cabo empleando, en la gran mayoría de los casos, únicamente los elementos que conforman el kit del alumno. Únicamente se puede incluir una fuente de alimentación en el caso de no emplear el módulo solar en el montaje del sistema, además de instrumentos de medición como multímetros. Del mismo modo, tampoco se pueden realizar modificaciones de piezas en los equipos que no estén autorizadas, y su manipulación debe quedar en manos de estudiantes bajo la supervisión del profesor competente.

La inflamabilidad del hidrógeno lo hace potencialmente peligroso si se encuentra de cerca de llamas, y si se utiliza la fuente luminosa para la elaboración de las prácticas, no se debe tocar mientras se encuentre activa o instantes después de ser apagada. Si se percibe que los alrededores de la lámpara están muy calientes se debe apagar el foco, puesto que es un indicativo de que está ocurriendo un sobrecalentamiento.

En cuanto al lugar en el que realizar las prácticas, lo más adecuado incluye la localización del equipo en una base firme, permanente y plana horizontalmente; a una altura comprendida entre los 75 y los 80 cm para una mayor comodidad del usuario. La temperatura ambiente de la sala debe ser de entre 10°C y 35°C para asegurar resultados fiables. El desempeño de las prácticas no conlleva la utilización de equipos de protección individual, a excepción de gafas de protección que sí son recomendadas.

2.2 Información técnica de los elementos

El kit del alumno se encuentra dispuesto en una caja de protección e incluye los elementos que se listan a continuación:

- Módulo solar insertado en una carcasa de plástico con conexiones de entrada y salida.
- Electrolizador PEM con conexiones de entrada y salida.
- Pila de combustible PEM con probetas de almacenamiento y con conexiones de entrada y salida.
- 4 cables de tipo banana (2 de ellos de color rojo y otros 2 de color negro).
- 4 tubos de silicona de 6 mm de diámetro.
- 2 tubos transparentes de rebose para las probetas.
- 3 tapones de plástico para los tubos.
- Cronómetro.
- 1 bombilla de repuesto.
- Manual de instrucciones, transportador de ángulos y diagrama de conexiones de la caja de mediciones de carga.

Los elementos necesarios y consumibles constituyen el agua destilada, las baterías para la caja de mediciones de carga (6LR61 de 9 V) y la pila para el cronómetro (AG 3, LR 41 o L736).

En definitiva, el equipo trata de simular una central de producción de hidrógeno a partir de energía solar y que cuenta con un módulo solar que transforma la energía lumínica en corriente eléctrica. Dicha corriente es capaz de inducir el proceso de electrólisis del agua dando lugar a hidrógeno y oxígeno en la unidad del electrolizador, los cuales están almacenados en las probetas anexionadas a éste. A continuación, dichos gases son transportados hasta la pila de combustible donde, mediante la reacción inversa, se obtiene energía eléctrica a partir de la energía química, que es empleada para accionar un motor o encender una bombilla de la caja de mediciones de carga.

A continuación, se detallan en forma de tabla de dos las entradas los elementos de infraestructura reactivos y materiales consumibles empleados en las prácticas.

Tabla 1. Elementos de infraestructura reactivos y materiales consumibles

| Clasificación | Descripción |
|------------------------------------|--|
| Infraestructura | Equipo didáctico de pilas de combustible marca VENTUS. Incluye: módulo solar, electrolizador, pila de combustible tipo PEM, caja de mediciones de carga, 4 tubos de plástico, 3 tapones de plástico, 1 bombilla de recambio, 4 cables tipo banana, 1 cronómetro y documentación adicional. |
| | Panel fotovoltaico marca ERA Solar. Modelo policristalino de 72 células en serie (340W) |
| | Foco con bombilla de 100W |
| | Soporte móvil para el panel fotovoltaico |
| Reactivos y materiales consumibles | 2 multímetros |
| | Botella 500 ml de agua estéril marca VERSOL |

Acto seguido, en las tablas 2 a 5, se muestran las especificaciones técnicas de cada elemento del kit:

Tabla 2. Parámetros de diseño del módulo solar

| | | |
|--|-----------------------------------|------------------------|
|  | Dimensiones (largo, ancho y alto) | 70 mm x 120 mm x 52 mm |
| | Tensión entre terminales | 3 V |
| | Corriente de cortocircuito | 245 mA |
| | Tensión | 2,4 V |
| | Corriente | 200 mA |
| | Potencia | 0,48W |

