

# Curvas características de celda y electrolizador PEM



Física

Electricidad y Magnetismo

La corriente eléctrica y su efecto

ciencia aplicada

Ingeniería

Energías renovables

Tecnología de hidrógeno



Nivel de dificultad

difícil



Tamaño del grupo

-



Tiempo de preparación

-



Tiempo de ejecución

-

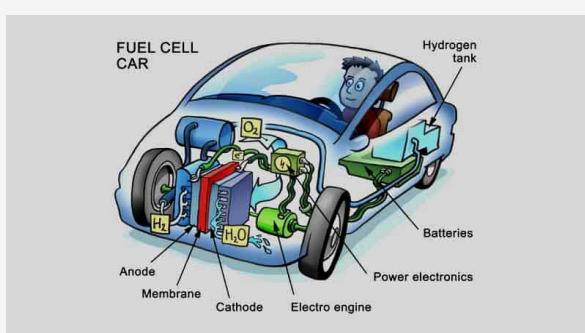
This content can also be found online at:

<http://localhost:1337/c/6066478af1639a0003d1ab33>



## Información para el profesor

### Aplicación



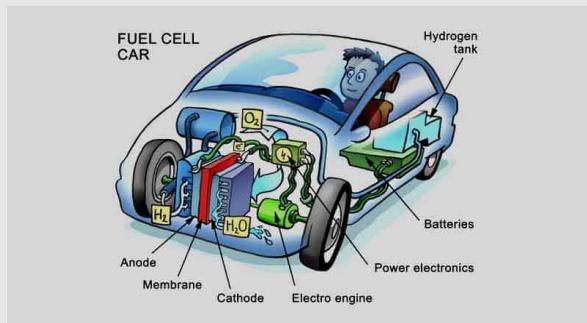
El hidrógeno producido a partir de la electrólisis de membrana de polímero (PEM) puede utilizarse para muchas aplicaciones, como:

- Abastecimiento de combustible para vehículos
- Refrigeración de alternadores en centrales eléctricas
- Generación de energía

Vehículo de combustible a pila

## Aplicación

PHYWE



Vehículo de combustible a pila

El hidrógeno producido a partir de la electrólisis de membrana de polímero (PEM) puede utilizarse para muchas aplicaciones, como:

- Abastecimiento de combustible para vehículos
- Refrigeración de alternadores en centrales eléctricas
- Generación de energía

## Información adicional para el profesor (1/2)

PHYWE



### Conocimiento previo



### Principio

En principio, un proceso de electrólisis consta de un electrolito, electrodos y una fuente de energía externa. La electrólisis consiste en el paso de una corriente eléctrica directa a través de un electrolito que produce reacciones químicas en los electrodos y la descomposición de los materiales.

En un electrolizador PEM, el electrolito consiste en una membrana conductora de protones y agua (PEM = membrana de intercambio de protones). Cuando se aplica una tensión eléctrica, se forman hidrógeno y oxígeno. La pila de combustible PEM genera energía eléctrica a partir del hidrógeno y el oxígeno. Las propiedades eléctricas del electrolizador y de la pila de combustible se investigan registrando una línea característica corriente-voltaje. La eficiencia se determina midiendo las cantidades de los gases generados o consumidos.

## Información adicional para el profesor (2/2)

PHYWE



### Objetivo

Comprender las características y la eficiencia de la PEM - electrólisis.



### Tareas

1. Registrar la línea característica del electrolizador PEM.
2. Registrar la línea característica de la pila de combustible PEM.
3. Determinar la eficiencia de la unidad de electrólisis PEM.
4. Determinar la eficiencia de la pila de combustible PEM.

## Instrucciones de seguridad

PHYWE



Para este experimento se aplican las instrucciones generales para la experimentación segura en las clases de ciencias.

Para las fases de H y P, consulte la ficha de datos de seguridad del producto químico correspondiente.

Evitar que el hidrógeno se escape. Consumir completamente el hidrógeno al final de los experimentos y antes de desmontarlo.

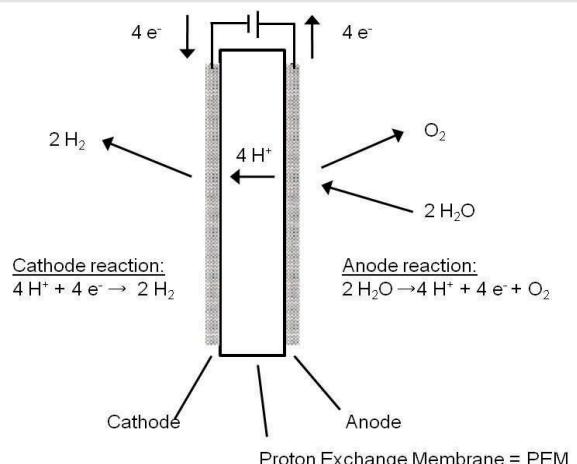
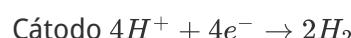
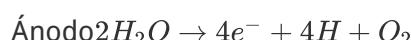
Compruebe que los tubos y las conexiones no estén dañados antes de cada puesta en marcha.

