



## **ESTUDIO Y COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE DIVERSAS TRANSFORMACIONES ENERGÉTICAS UTILIZANDO UNA PILA DE COMBUSTIBLE**

**HERNÁNDEZ FERNÁNDEZ, Francisco José; IBARRA BERROCAL, Isidro; PÉREZ DE LOS RÍOS, Antonia**

**Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XIII, 52, E-30203 Cartagena, Murcia, España.**

### **RESUMEN**

Dada la complejidad y la riqueza del concepto de energía, así como la imprecisión cometida al definirlo relacionándolo exclusivamente con transformaciones mecánicas, se abordará en esta ponencia una actividad experimental para contribuir, de forma estimulante para el alumno, a la comprensión de las transformaciones energéticas y su aplicación, al vincular la teoría con la práctica. Para ello se ha diseñado una experiencia donde se llevan a cabo diferentes transformaciones energéticas. En una primera etapa se producirá energía eléctrica a partir de energía solar mediante una célula fotovoltaica. La electricidad así producida se transformará en energía química ( $H_2 + O_2$ ) mediante la hidrólisis del agua en un electrolizador.  $H_2$  y  $O_2$  pueden volver a combinarse en una pila de combustible tipo PEM (membrana de intercambio de protones) produciendo, cuando sea necesario, energía eléctrica que podrá transformarse en energía lumínica, en una lámpara, o en energía mecánica en un motor (Figura 1).



Figura 1: Sistema pila de combustible

En el sistema descrito pueden realizarse un importante número de actividades experimentales [1] tales como: Caracterizar células solares, obtener las curvas características y la eficiencia de celdas electrolíticas y de pilas de combustible, comprobar la 1ª Ley de Faraday, experimentar con distintas conexiones (serie y paralelo) de pilas de combustible y estudiar la reacción  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{Energía}$ .

El desarrollo de la práctica pone en relieve la utilización de dos tecnologías emergentes para la producción de energía: las células fotovoltaicas y las pilas de combustión, así como el empleo de la electrolisis del agua como medio de almacenar la energía producida en forma de energía química. La combinación adecuada de estas tres tecnologías dará lugar a sistemas autónomos de generación, almacenaje y utilización de energía, que permitirán aprovechar una energía renovable como la solar para suministrar energía eléctrica sostenible y limpia donde se requiera y en el momento adecuado.

Las prácticas que se proponen se enmarcan dentro de las asignaturas *Tecnología de Combustibles* y *Ampliación de Tecnología de Combustibles*, asignaturas pertenecientes a la titulación de *Ingeniero Técnico en Recursos Energéticos, Combustibles y Explosivos* impartida en la Universidad Politécnica de Cartagena. Los descriptores del Plan de Estudios de la asignatura *Tecnología de Combustibles* tratan sobre la génesis, clasificación, producción

de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos y los descriptores de la asignatura de *Ampliación de Tecnología de Combustibles* sobre las aplicaciones de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, junto con otros temas relacionados con la seguridad e impacto ambiental en su aplicación. Al ser una práctica que engloba un amplio número de aspectos relacionados con la producción de energía y en especial con la utilización de  $H_2$  como combustible, se ajusta en gran medida a los descriptores de las asignaturas. Por otra parte, atendiendo el grado de conocimiento previo de los alumnos, es posible su adaptación a otras asignaturas que se encuentren dentro del ámbito científico-tecnológico.

A continuación se presenta una de las posibles experiencias que pueden realizarse con el dispositivo pila de combustible. Inicialmente se describen los conceptos y dispositivos más importantes utilizados en el desarrollo de la misma. Posteriormente se procede a la descripción de la práctica y finalmente se propone una serie de ejercicios que los alumnos deben resolver a partir de los datos experimentales obtenidos.

## **1. Introducción**

En la presente práctica se pondrá en relieve la utilización de dos tecnologías para la producción de energía, *células fotovoltaicas* y *pilas de combustión* y la utilización de la *electrolisis del agua* como medio de almacenar la energía producida en forma de energía química. La combinación adecuada de estas tres tecnologías dará lugar a sistemas autónomos de generación, almacenaje y utilización de energía eléctrica. En una primera etapa se producirá energía eléctrica mediante una célula fotovoltaica, que podrá ser almacenada de forma indefinida en forma de energía química ( $H_2 + O_2$ ) mediante la electrolisis del agua. El  $H_2 + O_2$  se combinarán en una pila de combustión para la producción de energía eléctrica cuando sea necesario.

