

REVISIÓN DE PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA ALCALINA

REVIEW OF PARAMETERS FOR THE DESIGN OF AN ALKALINE ELECTROLYTIC CELL

Nicolás Guerrero Chávez

Tecnológico Nacional de México en Celaya
M1703098@itcelaya.edu.mx

Víctor Manuel Sámano Ortega

Tecnológico Nacional de México en Celaya
M1703097@itcelaya.edu.mx

José Martín Medina Flores

Tecnológico Nacional de México en Celaya
martin.medina@itcelaya.edu.mx

José Alberto Zavala Bustos

Tecnológico Nacional de México en Celaya
jose.zavala@itcelaya.edu.mx

Arnoldo Maeda Sánchez

Tecnológico Nacional de México en Celaya
arnoldo.maeda@itcelaya.edu.mx

Resumen

En este artículo se presentan algunos parámetros considerados en el diseño de una celda electrolítica alcalina para garantizar una reacción de evolución del hidrógeno (HER por sus siglas en inglés) elevada; en los que se enlistan: composición de electrodos, principalmente por su porcentaje de níquel que trabaja como catalizador en la producción de hidrógeno; geometría de electrodos, donde intervienen sus dimensiones, que incluye espesor y área de trabajo; separación entre electrodos, una distancia mínima es preferible para mantener una resistencia eléctrica baja; electrolito, es el medio por el cual viajan los electrones haciendo posible la ruptura de la molécula de agua, el álcali usado en la mezcla es de interés porque facilita el paso de corriente eléctrica; condiciones de trabajo, algunas propiedades dependen de la temperatura operación por lo que es

importante definir estas variable al valor más óptimo posible; por último, unas observaciones con relación a propiedades, sólo si intervienen materiales además del utilizado en los electrodos. En el presente trabajo se obtuvo un listado de los parámetros de diseño y como afectan la producción de hidrógeno.

Palabra(s) Clave: alcalina, celda electrolítica, diseño, parámetros.

Abstract

This paper presents some parameters considered in the design of an alkaline electrolytic cell to guarantee a high hydrogen evolution reaction (HER); in which are listed: composition of electrodes, mainly by its percentage of nickel that works as a catalyst in the production of hydrogen; electrode geometry, where its dimensions intervene, which includes thickness and work area; gap between electrodes, a minimum distance is preferable to maintain a low electrical resistance; electrolyte, is the means by which the electrons travel making possible the rupture of the water molecule, the alkali used in the mixture is of interest because it facilitates the passage of electric current; working conditions, some properties depend on the operating temperature so it is important to define this variable at the most optimal value possible; Finally, some observations regarding properties, only if materials are involved in addition to the one used in the electrodes. In the present work a list of the design parameters was obtained and how they affect the production of hydrogen.

Keywords: *alkaline, design, electrolytic cell, parameters.*

1. Introducción

En la actualidad el sector energético a nivel mundial está basado en el uso de combustibles fósiles (Rohrich, 2008; y Celik, San & Sarac, 2010), presentando una demanda mayor al 80%, entre los que destacan: petróleo, carbón y gas natural (Goldemberg & Lucon, 2008); en consecuencia, existe una gran producción de gases de efecto invernadero (GEI) y aumentando (Iea, 1998), a causa del incremento poblacional que exige un suministro energético cada vez mayor (Goldenberg, 1998).

Debido a lo anterior, es evidente la necesidad del estudio de energías limpias como sustitutos a los combustibles fósiles, con la finalidad de menguar la producción de GEI, propiciando así, un retardo en el deterioro del medio ambiente; es por ello que, el uso de hidrógeno como energético es estudiado por investigadores en todas partes del mundo (da Silva, Simonato, Messeder & Silva, 2016).