## Principio (1/11)

PHYWE

La parte principal de la unidad de electrólisis PEM y de la pila de combustible PEM es una unidad de membrana-electrodo. Se ha aplicado una capa de material catalizador a ambos lados de la fina membrana conductora de protones (PEM = membrana de intercambio de protones). Estas dos capas forman el ánodo y el cátodo de la pila electroquímica.

En el electrolizador se produce la siguiente reacción:



Principio de funcionamiento de un electrolizador PEM.

## Principio (2/11)

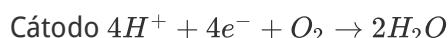
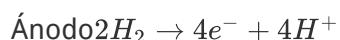
PHYWE

En el lado del ánodo el oxígeno gaseoso, los electrones y  $H^+$  se forman iones cuando se aplica una tensión externa. El  $H^+$  Los iones pasan a través de la membrana de conducción de protones hasta el cátodo y forman allí hidrógeno gaseoso con los electrones que fluyen por el circuito conductor externo. La pila de combustible funciona por el principio inverso.

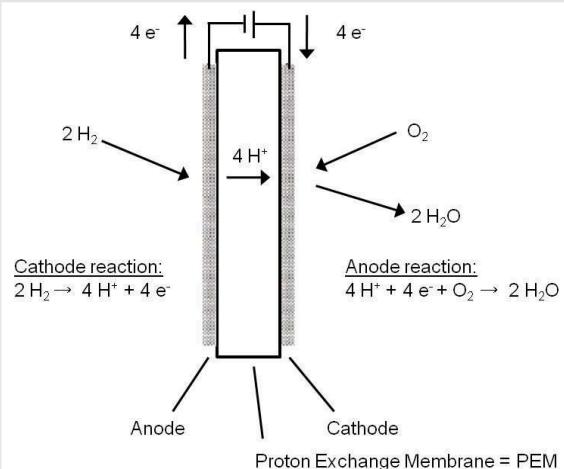
En la electrólisis la energía eléctrica se transforma en energía química y se almacena en forma de hidrógeno y oxígeno; en la pila de combustible la energía química en forma de hidrógeno y oxígeno se convierte directamente, es decir, sin proceso de combustión, en energía eléctrica. El hidrógeno y el oxígeno reaccionan para formar agua, cediendo electricidad y calor.

## Principio (3/11)

En la pila de combustible se produce la siguiente reacción:



Como el hidrógeno gaseoso que se suministra al ánodo se oxida, se descompone debido a la acción catalítica del electrodo (por ejemplo, el platino) en protones y electrones.



Principio de funcionamiento de una pila de combustible PEM

## Principio (4/11)

El  $H^+$  Los iones pasan a través de la membrana conductora de protones hacia el lado del cátodo. Los electrones pasan a través del circuito eléctrico exterior cerrado hasta el cátodo y realizan así un trabajo eléctrico. El oxígeno gaseoso que se suministra al cátodo se reduce. En el proceso, además de los protones y los electrones se forma agua.

Si en un electrolizador o en una pila de combustible hay un electrodo de hidrógeno y otro de oxígeno, existe una diferencia de potencial  $\Delta D$  entre los dos electrodos. Depende de la temperatura; su valor teórico puede calcularse a partir de la entalpía libre de reacción  $\Delta G_f$  es igual a

$$\Delta E = 1.23V \text{ a los } 25 \text{ años } ^\circ C.$$

En la electrólisis, la tensión aplicada debe ser al menos tan grande como esta tensión teórica de la célula para que pueda circular una corriente. En la pila de combustible, la tensión terminal máxima puede ser tan grande como este valor teórico. Tanto en el electrolizador como en la pila de combustible se producen potenciales adicionales en los electrodos.

## Principio (5/11)

PHYWE

En el equilibrio electroquímico, los potenciales de frontera de fase entre el electrodo y la membrana también se producen en los electrodos. En el proceso, hay un intercambio continuo de cargas entre ambos, pero la reacción bruta es igual a cero.