Tabla 3. Parámetros de diseño del electrolizador

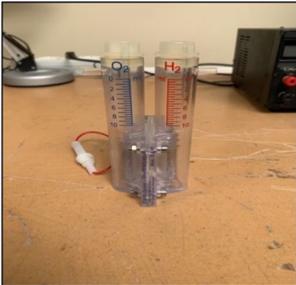
| | | |
|---|---|------------------------|
|  | Dimensiones (largo, ancho y alto) | 70 mm x 120 mm x 52 mm |
| | Consumo de agua destilada | 3 V |
| | Cantidad de agua transportada desde el lado del oxígeno hasta el lado del hidrógeno | 10 ml cada uno |
| | Tensión normal de funcionamiento | 1,4 – 1,8 V |
| | Corriente | 0 – 500 mA |
| | Producción de hidrógeno | Máx. 3,5 ml/min |

Tabla 4. Parámetros de diseño de la pila de combustible

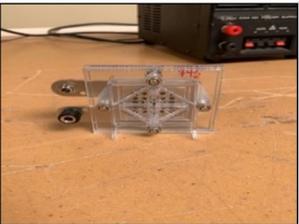
| | | |
|---|-----------------------------------|--|
|  | Dimensiones (largo, ancho y alto) | 85 mm x 70 mm x 70 mm |
| | Tensión | 0,4 – 1 V |
| | Corriente | máx. 100 mA |
| | Consumo de hidrógeno | máx. 7 ml/min con corriente de 1000 mA |

Tabla 5. Parámetros de diseño de la caja de mediciones de carga

| | | |
|---|--|----------------------------|
|  | Dimensiones (largo, ancho y alto) | 190 mm x 110 mm x 85 mm |
| | Tensión del motor | 0,2 – 3 V |
| | Corriente usada por el motor | 10 – 15 mA |
| | Tensión de la lámpara | 0,6 – 1,5 V |
| | Corriente usada por la lámpara | 0 – 80 mA |
| | Tensión de funcionamiento de los medidores | 9 V |

Además, se emplea un panel solar de la marca ERA. En este caso, se trata del modelo ESPMC 340 de módulo solar policristalino y que cuenta con un total de 72 células fotovoltaicas. Se caracteriza por implementar una nueva tecnología que mejora la eficiencia de los módulos, ofrece un mejor aspecto estético, haciéndolo idóneo para su instalación en azoteas o cubiertas. Tal y como su nombre indica, esta unidad es capaz de alcanzar una potencia de salida de hasta 340W y está construido con un tipo de vidrio cuya textura superficial favorece altos rendimientos en entornos con escasez de luz.

2.3 Instalación y montaje general

El equipo viene inicialmente desmontado para un mejor transporte y se han de seguir una serie de instrucciones para su montaje. En primer lugar, el módulo solar se encuentra ya anclado al soporte, favoreciendo así la disposición perpendicular hacia el foco o fuente luminosa.

Para usar el electrolizador adecuadamente, inicialmente se debe ajustar los dos tubos transparentes de rebose al mismo. Para ello, se recomienda humedecer el extremo inferior de los tubos con agua destilada para favorecer su conexión a los tapones de la parte superior del electrolizador. Si los tapones no están previamente colocados en la unidad, se debe proceder a este paso antes que la adhesión de los tubos de rebose. También, si al llenar el electrolizador con agua destilada esta sobrepasa la marca inicial de 0 ml, se puede regular el nivel y eliminar el volumen sobrante soplando por las boquillas dispuestas en los laterales del dispositivo.

Por otra parte, la pila de combustible, al igual que la caja de mediciones de carga, se comercializan ya montadas, por tanto, no existen pasos previos de montaje para ellas. A la hora de realizar la práctica primero se debe asegurar que todos los equipos se encuentran sobre una superficie estable, después se emplean los conectores para establecer las uniones entre la fuente de alimentación o módulo solar y el electrolizador.

Si se desea corroborar la medición de la intensidad de corriente que circula por el circuito al igual que la tensión aplicada se pueden incluir multímetros.

Posteriormente, se conectan las salidas del electrolizador, una para el hidrógeno y otra para el oxígeno, a las entradas de la pila de combustible mediante los tubos largos de plástico. Más adelante, se debe encender la fuente con el valor de tensión deseado o, en su defecto, activar el foco y colocar el módulo solar a una distancia determinada.