## 1.1. Células solares

Las células solares (en adelante CL), también denominadas células fotovoltaicas, se construyen con materiales semiconductores, que como su nombre indica: ni son materiales conductores ni aislantes. Los dos elementos semiconductores más importantes son el germanio (Ge) y el silicio (Si).

### Diferencia principal entre un metal, un aislante y un semiconductor

En un *conductor* (Figura 2), los electrones exteriores de sus átomos pueden moverse libremente, están deslocalizados. En términos energéticos quiere decir que los electrones de la última capa del átomo ocupan niveles de energía altos que les permiten escaparse del enlace que les une a su átomo. El conjunto de estos niveles, muy próximos unos de otros, forman parte de la llamada: banda de conducción (en adelante BC). Esta banda está formada, además, por niveles de energía vacíos, y es la existencia de estos niveles la que permite que los electrones puedan saltar a ellos cuando se les pone en movimiento, al aplicar un campo eléctrico, originándose una corriente eléctrica. Se puede afirmar que los metales son conductores de la electricidad. Los demás electrones del átomo, con energías menores, forman la banda de valencia (BV). La distancia entre ambas bandas, en términos de energía, es nula; ambas bandas se solapan de manera que los electrones de la BV con más energía se encuentran, también, en la BC.

En las *sustancias aislantes* la BC está vacía porque todos los electrones, incluidos los de la última capa están ligados al átomo, tienen una energía más baja, y por lo tanto se encuentran en la banda de valencia, y además la distancia entre las bandas (llamada banda prohibida, o gap) es grande, con lo que les es muy difícil saltar a la BC. Como la BV está llena, los electrones no pueden moverse y no puede generarse corriente eléctrica.

En los *semiconductores*, la separación que hay entre la BV y la BC es pequeña consiguiendo los electrones con relativa facilidad pasar a la BC. Así se explica que los semiconductores aumentan su conductividad con la temperatura, pues la energía térmica suministrada es suficiente para que los electrones puedan saltar a la banda de conducción, mientras que los conductores la disminuyen, debido a que las vibraciones de los átomos aumentan y dificultan la movilidad de los electrones.

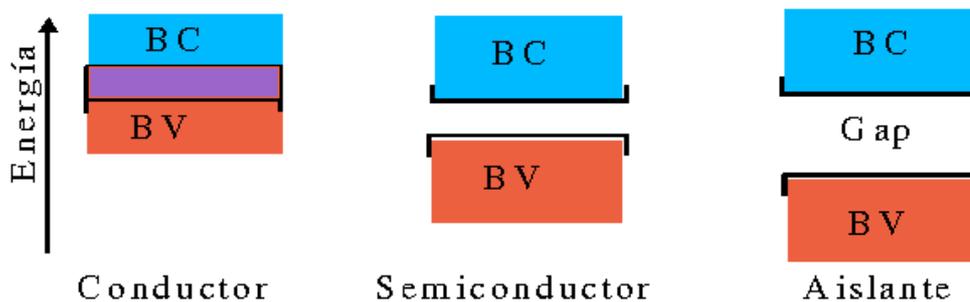


Figura 2: Diferencias energéticas entre la banda de valencia (BV) y la banda de conducción en conductores, semiconductores y aislantes.

### Fundamentos del funcionamiento de una célula solar

El silicio (Si) es el principal material empleado en la fabricación de las células solares. El Si tiene 14 electrones; de ellos, 4 se encuentran en la última capa. En un material de Si puro cada átomo está enlazado a otros 4 en una estructura tetraédrica (Figura 3), la misma que presenta el diamante. Si un fotón de un rayo de luz que incide sobre el Si tiene la suficiente energía, puede impulsar a un electrón de la BV a la BC, aunque el tiempo que suele permanecer en ella es muy pequeño regresando a la BV. Para conseguir que los electrones puedan saltar con facilidad a la BC y permanezcan allí, se añaden impurezas al Si. Para ello se adicionan al cristal de Si algunos átomos de determinados elementos: Fósforo, Boro, Galio, etc. Este proceso recibe el nombre de “dopaje”. Si el elemento que se añade tiene 5 electrones en su última capa, como el fósforo, 4 electrones se emplean en los enlaces con los