Si, además, fluye una corriente por el electrolizador o la pila de combustible, se altera el equilibrio electroquímico en los electrodos. El potencial de los electrodos adquiere otro valor, que depende de la densidad de corriente, debido a diversas reacciones en el electrodo. Esta desviación del valor de equilibrio se denomina "polarización eléctrica", es decir, el electrodo se polariza.

Las líneas características del electrolizador y de la pila de combustible presentan, por tanto, un curso casi lineal sólo en los valores más altos de la corriente; en esta región el movimiento de los iones a través de la membrana es decisivo. La cantidad de sustancia  $n$  liberada en un electrodo puede calcularse mediante la ley de Faraday.

## Principio (6/11)

PHYWE

$$n = \frac{I \cdot t}{zF} \quad (1)$$

donde  $I$ = actual,  $t$ = tiempo,  $z$ = número de electrones necesarios para liberar una molécula,  $F$ = la constante de Faraday,  $F = 96\,485 \text{ As/mol}$ .

En este experimento se desprenden gases. El volumen de una cantidad de sustancia  $n$  puede determinarse mediante la ecuación general de los gases.

$$V = \frac{nRT}{p} \quad (2)$$

donde  $T$ = temperatura absoluta,  $p$ = presión,  $R$ = constante general de los gases  $R = 8,31 \text{ J/(mol K)}$

## Principio (7/11)

Si una corriente  $I$  fluye en un electrolizador, se genera el siguiente volumen de gas por unidad de tiempo según las ecuaciones (1) y (2):

$$\frac{V}{t} = \frac{IRT}{zFp} \quad (3)$$

En la pila de combustible, este volumen de gas por unidad de tiempo es necesario para que la corriente  $I$  pueda fluir. Para determinar la eficiencia del electrolizador y de la pila de combustible, el  $W_{el}$  y la química  $W_{H_2}$  se calculan las energías del hidrógeno generado o requerido.

$$W_{el} = U \cdot I \cdot t \quad (4)$$

$$W_{H_2} = n \cdot H \quad (5)$$

donde  $U$ = tensión,  $I$ = actual,  $t$ = tiempo,  $n$ = cantidad de hidrógeno,  $H$ = contenido calórico molar (entalpía de reacción molar) del hidrógeno.

## Principio (8/11)

Se diferencia entre el menor contenido calórico  $H_{low}$  y el contenido calórico superior  $H_{up}$ . Contenido calórico molar del hidrógeno:

$$H_{low} = 242.0 \text{ kJ/mol}$$

$$H_{up} = 266.1 \text{ kJ/mol}$$

La diferencia entre ambas es la entalpía molar de vaporización (entalpía de condensación)  $q$  de agua.

$$H_{up} = H_{low} + q \quad (6)$$

El rendimiento del electrolizador depende en gran medida de las respectivas condiciones de funcionamiento. Si no se ha utilizado durante mucho tiempo, la intensidad de corriente a 2 V puede ser menor que la indicada en la tabla; después de un largo periodo de funcionamiento, a veces mucho mayor (por ejemplo, superior a 4 A).

## Principio (8/11)

PHYWE

Se diferencia entre el menor contenido calórico  $H_{low}$  y el contenido calórico superior  $H_{up}$ . Contenido calórico molar del hidrógeno:

$$H_{low} = 242.0 \text{ kJ/mol}$$

$$H_{up} = 266.1 \text{ kJ/mol}$$

La diferencia entre ambas es la entalpía molar de vaporización (entalpía de condensación)  $q$  de agua.

$$H_{up} = H_{low} + q(6)$$

El rendimiento del electrolizador depende en gran medida de las respectivas condiciones de funcionamiento. Si no se ha utilizado durante mucho tiempo, la intensidad de corriente a 2 V puede ser menor que la indicada en la tabla; después de un largo periodo de funcionamiento, a veces mucho mayor (por ejemplo, superior a 4 A).