El siguiente paso consiste en observar la producción de hidrógeno y oxígeno en la probeta (indicando que el circuito está bien montado y que no existen fugas) y, una vez almacenada la cantidad deseada, desconectar el electrolizador de la fuente y utilizar dichos cables para conectar la pila de combustible a la caja de mediciones de carga.

2.4 Mantenimiento y servicio

Para limpieza del equipo se utiliza exclusivamente agua limpia o agua destilada, así como un producto acrílico de limpieza de vidrios, ya que algunos componentes son de este material. Se debe evitar en todo momento que el líquido se adentre en alguno de los elementos, sobre todo disolventes.

En lo referente al electrolizador, durante los experimentos se debe comprobar que el nivel de llenado en la probeta en la que se almacena el oxígeno esté al máximo. En caso contrario, rellenarlo con agua destilada (nunca con otro líquido ya que podría dañar los electrolitos) mediante un frasco o botella de plástico.

Si se detecta que los números indicados en las pantallas de la caja de mediciones de carga están borrosos, se deben reemplazar las baterías. Estas deben ser colocadas en sus correspondientes compartimentos y el mismo procedimiento se lleva a cabo para el cronómetro.

El mantenimiento del panel fotovoltaico es imprescindible para evitar problemas que puedan afectar al rendimiento del panel solar como la presencia de suciedad y polvo sobre la superficie del panel, aparición de *hotspots* (punto caliente del panel que surge debido a una elevada resistencia en dicha zona del módulo fotovoltaico que genera una temperatura excesiva) o roturas en el cableado.

Por tanto, se recomienda hacer limpiezas en el panel con agua desmineralizada, siempre y cuando se haya desconectado el inversor previamente. Si la unidad se encuentra apoyada en algún soporte, supervisar el montaje de este (poniendo especial atención en las conexiones o el atornillado).

3. DETALLE DE LAS PRÁCTICAS

Como ya se ha dicho anteriormente, se han diseñado un total de seis prácticas innovadoras, las cuales son divididas en dos bloques.

En concreto, las seis prácticas a realizar son las siguientes:

BLOQUE I. Fundamentos de la tecnología de la pila de hidrógeno.

- Práctica I. Introducción al electrolizador: curva característica, leyes de Faraday y eficiencia.
- Práctica II. Introducción a la pila de hidrógeno: curva característica, leyes de Faraday y eficiencia.
- Práctica III. Asociación de pilas de combustible en serie y paralelo.

BLOQUE II. Integración de la energía solar fotovoltaica para la creación de un sistema híbrido solar-hidrógeno.

- Práctica IV. Caracterización y aplicación de un panel fotovoltaico.
- Práctica V. Aplicación de la energía solar fotovoltaica: curva característica del módulo solar.
- Práctica VI. Aplicación de la energía solar fotovoltaica a la pila de hidrógeno.

El primer bloque comprende los aspectos generales a tratar sobre la pila de hidrógeno, como pueden ser el manejo y entendimiento del electrolizador como unidad productora de hidrógeno, la caracterización de una pila de combustible y la asociación de distintas unidades tanto en serie como en paralelo para tratar de incrementar la potencia generada.

De este modo se comprueba que las reacciones que ocurren en ambos dispositivos son contrarias, siendo la del segundo no espontánea (deducido por medio de la variación de energía de Gibbs de formación). Asimismo, estos han sido caracterizados por medio de curvas características y de potencia, teniendo una tendencia prácticamente lineal en el electrolizador y otra no uniforme en el caso de la pila debido a las pérdidas de tensión. También se ha concluido que las eficiencias que presentan ambos elementos son superiores que las de las tecnologías convencionales, pudiendo obtener valores de potencia útil incluso mayores si las pilas se anexionan en serie. Por último, se ha verificado el cumplimiento de las leyes de Faraday.

El segundo bloque incluye el acercamiento del alumno al funcionamiento de los paneles fotovoltaicos, primero mediante la caracterización de unidades de dimensiones reales y, más adelante, del módulo solar del kit experimental. Por último, se fusionan todos los conceptos analizados previamente para tratar de observar el desempeño del sistema conformado por el módulo solar y la pila de combustible.

Se incluye además en este bloque la energía solar como fuente beneficiosa para la producción de hidrógeno. Primero, se ha realizado la caracterización de un panel de dimensiones reales y se han obtenido los parámetros propios del equipo. Por último, se ha analizado el funcionamiento de un pequeño módulo solar individualmente y en un sistema con la pila de combustible. Después se ha comprobado que cuanto menor es la distancia entre el foco y el receptor, mayor es la potencia entregada al electrolizador y, por ende, más elevada es la producción de hidrógeno, al igual que el rendimiento de la pila. En adición, la inclinación óptima del módulo también asegura mejores resultados en la pila.