4 átomos de Si vecinos, y el 5º queda parcialmente libre, con lo que, desde el punto de vista energético, se coloca muy cerca de la BC y la conductividad del Si aumenta; se obtiene así Si tipo n (Si-n). Si la impureza que se añade es un elemento con 3 electrones en la última capa entonces falta uno para completar los 4 enlaces con los átomos de Si vecinos, originándose un hueco. A este hueco puede desplazarse un electrón de un átomo vecino, y así sucesivamente, el hueco se puede desplazar por todo el cristal; o dicho de otro modo, los electrones también se pueden desplazar aumentando con ello la conductividad del Si. Se obtiene así Si tipo p (Si-p).

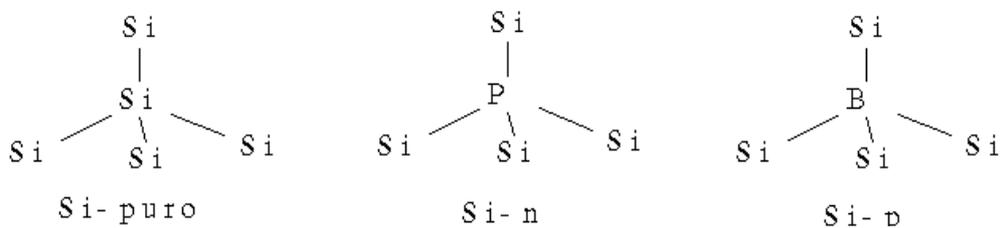


Figura 3: Silicio puro y dopado con Fósforo y Boro

### Diodo semiconductor

La unión de una lámina de Si-n con otra de Si-p forma un diodo semiconductor. Las células solares son básicamente diodos semiconductores (Figura 4). En el Si-n aparecen electrones en la BC, mientras que en el Si-p aparecen huecos. Los electrones atraviesan la unión y se combinan con los huecos. Van cargándose, el Si-n positivamente y el Si-p negativamente, con lo que aparece una diferencia de potencial que se opone al paso de más electrones. Cuando es lo suficientemente grande el flujo cesa. Todo esto ocurre en las cercanías de la unión “np”.

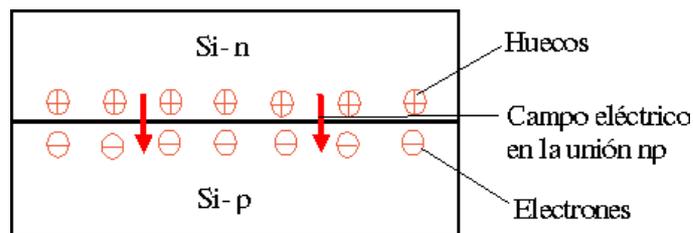


Figura 4: Diodo de silicio

## Células solares

Las *células solares* (CS) son diodos contruidos de una manera especial (Figura 5). La lámina de Si-n se coloca arriba y es muy fina, la de Si-p debajo y es más gruesa. La luz incide en la lámina de Si-n. Los fotones incidentes comunican su energía a los electrones que saltan a la BC, originándose, con ello, también huecos. Debido a la diferencia de potencial en la unión “np” los electrones son repelidos hacia la superficie de arriba de la lámina de Si-n alejándose de la unión; y al contrario, los huecos son arrastrados al Si-p. Como resultado entre las superficies externas de ambas láminas de Si aparece una diferencia de potencial, que suele ser de 0.5 ó 0.6 Voltios.

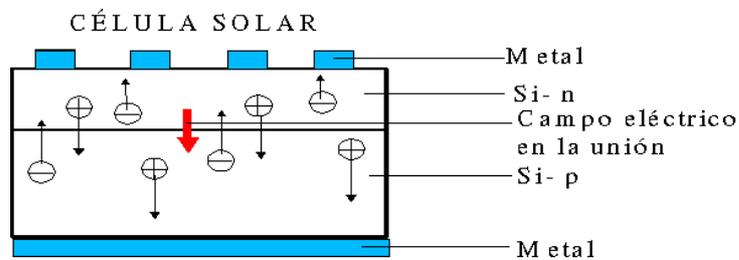


Figura 5: Célula solar.

Si conectamos la CS a un circuito externo, se obtendrá corriente eléctrica (Figura 6).

