



## Guía para Profesores: Producción y utilización de hidrógeno verde para mitigación del Cambio Climático

---

### **LEER ANTES DE REALIZAR NINGUNA OTRA ACCIÓN**

¡ESTA ES LA VERSIÓN 1 (abril 2024) DE LA GUÍA PARA PROFESORES! Esta versión es la versión completa para el conjunto de niveles (4ºESO, 1º y 2º Bachillerato). Durante la actividad se especificarán los detalles de lo que se debe hacer en cada grupo según su nivel (4ºESO, 1º y 2º Bachillerato).

### **LEER EL APARTADO CONFIGURACIÓN DEL LABORATORIO Y SEGURIDAD**



## Cuestiones básicas de seguridad en laboratorios

**¡ANTES DE REALIZAR NINGUNA ACCIÓN SOBRE LA QUE SE PUEDA TENER DUDA,  
CONSULTAR A UN PROFESOR IMPLICADO!**

- Antes de comenzar el primer experimento de referencia, es imprescindible seguir las indicaciones de seguridad. Cada grupo de alumnos podrá realizar el montaje junto al profesorado. **Lo primero de todo es acceder a los laboratorios utilizando los equipos de protección individual existentes: gafas, guantes y bata. No es posible acceder a los laboratorios sin estos equipos de protección individual.**
- **Como norma básica los alumnos deben seguir las indicaciones del profesorado todo el tiempo y no tocar ningún objeto del resto del laboratorio.**
- El montaje incluye pequeñas piezas que se pueden perder fácilmente. Por eso es una buena idea un área de recursos para cada mesa de laboratorio o para toda la clase, de forma que se minimicen las piezas perdidas.
- Si hubiera que utilizar un dispositivo de calentamiento (secador de pelo o placa calefactora), habría que hacerlo en un ajuste bajo. Para garantizar que la temperatura no sube demasiado, se puede usar el termómetro para asegurarse de que el aire no se calienta más allá de esa temperatura antes de comenzar.

## Misión: obtención de energía limpia y asequible

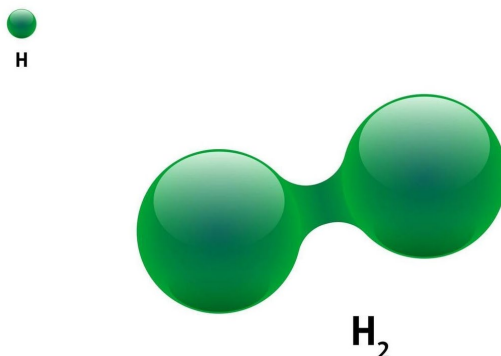
### Objetivo

El objetivo de esta MISIÓN es que los estudiantes puedan conocer cómo se puede producir hidrógeno verde en un electrolizador a partir de electricidad renovable proveniente de un panel solar, abordando el almacenamiento de esta molécula y su potencial empleo para suministrar una pila de combustible, la cual puede generar electricidad para diferentes aplicaciones. En este contexto, se realizará una experimentación a escala de cómo funcionarían los diferentes equipos integrados en una aplicación residencial.

La MISIÓN consiste en un conjunto de 4 experimentos donde deberán calcular el flujo de producción de hidrógeno cuando el panel se encuentra conectado directamente al electrolizador, el flujo de producción cuando existen cargas en paralelo, el consumo de hidrógeno para alimentar unas luces LED y un motor eléctrico que simulen la iluminación y un electrodoméstico en una vivienda, y el consumo de hidrógeno de un motor eléctrico de un vehículo.

### Contexto

El hidrógeno es el **primer elemento de la tabla periódica**. Es el elemento químico más ligero que existe, su átomo está formado por un protón y un electrón y es estable en forma de molécula diatómica ( $H_2$ ). En condiciones normales se encuentra en estado gaseoso, y es insípido, incoloro e inodoro. En la Tierra es muy abundante, constituye aproximadamente el 75 % de la materia del Universo, pero se encuentra combinado con otros elementos como el oxígeno formando moléculas de agua, o el carbono, formando compuestos orgánicos. Por tanto, no es un combustible que pueda tomarse directamente de la naturaleza, sino que es un vector energético (como la electricidad) y por ello se tiene que "fabricar."



