

Electrólisis de agua (producción de hidrógeno molecular)

Introducción.

En química, la electrólisis es un proceso que emplea energía eléctrica mediante el uso de una intensidad de corriente eléctrica, para lograr la separación de los elementos que conforman un compuesto mediante la ruptura de los enlaces existentes. Este proceso químico se realiza en un dispositivo denominado celda electrolítica, el cual requiere de la aplicación de un potencial eléctrico externo.

En el año de 1834, Michael Faraday publicó sus investigaciones en el área de la electroquímica formulando dos leyes que actualmente se conocen como las leyes de Faraday para la electrólisis, las cuales son utilizadas en muchos campos de la ciencia.

La primera ley de Faraday menciona que la masa del producto que se deposita o genera en un electrodo es directamente proporcional con la cantidad de corriente eléctrica que se suministra a la celda electrolítica.

La segunda ley de Faraday enuncia que, para la misma intensidad de corriente eléctrica, la cantidad de material que se deposita o genera en un electrodo es directamente proporcional a la masa molar del sistema producido entre el número de electrones involucrados en el proceso de oxidación o reducción.

De las dos leyes anteriores, se puede generar la ecuación que representa al proceso electrolítico:

$$m = \frac{QM}{zF}$$

En donde m representa a la masa del producto, en gramos; Q es la cantidad de carga eléctrica entregada por el electrodo, en coulomb; M es la masa molar de la sustancia generada en el electrodo, en gramo por cada mol; z es el número de electrones involucrados en el proceso de oxidación o reducción; F es la constante de Faraday cuyo valor se puede obtener al multiplicar el número de Avogadro, N_A , por la carga eléctrica fundamental, e , siendo este de 96485.33212 coulomb por cada mol.

Para determinar la cantidad de carga eléctrica que es entregada por el electrodo, es relevante definir si la intensidad de corriente eléctrica es directa o alterna, ya que si es directa, la cantidad de carga eléctrica Q se obtiene del producto directo entre la intensidad de corriente eléctrica y el tiempo de reacción, pero si es alterna, entonces es requerido integrar, respecto al tiempo, a la intensidad de corriente eléctrica.

En el caso particular de esta práctica, la reacción de electrólisis que sucederá en presencia de corriente eléctrica directa, será realizada sobre agua, H_2O , generándose hidrógeno molecular, H_2 , y oxígeno molecular, O_2 , por lo que se deberá tener precaución durante el desarrollo de la práctica ya que el primero es un gas inflamable a temperatura ambiente mientras que el segundo es un gas comburente que es altamente oxidante.

Como se mencionó en el párrafo anterior, en esta práctica se producirán dos gases como resultado de hacer pasar una intensidad de corriente eléctrica directa en el medio líquido, uno que corresponde a la reducción del agua (producción de hidrógeno) y otro que corresponde a la oxidación del agua (producción de oxígeno), y ambas reacciones se muestran a continuación:



La primera de ellas sucederá en el cátodo (electrodo conectado a la terminal negativa de la fuente de la fuente de alimentación) y la segunda sucederá en el ánodo (electrodo conectado a la terminal positiva de la fuente de alimentación).

Finalmente, para determinar la cantidad de gas que se produce en los electrodos como función del tiempo, recurriremos a la aproximación de gas ideal para que, mediante mediciones de desplazamiento de volumen, se pueda inferir la masa de gas producido, según la ecuación:

$$\frac{QM}{zF} = \frac{P\Delta VM}{RT}$$

De donde podemos despejar al volumen desplazado:

$$\Delta V = \frac{RTQ}{PzF}$$

Si consideramos que la carga eléctrica, Q , que es entregada por el electrodo se puede obtener mediante el producto de la intensidad de corriente eléctrica, I , por el tiempo, t , tenemos:

$$\Delta V = \frac{RTIt}{PzF}$$

Para determinar el valor de la intensidad de corriente eléctrica podemos asumir un comportamiento óhmico en el sistema, por lo que se sigue la relación $V = RI$. En la sección procedimiento experimental se menciona que debe emplearse un resistor que denominaremos R_r , el cual estará conectado en serie permitiéndonos determinar la intensidad de corriente eléctrica mediante la relación $I = V_r/R_r$, en donde V_r es el potencial eléctrico que experimentará el resistor. Dado esto, la ecuación asociada al desplazamiento del volumen será:

$$\Delta V = \frac{RTV_r t}{PzFR_r}$$

En esta última ecuación, se pueden considerar como variables experimentales constantes a la temperatura, T , el potencial eléctrico en el resistor, V_r , la presión, P , y la resistencia eléctrica del resistor, R_r , mientras que el tiempo y el volumen desplazado serán variables experimentales no constantes.