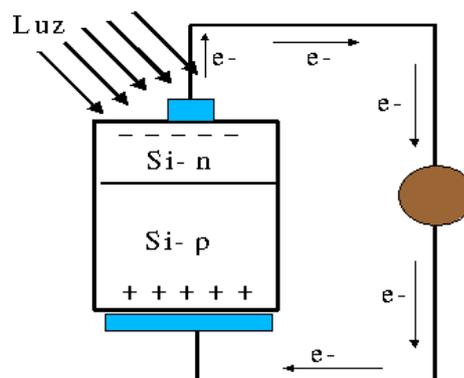


Figura 6: Producción de corriente eléctrica mediante una célula solar.

Para obtener mayores diferencias de potencial se conectan varias CS en serie. Si lo que se quiere es obtener mayores intensidades de corriente, las CS se conectan en paralelo. Los paneles que se utilizan en las instalaciones solares llevan conectadas en serie y en paralelo las CS necesarias para conseguir los valores deseados (en torno a 12 V y 0,5 A).

Por lo tanto, la energía que tienen los fotones incidentes es transferida a los electrones, originándose, una diferencia de potencial que puede aplicarse a un circuito exterior. Se ha convertido de este modo la energía solar en energía eléctrica. Una célula solar es capaz de convertir hasta un 30% de energía solar en eléctrica. En un día claro, la energía solar incidente por metro cuadrado y por segundo es de 1000 W.

## **1.2. Electrolisis del agua**

La electrolisis es el proceso de descomposición de una sustancia por medio de la electricidad. En este proceso la energía eléctrica se convierte en energía química.

La mayoría de los compuestos inorgánicos y algunos de los orgánicos se ionizan al fundirse o cuando se disuelven en agua u otros líquidos; es decir, sus moléculas se disocian en especies químicas cargadas positiva y negativamente que tienen la propiedad de conducir la corriente eléctrica. Si se colocan un par de electrodos en una disolución de un electrolito (compuesto ionizable) y se conecta una fuente de corriente continua entre ellos (Figura 7), los iones positivos de la disolución se mueven hacia el electrodo negativo (cátodo) y los iones negativos hacia el positivo (ánodo). Al llegar a los electrodos, los iones pueden ganar (reducción) o perder electrones (oxidación) y transformarse en átomos neutros o moléculas; la naturaleza de las reacciones del electrodo depende de la diferencia de potencial o voltaje aplicado.

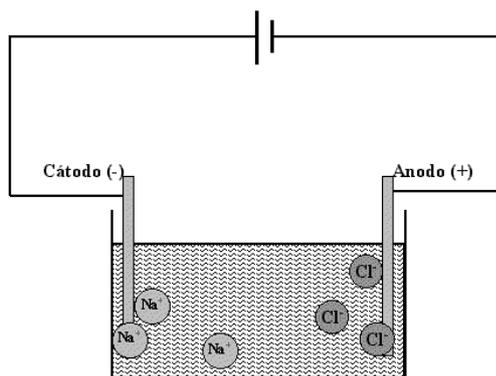
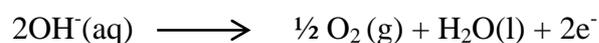


Figura 7: Electrolisis de cloruro sódico.

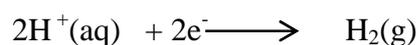
En todos los casos, la cantidad de material que se deposita en cada electrodo al pasar la corriente por un electrolito sigue la ley enunciada por el químico físico británico Michael Faraday. Esta ley afirma que la masa de la sustancia depositada en cada electrodo es proporcional a la intensidad de la corriente que atraviesa el electrolito, y que las masas de distintas sustancias depositadas por la misma cantidad de electricidad son directamente proporcionales al peso equivalente de los elementos, es decir, a sus masas atómicas divididas por sus valencias.

La electrolisis del agua se entiende como la separación de los elementos que la componen formándose hidrógeno ( $H_2$ ) y oxígeno ( $O_2$ ) en estado gaseoso, según la siguiente reacción:

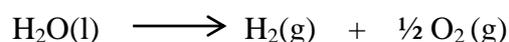
La semi-reacción en el ánodo es la siguiente:



en el cátodo:



La reacción total es:



El agua pura no puede ser electrolizada mediante métodos convencionales debido a su baja concentración en iones y como consecuencia baja conductividad. En los últimos años se han desarrollado dispositivos que facilitan este proceso (Figura 8). En estas el cátodo y el ánodo están separados por medio de una membrana de forma que el hidrógeno y el oxígeno se generan en compartimentos diferentes. En el ánodo los iones hidroxilo ( $2\text{OH}^-$ ) son oxidados generando oxígeno. En el cátodo los protones ( $2\text{H}^+$ ) son reducidos a  $\text{H}_2$ . El balance de cargas se consigue mediante el paso de protones desde la zona anódica a la zona catódica atravesando para ello la membrana.