**Figura 1.** Molécula de hidrógeno ( $H_2$ ).

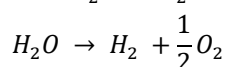
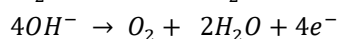
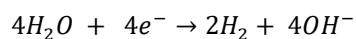


Tradicionalmente, el hidrógeno se ha empleado como materia prima en la industria petroquímica, producción de fertilizantes, metanol y amoníaco. Este hidrógeno que lleva utilizándose durante décadas tiene origen fósil, obteniéndose a partir de hidrocarburos, lo que se conoce como “hidrógeno gris”. Para descomponer los hidrocarburos se emplea agua, lo que provoca que se genere CO<sub>2</sub> como sub-producto. En la actualidad, más de un 95% del hidrógeno producido y consumido a nivel mundial es gris y contaminante.

La situación de emergencia climática actual ha puesto de manifiesto la necesidad de acometer una transición energética que reduzca la dependencia de nuestra sociedad de los combustibles fósiles. Así, se ha promocionado la instalación a gran escala de las energías renovables como alternativa limpia. Sin embargo, estas energías renovables son intermitentes debido a la disponibilidad de recursos naturales para producirla. Por ello, en los últimos dos décadas el hidrógeno ha estado en el foco del paradigma energético mundial, siendo un elemento que puede jugar un papel fundamental como vector energético (portador de energía) en la transición hacia un modelo económico y social descarbonizado y sostenible, permitiendo almacenar energía renovable cuando existan excesos de la misma y abastecer diferentes demandas energéticas en momentos de déficit. Este hidrógeno se produce a partir de energías renovables y agua, descomponiendo la molécula en hidrógeno y oxígeno, por lo que se trata de un proceso libre de emisiones de gases de efecto invernadero. A este hidrógeno se le conoce como “hidrógeno verde”.

### Reacciones involucradas en la producción y consumo de hidrógeno verde

La generación de hidrógeno verde tiene lugar en un dispositivo denominado electrolizador. Este equipo consta, de forma simplificada, de un ánodo y un cátodo en contacto con un electrolito. Dependiendo del tipo de electrolizador este electrolito puede ser líquido (electrolizador alcalino) o ser una membrana sólida polimérica o cerámica (electrolizador de intercambio protónico o aniónico, electrolizador de óxido sólido). Las semi-reacciones que se produzcan en el ánodo o en el cátodo variarán dependiendo del tipo de electrolito que se utilice. Para producir hidrógeno verde se ha de aportar agua desionizada y desmineralizada al electrolizador, además de electricidad que fluya entre ánodo y cátodo. Si la electricidad es renovable, estamos hablando de hidrógeno verde. Así, estamos hablando de un proceso **electroquímico**. En el caso de un electrolizador alcalino, las semi-reacciones que se producen son las siguientes (RX1):



RX1 → cátodo

RX1 → ánodo

RX1 → global



Sin embargo, para un electrolizador de intercambio protónico con electrolito sólido en forma de membrana polimérica, las semi-reacciones que tienen lugar son las siguientes (RX2):



Como puede comprobarse, en este caso no es necesario aportar iones hidroxilos  $OH^-$  para completar la reacción. **Además, se aprecia que no se produce ningún tipo de emisiones de  $CO_2$  al no intervenir ningún átomo de carbono en la reacción.**

Una vez que tenemos la energía almacenada en nuestro vector energético (hidrógeno verde), podemos utilizarlo en diferentes dispositivos para suministrar la energía precisada por diversos procesos. Uno de los dispositivos más empleados es la pila o celda de combustible de hidrógeno. De forma análoga al electrolizador, la pila de combustible también tiene un ánodo, un cátodo y un electrolito, siendo el más utilizado la membrana polimérica de intercambio protónico. Sin embargo, este dispositivo genera electricidad en lugar de consumirla. Esta electricidad se produce al reaccionar el hidrógeno almacenado con el oxígeno que hay en el ambiente o que también hemos podido almacenar, produciendo electricidad continua que fluye entre el ánodo y el cátodo. Así, si colocamos cualquier equipo que consuma electricidad entre ambos electrodos, seremos capaces de eliminar las emisiones asociadas a la operación del mismo. Las reacciones que tienen lugar en la pila de combustible son (RX3):



Durante esta MISIÓN, se empleará una pila de combustible reversible que puede funcionar como electrolizador y como pila de combustible para generar hidrógeno y electricidad respectivamente (RX2 y RX3). Así mismo, se manipulará las condiciones de la reacción o reacciones (RX2 y RX3) para ver si podemos cambiar la generación de hidrógeno y la salida de la celda, es decir, la potencia eléctrica y ver si las aspas del molino se mueven más o menos deprisa y si el depósito de hidrógeno se llena/vacía más deprisa.