En la figura 2 se presenta la disposición de los distintos equipos que se integran en la práctica VI: lámpara, polímetros, caja de mediciones de carga, electrolizador, pila de combustible y módulo solar. Téngase en cuenta que los equipos

empleados para cada práctica, sus conexiones y el proceso experimental aplicado varía en cada práctica para caracterizar fenómenos distintos.

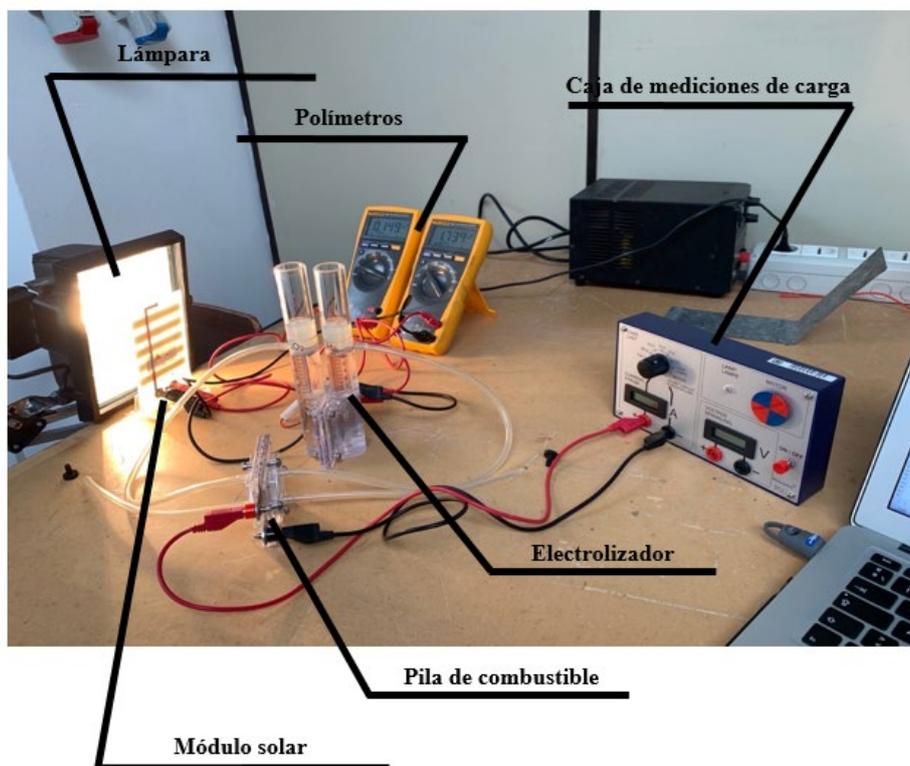


Figura 2. Disposición experimental en la práctica VI.

Las seis prácticas [1] presentan un esquema general estructurado en cuatro epígrafes consecutivos que van guiando al alumno a través de la práctica:

1. Objetivos. Estos suelen ser múltiples. Por ejemplo, en la práctica I hay tres objetivos: introducir al alumno en la electroquímica, de forma que conozca los fundamentos de la electrólisis del agua y compruebe su estequiometría; caracterizar el electrolizador mediante la elaboración de la curva característica; discutir el fenómeno de sobrepotencial, y demostrar la validez de las leyes de Faraday, así como estimar de la eficiencia del equipo.
2. Lista de materiales y equipos empleados.
3. Procedimiento experimental detallado, paso a paso, para alcanzar los objetivos propuestos.
4. Cuestiones teórico-prácticas que sirven para fijar los conocimientos adquiridos. Esta tarea culmina con un informe que es revisado por el profesor que imparte las prácticas. Dado que las prácticas se realizarán normalmente en grupos reducidos de dos o tres alumnos según las indicaciones del profesor, normalmente se realizará un único informe por grupo.

Todas las prácticas son innovadoras en su campo y han sido diseñadas y recogidas en un manual que se le ofrece al alumno al comienzo de curso como guía para que realice sistemáticamente los trabajos.

El objetivo último de estas prácticas es la preparación del estudiante para su futura integración en la sociedad laboral a través del desarrollo de sus capacidades. Para ello, se fomentan actividades que mejoran su empleabilidad, aportando competencias profesionales.