## Principio (9/11)

PHYWE

### Eficiencia del electrolizador PEM

El gas que falta se debe a las pérdidas por difusión dentro de la célula. El rendimiento del electrolizador puede calcularse mediante las ecuaciones (4) y (5)

$$\eta = \frac{W_{H_2}}{W_{el}} = \frac{H_0 n}{UIt} (7)$$

Utilizando la ecuación general de los gases (2), los volúmenes medidos  $V$  de hidrógeno se convierten en cantidades de sustancia  $n$ . Así, se obtiene lo siguiente para la eficiencia:

$$\eta = \frac{H_0 pV}{RTUIt} (8)$$

## Material

Posición	Material	Artículo No.	Cantidad
1	PHYWE Fuente de alimentación universal DC: 0...18 V, 0...5 A / AC: 2/4/6/8/10/12/15 V, 5 A	13504-93	1
2	KIT DESMONT.DE PILA COMBUST.PEM	06746-00	1
3	Electrolizador PEM H2/O2 65	06730-00	1
4	Adaptador de enchufe tipo banana de 4 mm a 2 mm	06712-02	1
5	Multímetro digital, 3 1/2-visualizado de caracteres	07122-00	2
6	CAJA DE CONEXION	06000-00	1
7	RESISTENCIA 10 OHM 2%, 2W, G1	06056-10	2
8	RESISTENCIA 5 OHM 2%, 2W, G1	06055-50	1
9	RESISTENCIA 2 OHM 5%, 2W, G1	06055-20	1
10	RESISTENCIA 1 OHM 2%, 2W, G1	06055-10	2
11	ENCHUFE DE CORTOCIRCUITO, NEGRO	06027-05	2
12	GASOMETRO	40466-00	1
13	Cilindro graduado, plástico, 100 ml	36629-01	1
14	TUBO DE GOMA, DIAM. INT. 5 MM	39280-00	1
15	Manguera de conexión, d int = 6 mm, l = 1 m	39282-00	1
16	PINZA PARA TUBOS, 10 MM	43631-10	4
17	CON.P.TUB.REC.DIAM.INT.3-5/6-10 mm	47517-01	2
18	Botella de lavado, plástica, 500 ml	33931-00	1
19	Vaso de precipitación, plástico, forma baja, 250ml	36013-01	1
20	CRONOMETRO DIGITAL, 24 h, 1/100 s y 1 s	24025-00	1
21	Cable de conexión, 32 A, 500 mm, rojo	07361-01	3
22	Cable de conexión, 32 A, 500 mm, azul	07361-04	2
23	Cable de conexión, 32 A, 250 mm, azul	07360-04	2
24	AGUA DESTILADA, 5000ML	31246-81	1
25	Monitor electrónico climático con pantalla LCD	87997-10	1

## Principio (11/11)

PHYWE

### Eficiencia de la pila de combustible PEM

El gas que falta se debe a las pérdidas por difusión dentro de la pila. El rendimiento de la pila de combustible puede calcularse mediante las ecuaciones (4) y (5)

$$\eta = \frac{W_{el}}{W_{H_2}} = \frac{UIt}{Hn} \quad (9)$$

Debido a la reacción que se produce en la pila de combustible, el contenido calórico superior  $H_{up}$  debe utilizarse para calcular la eficiencia. En la industria, sin embargo, es normal calcular con el contenido calórico más bajo  $H_{low}$  porque el calor de condensación sólo genera calor y no energía eléctrica. Utilizando la ecuación general de los gases (2), los volúmenes medidos  $V$  de hidrógeno se convierten en cantidades de sustancia  $n$ . Así, se obtiene lo siguiente para la eficiencia:

$$\eta = \frac{RTUIT}{H_{up}pV} \quad (10)$$

## Material

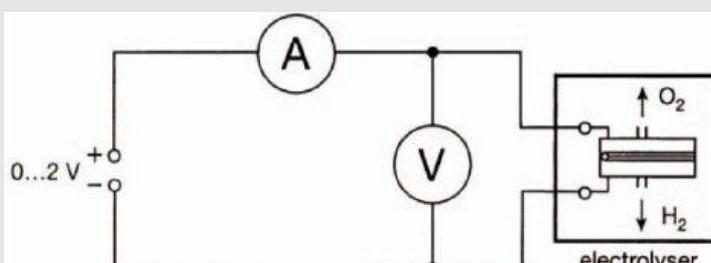
PHYWE

Posición	Material	Artículo No.	Cantidad
1	<a href="#">PHYWE Fuente de alimentación universal DC: 0...18 V, 0...5 A / AC: 2/4/6/8/10/12/15 V, 5 A</a>	13504-93	1
2	<a href="#">KIT DESMONT.DE PILA COMBUST.PEM</a>	06746-00	1
3	<a href="#">Electrolizador PEM H2/O2 65</a>	06730-00	1
4	<a href="#">Adaptador de enchufe tipo banana de 4 mm a 2 mm</a>	06712-02	1
5	<a href="#">Multímetro digital, 3 1/2-visualizado de caracteres</a>	07122-00	2
6	<a href="#">CAJA DE CONEXION</a>	06000-00	1
7	<a href="#">RESISTENCIA 10 OHM 2%, 2W, G1</a>	06056-10	2
8	<a href="#">RESISTENCIA 5 OHM 2%, 2W, G1</a>	06055-50	1
9	<a href="#">RESISTENCIA 2 OHM 5%, 2W, G1</a>	06055-20	1
10	<a href="#">RESISTENCIA 1 OHM 2%, 2W, G1</a>	06055-10	2
11	<a href="#">ENCHUFE DE CORTOCIRCUITO, NEGRO</a>	06027-05	2
12	<a href="#">GASOMETRO</a>	40466-00	1

**PHYWE**

# Montaje y ejecución

## Montaje (1/9)

**PHYWE**

Esquema del circuito: Características y rendimiento del electrolizador.