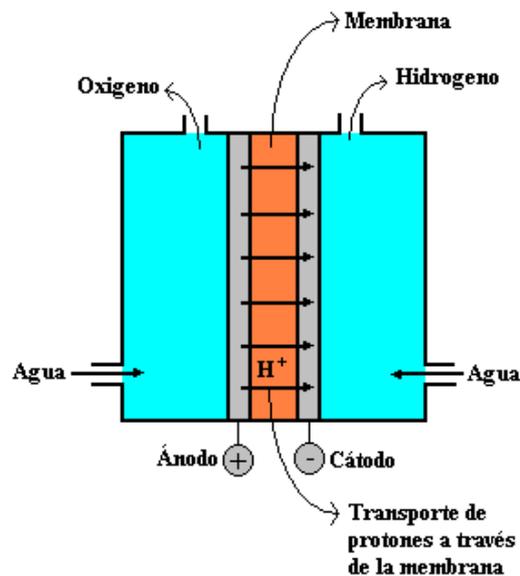


Figura 8: Esquema de un electrolizador de agua.

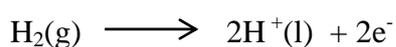
El ánodo está compuesto de una estructura de carbón muy porosa recubierta con platino finamente dividido. En el cátodo la estructura de carbón porosa se recubre de óxidos de iridio y rutenio que actúan como catalizadores. La membrana utilizada puede ser o bien una membrana cerámica impregnada con una disolución acuosa de hidróxido potásico al 25 % o las llamadas membranas intercambiadoras de protones (PEM). Estas últimas son básicamente membranas poliméricas sólidas conductoras de protones.

### 1.3. Pilas de combustible

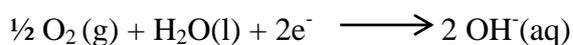
Las pilas de combustible son sistemas electroquímicos en los que la energía de una reacción química se convierte directamente en electricidad. Su principio de funcionamiento es inverso al de la electrólisis. Por ejemplo, en la electrólisis del agua, se separa este compuesto en sus dos componentes, hidrógeno y oxígeno, mientras que en una pila de combustible se obtendría una corriente eléctrica por medio de la reacción entre estos dos gases.

Una pila de combustible (Figura 9) está constituida por un ánodo y un cátodo, separados por un electrolito que facilita la transferencia iónica entre los electrodos. En el ánodo se alimenta el combustible —comúnmente hidrógeno, amoníaco o hidrazina— y en el cátodo se introduce un oxidante —normalmente aire u oxígeno. En la Figura 9 se representa una pila de combustión donde el hidrógeno, es alimentado de forma continua al ánodo y el oxígeno al cátodo, generándose energía eléctrica por oxidación electroquímica del hidrógeno, y la reducción electroquímica del oxígeno. Las dos semireacciones que se dan en el ánodo y el cátodo son las siguientes:

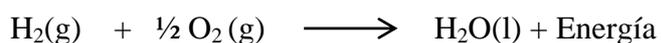
en el ánodo:



en el cátodo:



La reacción total es:



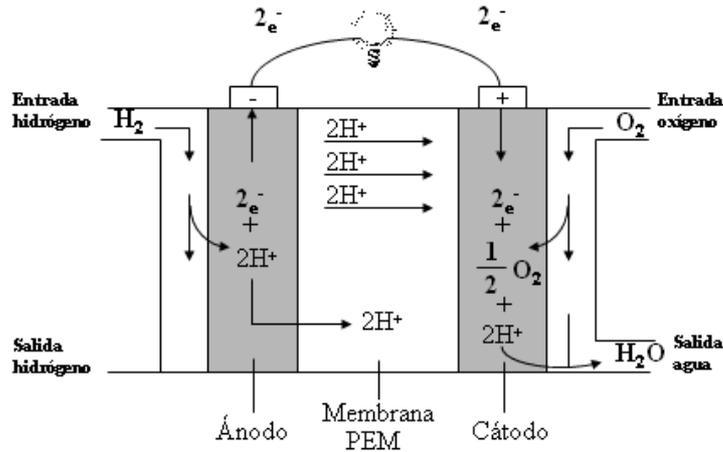


Figura 9: Esquema de una pila de combustible.