Es decir, el estudiante aplica y complementa los conocimientos adquiridos en su formación académica, favoreciendo la adquisición de competencias que le preparan para el ejercicio de actividades profesionales, faciliten su empleabilidad y promuevan su capacidad de emprendimiento.

El trabajo presentado en este artículo ha sido realizado durante el presente curso académico por lo que no se ha podido realizar todavía un estudio cuantitativo de su impacto en la docencia. En el próximo curso se pretende que los alumnos realicen sus prácticas docentes en esta materia mediante la guía de prácticas que se ha desarrollado. Esto permitirá obtener una realimentación por parte de los alumnos que enriquezca el trabajo llevado a cabo.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha presentado y abordado una serie de prácticas de laboratorio enfocadas al estudio de las pilas de hidrógeno mediante un kit experimental para el alumno cuyos elementos principales son un módulo solar, un electrolizador y una pila de combustible tipo PEM. Estas prácticas de laboratorio suponen la formación integral del alumno acerca de la tecnología de hidrógeno.

Mediante el desarrollo de estas prácticas de laboratorio se ha realizado un estudio exhaustivo acerca de la tecnología de las pilas de hidrógeno, comentando desde el origen y descripción de este elemento, pasando por la descripción detallada de los dispositivos que intervienen, hasta llegar a la elaboración de estudios experimentales en los que se lleva a cabo la caracterización de la pila de combustible y de un módulo y un panel fotovoltaico.

A través de las prácticas queda patente que, la energía solar fotovoltaica también constituye una importante herramienta que permite incrementar el carácter renovable de las pilas de combustible, puesto que gracias a la energía obtenida a través de los paneles, se puede generar hidrógeno verde en los electrolizadores, el cual puede ser aprovechado, posteriormente, para la generación de energía eléctrica con una pila. Asimismo, se debe destacar que las condiciones atmosféricas en España permiten a las unidades fotovoltaicas operar a su máximo rendimiento.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Medina, A., “Caracterización de las pilas de hidrógeno: prácticas de aplicación a la docencia”, Trabajo Fin de Grado en Las Palmas de Gran Canaria, ULPGC, España, septiembre 2021.
- [2] Agnolucci, P., “Economics and market prospects of portable fuel cells”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(17), 4319-4328. doi: 10.1016/j.ijhydene.2007.03.042, (2007).
- [3] Staffell, I., Scamman, D., Velazquez Abad, A., Balcombe, P., Dodds, P. and Ekins, P., “The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system”, *The Royal Society of Chemistry*, 12, 463 – 491, doi: 10.1039/c9ee01157e, (2019).
- [4] Macdonald, A., Berry, M., “Energy through Hydrogen. Research Notes”, Heliocentris Energiesysteme GmbH, 1st edition: September 2000, ISBN: 3935161034.
- [5] Macdonald, A., Berry, M. “Science through Hydrogen. Clean Energy for the Future”, Heliocentris Energiesysteme GmbH, 1st edition: September 2000, ISBN: 393516100X.
- [6] Macdonald, A., Berry, M., “Chemistry through Hydrogen. Clean Energy for the Future”. Heliocentris Energiesysteme GmbH, 1st edition: September 2000, ISBN: 3935161018.
- [7] Macdonald, A., Berry, M., “Physics through Hydrogen. Clean Energy for the Future”. Heliocentris Energiesysteme GmbH, 1st edition: September 2000, ISBN: 3935161026.
- [8] Edwards, P., Kuznetsov, V., David, W., & Brandon, N. “Hydrogen and fuel cells: Towards a sustainable energy future”. *Energy Policy*, 36(12), 4356-4362, doi: 10.1016/j.enpol.2008.09.036, (2008).
- [9] Asencio, P., “Hidrógeno y pila de combustible”. Madrid. <<https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2007/08/Cuadernos-energias-renovables-para-todos-hidrogeno-y-pila-de-combustible-fenercom.pdf>>, (14 de octubre de 2021).
- [10] “Solar Fotovoltaica”, IDAE. <<https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-electrico/solar-fotovoltaica>>, (14 de octubre de 2021).
- [11] “The importance of renewable energies”, ACCIONA, Business as unusual. <<https://www.acciona.com/renewable-energy/>>, (14 de octubre de 2021).
- [12] ¿Qué es la energía fotovoltaica? - APPA Renovables. <<https://www.appa.es/appa-fotovoltaica/que-es-la-energia-fotovoltaica/>>, (14 de octubre de 2021).