### 1. Línea característica del electrolizador PEM

- Llenar los dos depósitos de agua hasta un nivel comprendido entre las líneas de marca máxima y mínima.

## Montaje (2/9)

PHYWE

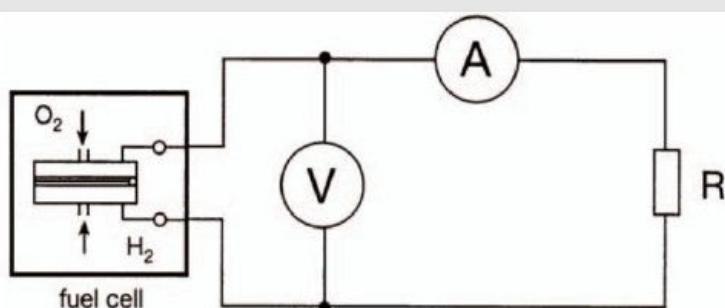


Montaje experimental

- Conectar el electrolizador al puerto de corriente continua (DC) de la fuente de alimentación de acuerdo con el montaje experimental y el diagrama del circuito.

## Montaje (3/9)

PHYWE



Esquema del circuito

### 2. Línea característica de la pila de combustible PEM

Para registrar la línea característica, el método más sencillo de suministrar gas a la pila de combustible es conectarla directamente con el electrolizador. Sin embargo, también es posible tomar el gas de la barra de gas, como se describe en la sección de medición de la eficiencia.

**Preparación del electrolizador:** Conectar trozos de tubo de goma fino, de unos 40 cm de longitud ( $d_i = 4$  mm) a las conexiones de salida superiores del contenedor de almacenamiento en el electrolizador.

## Montaje (4/9)

PHYWE



Montaje experimental

Llenar ambos depósitos de agua hasta la línea de "Prueba de gas" con agua destilada. Mientras se hace, sostenga el tubo para que también se llene de agua.

Colocar los tapones de goma en los recipientes de almacenamiento de manera que no se formen burbujas de aire debajo de ellos y apriétalos bien. Introducir los trozos de tubo de goma llenos de agua en un vaso de precipitados lleno de agua destilada. Conectar el electrolizador a la fuente de alimentación y ajustar una corriente de máx. 2 A o una tensión de funcionamiento de 2 V como máximo.

## Montaje (5/9)

PHYWE

Cuando el hidrógeno y el oxígeno salgan de los trozos de tubo de goma al vaso de precipitados, presionar brevemente los extremos de los tubos; sácarlos del agua y conectarlos a las conexiones de entrada superiores de la pila de combustible.

Las gotas de agua que tal vez aún estén presentes en los tubos pueden interrumpir el suministro de gas a la pila de combustible. Si esto ocurre, el voltaje de salida caerá. Levantar brevemente los trozos de tubo para que el agua salga.

Los datos eléctricos de la pila de combustible dependen del caudal de gas y de la humedad de la membrana. Para crear una condición estable en la pila de combustible, debe dejarse que funcione durante aproximadamente 5 minutos en condiciones de vacío y, a continuación, hacerla funcionar durante aproximadamente 5 minutos con una resistencia de carga fija de, por ejemplo,  $2 \Omega$ .

## Montaje (6/9)

PHYWE



Montaje experimental

### 3. Eficiencia del electrolizador PEM

Preparación de la barra de gas con 2 gasómetros: Un gasómetro consiste en un matraz Erlenmeyer con un embudo cilíndrico y un tubo de vidrio doblado montado en él.

Conectar los adaptadores reductores con un trozo corto de tubo de goma ( $d_i = 6 \text{ mm}$ ) a cada uno de los tubos de vidrio del gasómetro.