Arreglando la ecuación se puede observar que es de esperarse una tendencia lineal para el volumen desplazado como función del tiempo:

$$\Delta V = \frac{RTV_r}{PzFR_r} t$$

En donde de la pendiente del ajuste lineal se puede obtener el número de electrones, z , involucrados en el proceso de reducción:

$$m = \frac{RTV_r}{PzFR_r} \Rightarrow z = \frac{RTV_r}{PmFR_r}$$

Resultados del procedimiento experimental.

En los resultados que mostramos a continuación, los cuales se hicieron por triplicado, se emplearon diferentes potenciales eléctricos constantes y se midió el tiempo como función del volumen de hidrógeno molecular producido.

Tabla 1. Potencial eléctrico en el resistor cerámico (0.566 ± 0.001) V.

Volumen de H ₂ , (V ± 0.05) mL	Tiempo (t ± 0.01) s	Tiempo (t ± 0.01) s	Tiempo (t ± 0.01) s
0.5	26.54	25.26	25.83
1.0	51.85	52.58	54.96
1.5	78.11	79.98	79.92
2.0	103.86	106.78	105.83
2.5	131.96	132.79	132.20
3.0	159.25	159.89	159.09
3.5	187.42	187.37	187.34
4.0	212.60	212.28	212.77
4.5	239.96	240.56	239.18
5.0	269.11	269.92	269.89
5.5	291.94	291.38	291.25
6.0	319.62	319.89	319.20

Tabla 2. Potencial eléctrico en el resistor cerámico (1.923 ± 0.001) V.

Volumen de H ₂ , (V ± 0.05) mL	Tiempo (t ± 0.01) s	Tiempo (t ± 0.01) s	Tiempo (t ± 0.01) s
0.5	8.40	8.43	7.69
1.0	15.71	15.64	15.82
1.5	24.31	24.35	24.07
2.0	31.99	32.94	32.46
2.5	39.54	41.24	40.26
3.0	47.65	48.15	48.29
3.5	55.93	55.58	56.09
4.0	64.48	64.39	63.20
4.5	71.57	71.72	71.11
5.0	80.10	80.23	79.38
5.5	88.28	88.79	87.41
6.0	95.74	95.64	95.22

Tabla 3. Potencial eléctrico en el resistor cerámico (3.655 ± 0.001) V.

Volumen de H ₂ , (V ± 0.05) mL	Tiempo (t ± 0.01) s	Tiempo (t ± 0.01) s	Tiempo (t ± 0.01) s
0.5	3.42	3.51	3.78
1.0	8.04	7.25	7.47
1.5	12.09	11.51	12.15
2.0	15.87	15.64	16.19
2.5	20.12	20.07	20.17
3.0	24.78	24.05	24.67
3.5	29.26	28.14	29.00
4.0	33.36	32.89	33.05
4.5	36.92	36.82	37.76
5.0	41.23	41.15	42.26
5.5	45.56	45.38	46.27
6.0	49.43	49.77	50.58

Tabla 4. Potencial eléctrico en el resistor cerámico (4.856 ± 0.001) V.

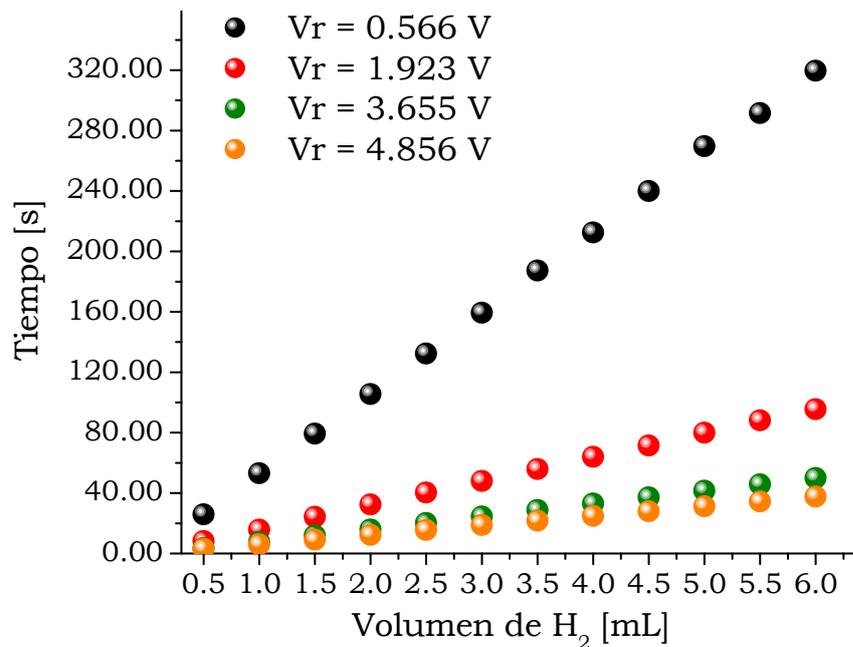
Volumen de H ₂ , (V ± 0.05) mL	Tiempo (t ± 0.01) s	Tiempo (t ± 0.01) s	Tiempo (t ± 0.01) s
0.5	3.02	3.06	3.19
1.0	5.61	5.80	6.28
1.5	8.96	8.68	9.61
2.0	12.62	11.61	12.59
2.5	15.56	14.95	16.07
3.0	18.69	18.35	19.42
3.5	21.55	21.23	22.25
4.0	24.65	24.21	25.80
4.5	27.75	27.33	28.86
5.0	31.00	30.62	31.99
5.5	34.21	33.56	35.36
6.0	37.02	36.80	39.33