## Montaje básico previo a la experimentación

### Tiempo de preparación inicial y duración

En general, se necesitan del orden de 1 hora para dejar preparado el experimento antes de la llegada de los estudiantes. En este caso se realiza un *checklist* que consiste en:

- Mesas preparadas
- Disponibilidad de agua destilada
- Disponibilidad de EPIs: guantes, gafas y batas
- Papel de secado
- Material de laboratorio y demás enseres: vasos de precipitados, matraces, botellas de agua destilada, etc.
- Copia de hojas de seguridad
- Cronómetros
- *Multímetros*

### Elementos necesarios para el montaje

Para realizar los diferentes experimentos necesitaremos diferentes elementos, los cuales estarán a disposición de los estudiantes. A continuación, se muestra un listado en la tabla 1 de los elementos disponibles para la experimentación necesaria:

**Tabla 1.** Elementos básicos para la realización de la práctica



Motor eléctrico (aspas montadas)



Pila de combustible reversible



Panel solar



Cableado



Tanques hidrógeno y oxígeno



Tubo de plástico



Luces LED



Lámpara solar



Panel de conexiones



Monitor de energía renovable



## Pasos básicos para el montaje

En el momento de realizar la experimentación, se debe disponer los elementos detallados en la Tabla 1. Ese material estará disponible por parte de los profesores que atenderán y guionizarán la práctica. El montaje básico sería el siguiente.

- 1) Se deben conectar los terminales del panel solar al monitor de energía renovable y posteriormente al panel de conexiones.
- 2) A continuación, hay que conectar con los cables el panel de conexiones al motor eléctrico, las luces LED y la pila de combustible reversible (fijarse en los colores rojo y negro que marcan la polaridad positiva y negativa respectivamente).
- 3) Posteriormente, los tanques de hidrógeno y oxígeno se llenan de agua destilada hasta el 0. En su interior, se dispondrán las campanas donde se almacenará tanto el hidrógeno como el oxígeno. Hay que tener cuidado de no dejar tapadas las muescas de la parte inferior de la campana para que pueda desplazarse el agua contenida en su interior.
- 4) En ambos extremos de la pila de combustible reversible, si disponen dos tubos con dos tapas, una roja (lado oxígeno) y una negra (lado hidrógeno). Tras retirar la tapa roja, se introduce una jeringa llena de agua destilada y se vacía en el interior de la celda hasta que salga agua por la parte interior de esta.
- 5) Tras esto, se conectarán las campanas a las salidas de hidrógeno y oxígeno respectivamente de la pila de combustible reversible.

La práctica consiste en un conjunto de 5 experimentos donde se medirá la tensión, corriente y potencia que puede suministrar el panel solar en función de la proximidad de la lámpara solar y los equipos conectados, el flujo de hidrógeno que se produce cuando sólo la pila de combustible reversible está conectada al panel de conexiones y cuando se conectan además las luces LED y el motor eléctrico, y la tensión y corriente que produce la pila conectada solo a las luces LED y/o al motor eléctrico.

## Limpieza entre experimentos

Para limpiar **la celda de combustible** después de usarla tras cada experimento, hay que seguir el siguiente procedimiento:

- 1) Desconectar el tanque de combustible de la celda de combustible.





- 2) A continuación, hay que llenar una jeringa con agua destilada.
- 3) Posteriormente, se conecta la jeringa (con el agua destilada) a la celda, y se presiona ligeramente para que el agua de la jeringa mueva la solución agotada en el interior de la celda.
- 4) A continuación, hay que desconectar la jeringa y el tubo de la celda de combustible y llenar la jeringa simplemente con aire. Hay que conectar nuevamente la jeringa para empujar aire hacia la celda de combustible. De esta forma, la celda de combustible está lista para volver a usarse por otros estudiantes o para otro experimento.



## Problemas comunes

- Es necesario comprobar que la polaridad en las conexiones es la correcta.
- Si no se almacena hidrógeno, hay que comprobar que las muescas del tanque no están tapadas y que los tubos están bien conectados
- Si no fluye la electricidad, hay que comprobar que todas las conexiones estén correctamente cableadas y volver a intentarlo. Suele ser habitual que el cable se pueda soltar y por eso no fluya la corriente eléctrica.
- A veces se necesita un leve golpecito para que comience a girar el motor de la turbina. Este toque debe ser muy leve o leve y sirve para vencer la fricción inicial de la hélice.