## Montaje (7/9)

PHYWE

Llenar cada uno de los gasómetros a través de su embudo cilíndrico con agua destilada hasta que el matraz Erlenmeyer y el tubo de vidrio en ángulo recto estén llenos y no contengan apenas burbujas. A continuación, el agua sobrante sale por el tubo de vidrio y se recoge en un vaso de precipitados. Las alturas de llenado de los embudos cilíndricos están calibradas. Es aconsejable comprobar la exactitud de estas marcas llenando todo el embudo con agua destilada y dejándola fluir en un aparato de medición volumétrica.

Conectar un trozo de tubo de goma fino de unos 40 cm de longitud ( $d_i = 4 \text{ mm}$ ) a la conexión de salida superior del recipiente de almacenamiento del electrolizador.

Llenar ambos depósitos de agua hasta la línea de "Prueba de gas" con agua destilada. Mientras se hace, sostener el tubo para que también se llene de agua.

Sellar los trozos de tubo de goma llenos de agua con una abrazadera de manguera a unos 2 cm de sus extremos y fijarlos a los gasómetros.

## Montaje (8/9)

PHYWE

Colocar los tapones de goma en los recipientes de almacenamiento de manera que no se formen burbujas de aire debajo de ellos y luego apretarlos bien para que no pueda salir el gas.

Abrir las abrazaderas de la manguera.

Conectar el electrolizador a la fuente de alimentación según el punto 1. y ajustar una corriente de aproximadamente 1 A con el botón de ajuste de corriente.

## Montaje (9/9)

PHYWE



Montaje experimental

### 4. Eficiencia de la pila de combustible PEM

Para determinar el rendimiento de la pila de combustible, los dos gasómetros de la barra de gas deben estar lo más llenos posible. Para ello, conectar los dos gasómetros con el electrolizador (abrazaderas de manguera abiertas).

Hacer funcionar el electrolizador con la máxima tensión (2 V) o la máxima corriente (2 A).

## Ejecución (1/5)

PHYWE

### 1. Línea característica del electrolizador PEM

Es aconsejable comenzar con la tensión más alta  $U = 2 \text{ V}$ . En el proceso, la corriente puede superar el valor de la corriente continua máxima de  $I = 2 \text{ A}$  durante un breve tiempo. Después de aproximadamente 1 minuto, los valores de la tensión y la corriente se estabilizan.

Disminuir progresivamente la corriente de la fuente de alimentación utilizando el mando de ajuste de la corriente. En el proceso, la fuente de alimentación ajustar la tensión electrónicamente para que la corriente tenga el valor establecido. Este procedimiento tiene la ventaja de que se alcanzan más rápidamente valores estables de tensión y corriente en el electrolizador.

Cuando el mando de ajuste de la corriente ha alcanzado su mínimo, se pueden seleccionar valores aún más pequeños con la ayuda del mando de ajuste de la tensión. Antes de registrar un valor medido, esperar aproximadamente 1 min. hasta que los valores de corriente y tensión vuelvan a ser estables.

## Ejecución (2/5)

PHYWE

### 2. Línea característica de la pila de combustible PEM

Conectar resistencias de carga de diferentes tamaños a la pila de combustible según el diagrama del circuito. En cada caso medir la tensión  $U$  y el actual  $I$ . En primer lugar, mida la tensión en vacío y, a continuación, comonizar la serie de medición con los valores de resistencia más grandes.

Dado que la resistencia interna del amperímetro no se puede despreciar con respecto a la resistencia de carga, utilice siempre el rango de medición de 10 A. Para valores de resistencia inferiores a  $1 \Omega$  los valores de corriente y tensión pueden no ser siempre estables cuando se suministra una cantidad insuficiente de gas.

Antes de realizar una medición, el circuito eléctrico debe estar abierto durante aproximadamente 30 s, para asegurar un buen suministro de gas. Evite cortocircuitar la pila de combustible (máximo 10 s)!

## Ejecución (3/5)

PHYWE

### 3. Eficiencia del electrolizador PEM

El electrolizador genera hidrógeno y oxígeno en una proporción de 2:1. El volumen  $V_{H_2}$  del hidrógeno generado se mide en función del tiempo  $t$ . Iniciar la medición del tiempo cuando el agua en el embudo cilíndrico ( $H_2$ ) pasa la marca inferior. Medir la tensión  $U$  y el actual  $I$  durante la electrólisis.

Medir la temperatura ambiente  $R$  y la presión ambiental  $p_{amb}$ .

Para concluir el experimento, apagar el electrolizador y cerrar los tubos de los gasómetros con las pinzas.

Se facilita la repetición de este experimento con otra corriente (por ejemplo, 2 A) cuando, por ejemplo, haya que volver a llenar los gasómetros para los experimentos con la pila de combustible.