Los electrodos están compuestos de una estructura de carbón muy porosa recubierta con platino finamente dividido que actúa como catalizador. La membrana utilizada puede ser o bien un electrolito o las llamadas membranas intercambiadoras de protones (PEM) que son las que se están utilizando actualmente en aplicaciones industriales. Mediante este dispositivo se genera una corriente eléctrica entre ambos electrodos que, a diferencia de lo que ocurre en una pila o batería convencional, no se agota con el tiempo de funcionamiento, sino que se prolonga mientras continúe el suministro de los reactivos.

El rendimiento de la reacción viene determinado por la ecuación de Nernst:

$$E = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln [P[\text{H}_2]P[\text{O}_2]^{0.5}]$$

donde  $E_0$  (1.229 V) es el potencial estándar,  $R$  la constante de los gases (8.31 J/Kmol),  $T$  la temperatura absoluta (K) y  $F$  la constante de Faraday (96.480 J/Vmol). El rendimiento real de la pila puede calcularse considerando las siguientes pérdidas:

- polarización por concentración
- polarización por activación
- polarización óhmica

Este nuevo concepto ofrece ventajas sustanciales sobre la tecnología clásica de combustión, no solamente por el aumento de la eficiencia hasta niveles de 30-40% sino también porque la única emisión producida es agua. De forma global, los automóviles que utilizan H<sub>2</sub> como combustible son 22% más eficientes que los movidos por gasolina. El problema actual reside en la duración de las pilas y en los costes. Aunque las pilas de combustible se conocen desde hace más de 150 años, sólo en las últimas dos décadas han sido reconocidas como una de las tecnologías más prometedoras de producción de energía. No obstante, aún se está investigando en la resolución de aspectos técnicos que afectan a la corrosión y fiabilidad de algunos de los componentes.

Las pilas de combustible se caracterizan por sus reducidas emisiones. Si sólo se utiliza hidrógeno (derivado de fuentes renovables) como combustible, se obtendrá vapor de agua y electricidad. La utilización de hidrocarburos para la producción de hidrógeno eliminaría prácticamente las emisiones de óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono. Considerando que sus eficacias son potencialmente superiores a las de los motores de combustión interna, las emisiones de dióxido de carbono se verían además reducidas.

Estos dispositivos pueden ofrecer la respuesta a diversos requerimientos energéticos, su eficacia no depende del tamaño como sucede en otros sistemas energéticos. Este hecho permite su aplicación en sistemas de energía miniaturizados y portátiles. Además, las celdas de combustible suponen actualmente una esperanza real dentro del mercado del transporte.

## **2. Práctica: Determinación de la eficiencia de un sistema electrolizador-pila de combustión**

### **2.1. Objetivo**

En la presente práctica se determinará la potencia suministrada por un sistema electrolizador-pila de combustión relacionándose con aquella suministrada a este sistema por una célula fotovoltaica.

### **2.2. Dispositivo experimental**

El dispositivo experimental consta de:

- Célula Solar
- Electrolizador
- Pila de combustión
- Cuadro de medidas compuesto de voltímetro, amperímetro, resistencia, lámpara y motor
- Cables de conexión
- 4 tubos de goma
- Lámpara de 100-150 Watt.