## Experimentación

### Experimento 1

Para realizar el experimento experimento 1, se realizarán los siguientes pasos:

- 1) Conectar el panel solar al monitor de energía renovable y montarlo en posición vertical. Este equipo nos dará la tensión, corriente y potencia que está generando el panel solar.
- 2) Conectar la lampara solar y situarla a 10 cm, después a 30 cm y por último a 50 cm del panel solar.
- 3) Repetir con el panel montado en posición horizontal.

Los estudiantes deben anotar los valores que refleje el monitor de energía renovable en la Tabla 2:

**Tabla 2.** Valores obtenidos de tensión, corriente y potencia para el experimento 1

	Tensión	Corriente	Potencia
	V	A	W
Panel vertical – 10 cm			
Panel vertical – 30 cm			
Panel vertical – 50 cm			
Panel horizontal – 10 cm			
Panel horizontal – 30 cm			
Panel horizontal – 50 cm			

Lo primero que hay que pedir a los estudiantes es que anoten en su plantilla de respuestas a completar la respuesta a la siguiente pregunta P1:

**Pregunta P1.** *¿En qué posición y a qué distancia produce más potencia el panel? ¿Por qué ocurre esto? ¿Qué efecto tiene la distancia en la potencia generada?*

En este sentido, los estudiantes deben identificar la mejor manera de colocar el panel forma indudable y explicar de forma breve por qué ocurre esto. Los paneles generarán más potencia en la posición en la que la luz incida de una forma más perpendicular. Por último, deben exponer si la potencia aumenta o disminuye con la distancia entre el panel



y la lámpara. Lógicamente, la potencia generada disminuye a medida que aumenta la distancia, ya que se pierde intensidad lumínica incidente sobre el panel.

**Pregunta P2.** ¿Por qué necesitamos dos cables?

Los estudiantes deben explicar que se necesitan los cables para cerrar el circuito eléctrico y que puedan fluir los electrones.

- 4) En este punto, se desconecta el monitor de energía renovable y se conecta el panel solar al panel de conexiones.
- 5) A su vez, se conecta la pila de combustible reversible al panel de conexiones. Los alumnos dispondrán de un cronómetro para apuntar cada minuto el volumen de agua desionizada desplazada en el depósito de hidrógeno que posee marcas en mililitros. El cronómetro se activará cuando comience a salir la primera burbuja de hidrógeno del tubo. Los alumnos tomarán 3 medidas en 3 minutos, una cada minuto.
- 6) Posteriormente, los alumnos conectarán el motor eléctrico al panel de conexiones y repetirán el proceso. Por último, conectarán la iluminación al panel de conexiones y repetirán las medidas. Para cada uno de los bloques, realizarán 3 medidas en 3 minutos, una cada minuto.
- 7) El flujo de hidrógeno producido vendrá dado por la siguiente expresión:

$$\text{Flujo } H_2 = \frac{V_2 - V_1}{t} \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$

Donde V2 es el volumen que alcanza el agua al final del minuto, V1 es el valor de volumen inicial y t es el tiempo que transcurre en minutos. El valor inicial en el segundo experimento y sucesivos se corresponderá con el valor final del experimento anterior.

Los estudiantes deben cumplimentar la Tabla 3 con los valores medidos:

**Tabla 3.** Valores obtenidos de volumen y flujo de hidrógeno

	Tiempo	Volumen V1	Volumen V2	Flujo H <sub>2</sub>
Experimento	Min	ml	ml	ml/min
Electrolizador 1	1			



Electrolizador 2	2			
Electrolizador 3	3			
Electrolizador + motor 1	4			
Electrolizador + motor 2	5			
Electrolizador + motor 3	6			
Electrolizador + motor + LED 1	7			
Electrolizador + motor + LED 2	8			
Electrolizador + motor + LED 3	9			

Los estudiantes pueden ahora responder a la siguiente pregunta P3:

**Pregunta P3.** *¿Puedes explicar por qué varía el flujo de hidrógeno producido?*

Cuanto más elementos conectemos al mismo tiempo que el electrolizador, menos energía tenemos disponible para producir hidrógeno.

- 8) Tras completar esta secuencia de experimentos, se desconectará el panel del panel de conexiones, la pila de combustible reversible, el motor eléctrico y las luces LED.
- 9) La pila de combustible se conectará al medidor de energía renovable y este a su vez al panel de conexiones. Los alumnos tendrán que realizar mediciones de tensión, intensidad y potencia proporcionada por la pila de combustible cuando se conectan las luces LED, el motor eléctrico y ambos al mismo tiempo. Se realizarán 2 mediciones en 2 minutos, una vez cada minuto. Para ello deberán rellenar la Tabla 4.