## Ejecución (4/5)

PHYWE

### 4. Eficiencia de la pila de combustible PEM

Si la producción de gas supera la capacidad de volumen máxima del gasómetro (aproximadamente 250 ml), el exceso de gas se escapa a través del embudo a la atmósfera.

Como consecuencia, no sólo el  $H_2$  sino también la  $O_2$ . El gasómetro puede llenarse completamente con el electrolizador.

Después de llenar el gasómetro, apagar el electrolizador y sujetar firmemente el tubo detrás del electrolizador.

- Ambos gasómetros deben contener aproximadamente 250 ml de gas.
- Realizar el montaje experimental y el circuito en 2)

## Ejecución (5/5)

PHYWE

- Sellar bien las conexiones de salida inferiores con trozos cortos de tubo de goma ( $d_i = 4 \text{ mm}$ ) y abrazaderas de manguera.
- Conectar cada una de las dos conexiones de entrada superiores de la pila de combustible a un gasómetro.
- Aflojar las abrazaderas de las mangüeras de conexión entre el gasómetro y la célda de combustible.
- Conectar una resistencia de carga de  $1 \Omega$  a la pila de combustible de acuerdo con el circuito de 2)

## Resultados (1/10)

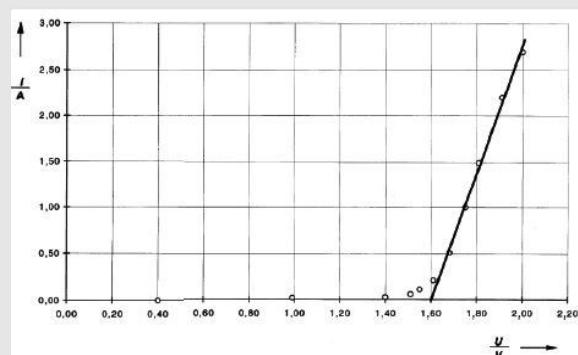
PHYWE

### 1) Característica corriente-voltaje del electrolizador PEM

Los valores medidos se muestran en la figura.

A partir del segmento lineal de la línea característica, la tensión de descomposición  $U_z$  se determina como la intersección de la línea recta extendida con el  $U$  eje:

$$U_z = 1.60V$$



Línea característica corriente-voltaje de un electrolizador PEM

## Resultados (2/10)

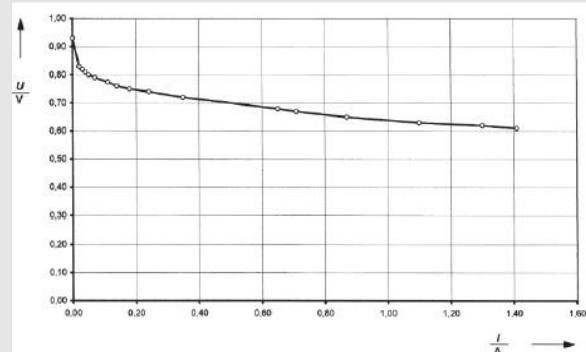
PHYWE

### 2) Línea característica de la pila de combustible PEM

El rendimiento de la pila de combustible es una función de las presiones de gas, el caudal de gas, la humedad de la membrana y la temperatura.

La tensión en vacío es  $U_0 = 0.93 \text{ V}$ .

Para valores mayores de corriente, la línea característica presenta un curso casi lineal. Si la línea característica se desvía de un curso lineal en esta región, es posible que los suministros de hidrógeno y oxígeno a la pila de combustible sean inadecuados.



Línea característica corriente-voltaje de una pila de combustible PEM

## Resultados (3/10)

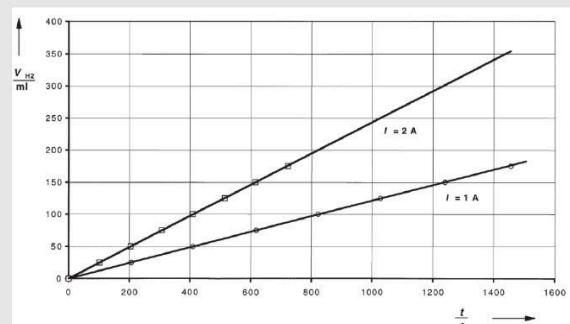
PHYWE

### 3) Eficiencia del electrolizador PEM

A partir de la pendiente de las rectas ( $I = 1 \text{ A}$  y  $I = 2 \text{ A}$ ), los volúmenes generados por unidad de tiempo  $V_{H_2}/t$  (medido) pueden leerse. Se comparan con los valores teóricos según la ecuación (3) y a partir de ahí se calcula el rendimiento del gas, es decir, la llamada eficiencia de la corriente.