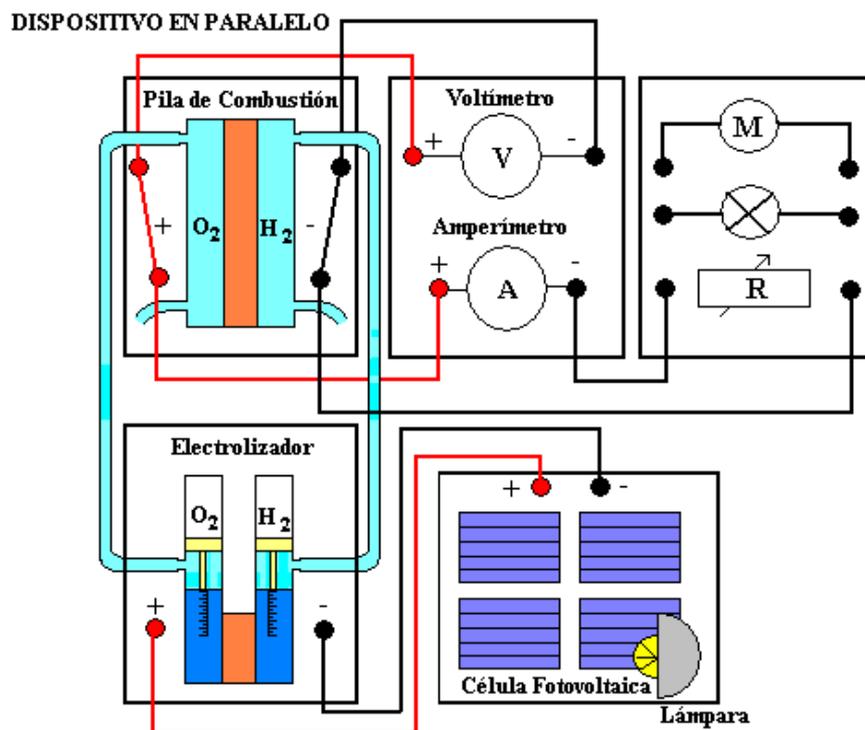


Figura 10: Conexiones eléctricas y de gases del sistema compuesto por célula fotovoltaica, electrolizador y pilas de combustión conectadas en paralelo.

### Instrucciones de seguridad

- Mantener cualquier fuente de ignición alejada del sistema experimental cuando éste se encuentre en funcionamiento.
- No tocar la superficie de la célula solar después de una exposición prolongada a la lámpara, ésta aumenta de forma importante su temperatura.

### 2.3. Procedimiento experimental

1. Montar el sistema tal y como aparece en la Figura 10, asegurándose de que todas las conexiones están conectadas según la polaridad correcta.
2. Comprobar que todos los tubos de gases entre el electrolizador y la pila de combustión se encuentran correctamente conectados. Ajustar el interruptor rotatorio a la posición OPEN.
3. Asegurarse de que los cilindros de almacenamiento de gases del electrolizador están llenos con agua destilada hasta la marca de 0 mL. Ajustar el módulo solar de forma que se establezca una corriente constante al electrolizador de 200 a 300 mA. La célula solar y la fuente de luz deberán ser posicionados de forma que se aprecie una producción de gas constante en el electrolizador.
4. Purgar el sistema consistente en el electrolizador, la pila de combustión y los tubos durante 5 minutos con los gases que se desprenden del electrolizador. Mover el interruptor rotatorio a la posición de  $3 \Omega$  durante tres minutos. El amperímetro debería entonces medir una corriente cercana a los 400 mA y el voltímetro un voltaje de aproximadamente 0.75 Volts. Purgar de nuevo el sistema durante 3 minutos llevando el interruptor a la posición OPEN.
5. Variar la resistencia con el interruptor rotatorio. Comenzar en la posición OPEN, disminuyendo la resistencia poco a poco girando el interruptor rotatorio hacia la derecha. Para cada resistencia esperar 30 segundos y anotar en la tabla de resultados los valores de voltaje y corriente generados. Las últimas medidas serán realizadas en la posición "LAMP" y "MOTOR".
6. Medir también la corriente y el voltaje suministrados desde la placa solar al electrolizador.

## 2.4. Cuestiones

1. Con los datos recogidos en la Tabla 1 dibuje el diagrama Potencia /Intensidad (PI). Recuerde que Potencia (W) = voltaje (V) • intensidad (A) para cada una de las resistencias utilizadas. Calcule la potencia consumida por el motor y la lámpara e introduzca los valores encontrados en el diagrama PI.
2. Calcule la eficiencia del sistema célula de combustión-electrolizador para las diferentes resistencias estudiadas. Represente la eficiencia encontrada frente a la intensidad suministrada y encuentre el máximo de eficiencia.

Tabla 1: Datos experimentales y cálculo de la Potencia

RESISTENCIA ( $\Omega$ )	VOLTAJE (V)	INTENSIDAD (mA)	POTENCIA (mW)

## 3. Referencias

- [1] <http://www.ventusciencia.com/pilascombustiblehidrogeno.htm> [Consulta: 5 septiembre 2008 ]