**Tabla 4.** Valores obtenidos de tensión, corriente y potencia para el experimento 1

	Tiempo	Tensión	Corriente	Resistencia	Potencia
	min	V	A	$\Omega$	W
Pila + LED 1	1				
Pila + LED 2	2				
Pila + motor 1	3				
Pila + motor 2	4				
Pila + motor + LED 1	5				
Pila + motor + LED 2	6				

- 10) Al mismo tiempo, deberán medir el flujo de hidrógeno consumido por la pila de combustible. Este flujo consumido se calcula con una fórmula similar a la expuesta con anterioridad:



$$\text{Flujo } H_2 = \frac{V1 - V2}{t} \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]$$

En este caso, V1 es el volumen inicial que refleja el tanque y V2 el final al concluir el minuto. Los alumnos tendrán que rellenar la Tabla 5.

**Tabla 5.** Valores obtenidos de volumen y flujo de hidrógeno

	Tiempo	Volumen 1	Volumen 2	Flujo H <sub>2</sub>
Experimento	Min	ml	ml	ml/min
Pila + LED 1	1			
Pila + LED 2	2			
Pila + motor 1	3			
Pila + motor 2	4			
Pila + motor + LED 1	5			
Pila + motor + LED 2	6			

En este punto, los alumnos podrán contestar la siguiente pregunta:

**Pregunta P5** ¿Puedes explicar por qué varía el flujo de hidrógeno consumido?

Cuantos más elementos conectemos a la pila de combustible, mayor consumo tendremos de hidrógeno para producir una mayor cantidad de potencia.

Por último, dado que la tensión es igual a la corriente en amperios multiplicado por la resistencia en ohmios (es decir, según la ley de Ohm  $V = IR$ ), en las dos mediciones realizadas para LED se debería obtener la misma resistencia medida en ohmios ( $\Omega$ ). Igualmente, en el caso del motor la resistencia debería permanecer constante. En este punto se preguntaría lo siguiente:

**Pregunta P6** ¿La resistencia obtenida en el caso de la medición con el motor y las luces LED es la suma de los dos caso anteriores? Explica tu respuesta

La respuesta es no, dado que las resistencias están conectadas en paralelo. Esto supone que no se suma el valor de la resistencia de cada componente si no sus inversos.



## Conexión con los objetivos de Desarrollo Sostenible

Estas actividades prácticas están alineadas con el cumplimiento los Objetivos de Desarrollo Sostenible que figuran en la Agenda 2030. En particular la MISIÓN de CAMBIO CLIMÁTICO está vinculada al ODS 7 Energía Asequible y No Contaminante, y 13 Acción por el Clima. Nuestro objetivo es divulgar para concienciar a la ciudadanía, en este caso particular, a los estudiantes de 4º ESO, y 1º, 2º de Bachillerato sobre la importancia de desarrollar tecnologías innovadoras que nos permitan afrontar con garantías la transición energética, la descarbonización de nuestra economía y de como el conocimiento juega un papel fundamental a la hora de tener un mejor futuro para todas y todos.

### Vinculación con el trabajo de investigación del grupo PAS en materia de energía mitigación del cambio climático

El Grupo de Procesos Avanzados de Separación (Grupo PAS) lleva más de 10 años trabajando en la definición de procesos y sistemas innovadores basados en membranas para producir hidrógeno renovable de forma eficiente y sostenible, así como aumentar el rendimiento global de la obtención de energía en pilas de combustible. De esta forma, todo el conocimiento adquirido a lo largo de los años se ha aplicado en diversos sectores como el industrial, el transporte y el residencial.

En este último caso, el Grupo PAS ha llevado a cabo el diseño, desarrollo e implementación de la primera planta piloto en España capaz de abastecer de forma 100% autosuficiente e ininterrumpida una vivienda social. Este proyecto pionero ha permitido a una pareja vulnerable económicamente acceder a una energía 100% limpia, eficiente y sostenible, evitando la pobreza energética de los habitantes más desfavorecidos.

De igual forma, el Grupo PAS desarrolla diferentes tipos de membranas para recuperar hidrógeno de corrientes residuales con alto contenido en este caso, valorizando dichos efluentes que de otra forma serían vertidos al medio ambiente. Este enfoque permite cerrar el ciclo aplicando el concepto de economía circular, de forma que una industria pueda utilizar parcial o totalmente sus residuos gaseosos para alimentar sus procesos con energía.