Otras condiciones:

$$U = 1.71 \text{ V}; p_{amb} = 984 \text{ hPa}; T_R = 21^\circ\text{C}$$



Volumen del hidrógeno generado por el electrolizador PEM en función del tiempo a diferentes corrientes  $I$

## Resultados (4/10)

PHYWE

La presión generada por la columna de agua en el gasómetro debe añadirse a la presión ambiental medida  $p_{amb}$ . Esta tiene un valor medio de aproximadamente 20 hPa. Por otro lado, el hidrógeno producido está saturado de vapor, cuya presión parcial es de 23 hPa. Como estos dos efectos se compensan mutuamente, no hay que realizar ninguna corrección de la presión.

Otras condiciones:

$$p_{amb} = 984 \text{ hPa} ; T_R = 294K$$

Experimental Condiciones	$V_{H2} / t$ \N - Medida	$V_{H2} / t$ teórico	Rendimiento del gas
$I = 1.02 \text{ A}$ $U = 1.71 \text{ V}$	0,121 ml/s	0,131 ml/s	92%
$I = 2.02 \text{ A}$ $U = 1.71 \text{ V}$	0,243 ml/s	0,243 ml/s	94%

## Resultados (5/10)

PHYWE

El rendimiento del electrolizador es algo mayor con 1,71 V / 1,02 A que con 1,83 V / 2,01 A. El rendimiento del gas es el mismo en ambos casos.

Otras condiciones:

$$p_{amb} = 984 \text{ hPa} ; T_R = 294K$$

### Condiciones experimentales Eficiencia

$I = 1.02 \text{ A}$	82%
$U = 1.71 \text{ V}$	
$I = 2.02 \text{ A}$	78%
$U = 1.71 \text{ V}$	

## Resultados (6/10)

PHYWE

### 4. Eficiencia de la pila de combustible PEM

Resultados de la muestra con resistencia de carga  $1\Omega$

$$p = p_{amb} = 984 \text{ hPa}; T = 22^\circ C$$

Valores medios:

$$t = 287 \text{ s}$$

$$U = 0.66 \text{ V};$$

$$I = 0.65 \text{ V}$$

### Mark $V_{h_2} / \text{mlt/min} : sU/V I/A$

225	25	0:00	0.68	0.67
200		4:42	0.66	0.65
175	25	0:00	0.67	0.66
150		4:47	0.66	0.64
125	25	0:00	0.67	0.65
100		4:57	0.65	0.64

## Resultados (7/10)

PHYWE

Resultados de la muestra con resistencia de carga  $1\Omega$

$$p = p_{amb} = 984 \text{ hPa}; T = 23^\circ C$$

Valores medios:

$$t = 540 \text{ s};$$

$$U = 0.75 \text{ V};$$

$$I = 0.35 \text{ V}$$

### Mark $V_{h_2} / \text{mlt/min} : sU/V I/A$

225	25	0:00	0.75	0.35
200		9:05	0.75	0.35
175	25	0:00	0.75	0.35
150		9:07	0.73	0.34
125	25	0:00	0.75	0.35
100		8:57	0.75	0.35

## Resultados (8/10)

PHYWE

El volumen de gas requerido teóricamente, determinado según la ecuación (3), se compara con el medido, y a partir de él se calcula el aprovechamiento del gas.

Experimental Condiciones	$V_{H_2} / t$ \N - Medida	$V_{H_2} / t$ teórico	Rendimiento del gas
$I = 1.02A$			
$U = 1.71V$ $p_{amb} = 998 \text{ hPa}$ $T_R = 295K$	0,0871 ml/s	0,0832 ml/s	96%
$I = 2.02A$			
$U = 1.71V$ $p_{amb} = 998 \text{ hPa}$	0,0463 ml/s	0,0447 ml/s	97%

## Resultados (9/10)

PHYWE

El rendimiento del electrolizador es algo mayor a 0,75 V / 0,35 A que a 0,66 V / 0,65 A. El rendimiento del gas es el mismo en ambos casos.

Condiciones experimentales	Eficiencia (utilizando $H_{up}$ )	Eficiencia (utilizando $H_{low}$ )
$I = 1.02A$		
$U = 1.71V$ $p_{amb} = 998 \text{ hPa}$ $T_R = 295K$	82%	49%
$I = 2.01A$		
$U = 1.83V$ $p_{amb} = 998 \text{ hPa}$ $T_R = 296K$	78%	57%