Al realizar los promedios del tiempo para cada potencial aplicado, tenemos:

Tabla 5. Tiempo promedio, con incertidumbre combinada, como función del volumen de hidrógeno molecular producido para los diferentes potenciales eléctricos aplicados.

Potencial eléctrico en el resistor $V_R \pm 0.001$ [V]	0.566	1.923	3.655	4.856
Volumen de H ₂ , $V \pm 0.05$ [mL]	Tiempo, s	Tiempo, s	Tiempo, s	Tiempo, s
0.5	25.88±0.37	8.17±0.24	3.57±0.11	3.09±0.05
1.0	53.13±0.94	15.72±0.05	7.59±0.24	5.90±0.20
1.5	79.34±0.61	24.24±0.09	11.92±0.20	9.08±0.28
2.0	105.49±0.86	32.46±0.27	15.90±0.16	12.27±0.33
2.5	132.32±0.25	40.35±0.49	20.12±0.03	15.53±0.32
3.0	159.41±0.24	48.03±0.19	24.50±0.23	18.82±0.32
3.5	187.38±0.03	55.87±0.15	28.80±0.34	21.68±0.30
4.0	212.55±0.14	64.02±0.41	33.10±0.14	24.89±0.47
4.5	239.90±0.40	71.47±0.18	37.17±0.30	27.98±0.46
5.0	269.64±0.27	79.90±0.26	41.55±0.36	31.20±0.41
5.5	291.52±0.21	88.16±0.40	45.74±0.27	34.38±0.53
6.0	319.57±0.20	95.53±0.16	49.93±0.34	37.72±0.81

Al momento de graficar será posible observar una tendencia lineal entre las medidas experimentales:



Gráfica 1. Tiempo de reacción como función del volumen de hidrógeno molecular para diferentes valores en el potencial eléctrico aplicado en la fuente de alimentación. El potencial eléctrico referido en el interior de la gráfica corresponde al potencial eléctrico que experimenta el resistor cerámico.

Debido a las tendencias lineales observadas en la gráfica 1, es posible obtener los parámetros de la recta que mejor ajustan a dicha tendencia.

Tabla 6. Ecuaciones de la recta que mejor ajusta a la tendencia observada cuando se analiza el tiempo de reacción (t) como función del volumen de hidrógeno molecular (V). La pendiente tiene unidades [s/mL] y la ordenada al origen está en [s].

Potencial eléctrico en el resistor $V \pm 0.001$ [V]	Ecuación de la recta	Factor de correlación, r^2
0.566	$t = (53.5 \pm 0.2)V - (0.83 \pm 0.76)$	0.9998
1.923	$t = (15.92 \pm 0.05)V + (0.26 \pm 0.18)$	0.9999
3.655	$t = (8.46 \pm 0.02)V - (0.85 \pm 0.07)$	0.9999
4.856	$t = (6.30 \pm 0.02)V - (0.28 \pm 0.08)$	0.9998

Finalmente, empleando la última ecuación mostrada en la introducción así como el método de propagación de incertidumbre, somos capaces de determinar el número de electrones transferidos en el proceso de reducción del agua con su incertidumbre.

Tabla 7. Número de electrones, con incertidumbres, que se transfieren en la reacción de reducción del agua para formar hidrógeno molecular.

Potencial eléctrico en el resistor $V \pm 0.001$ [V]	Número de electrones transferidos
0.566	1.9602 ± 0.0002
1.923	1.9820 ± 0.0002
3.655	2.0028 ± 0.0001
4.856	1.9821 ± 0.0002

Como puede observarse, el mejor estimado para el número de electrones transferidos en el proceso de reducción es cercano a dos, tal y como dicta la reacción química, y este valor es independiente del potencial eléctrico aplicado.

Bibliografía.

- Resnick, R.; Halliday, D.; Krane, K. S. *Física*. Grupo Editorial Patria, México, 2008.
- Gil, S.; *Experimentos de Física, usando las TIC y elementos de bajo costo*. Alfaomega. México, 2014.