Existen distintos métodos de producción de hidrógeno, entre los que destacan tres: electrólisis alcalina, intercambio de protones mediante una membrana (PEM por sus siglas en inglés) y celda electrolizadora de sólido óxido (SOEC por sus siglas en inglés). Todas son altamente estudiadas, no obstante, las últimas dos son las más solicitadas al día de hoy por su mayor eficiencia (>72%) sobre la primera, sin embargo, presentan altos costos de producción (Rashid, Al Mesfer, Naseem & Danish, 2015; Carmo, Fritz, Mergel & Stolten, 2013; Laguna-Bercero, 2012; Xu, Liu, Li & Wang, 2012 y Babic, Suermann, Büchi, Gubler & Shmidt, 2017); mientras que, la electrólisis alcalina presenta una eficiencia alrededor del 60% (Pletcher & Li, 2011; Zeng & Zhang, 2010 y Passas & Dunnill, 2015).

La electrólisis alcalina es un método de producción de hidrógeno (H₂) que surgió hace aproximadamente dos siglos (Rashid et al, 2015), es la forma más simple de obtener H₂; como se mencionó anteriormente, posee la eficiencia más baja de los tres métodos mencionados, no obstante, pese a ser una tecnología antigua, aún es empleada por investigadores debido a su bajo costo de fabricación. Por lo tanto, se han estudiado los parámetros que intervienen en la electrólisis porque afectan directamente a la eficiencia de la celda. Se demostró que, la separación entre los electrodos tiene una influencia significativa durante la producción de H₂, mientras más pequeña sea la distancia entre ellos mejor, encontrando que la separación óptima entre electrodos es de 2 mm y trabajar con una densidad de corriente de 500 mA/cm² (Nagai, Takeuchi, Kimura & Oka, 2003). A pesar del aumento en la eficiencia aún no es suficiente para competir con PEM y SOEC. Por lo tanto, se estudió la posibilidad de utilizar la ventaja de los otros métodos, el cero gap, es decir, una separación de 0.5 a 2 mm entre los electrodos, que corresponde al grosor de la membrana de un polímero que sirve como separador

de los gases producto (H_2 y O_2). Utilizando esta característica de los otros métodos se incrementó la eficiencia y los costos de fabricación de la celda se mantuvieron bajos (Phillips, Edwards, Rome, Jones & Dunnill, 2017). Un aspecto más que interviene en la producción de H_2 es la temperatura de operación, de forma experimental se ha determinado que, a mayor temperatura mayor producción, debido a que, la resistencia óhmica disminuye, no obstante, el incremento de temperatura debe cuidarse y mantenerse para evitar que el electrolito comience a ebullición, evitando así, la mezcla de HHO con vapor de agua (Phillips et al, 2017 y O'Reilly, Farrell, Harvey & Cassidy, 2016). Otro punto que interviene en la producción de H_2 es el material de fabricación de los electrodos, debido al ambiente corrosivo del electrolito, es imperativo que el material con el cual las placas que funcionarán como electrodos sean fabricados de un acero inoxidable, los más empleados son el 304, 316 y 430, estos se utilizan por su contenido de níquel, que sirve como catalizador en la generación de H_2 (Olivares, Campos, Uribe, Borja & Castellanos, 2007). Por último, es importante el espesor que tendrá el electrodo, un espesor grande, representa una resistencia óhmica mayor (Serway & Jewett, 2009), pero si es muy delgada la placa puede deformarse debido a los esfuerzos provocados por las condiciones de trabajo. El presente trabajo consiste en un recopilatorio de los parámetros anteriormente mencionados, con la finalidad de mostrarse como una guía a seguir para futuras investigaciones en relación a incrementar la producción de H_2 .

2. Métodos

Composición de los electrodos

Debido a que la naturaleza del electrolito es corrosiva, en la revisión de artículos se encontró que es necesario un acero inoxidable para fabricar los electrodos, entre los más utilizados se encuentran el acero 304, 316 y 430 (Olivares et al, 2007; Carbone Stainless Steel, 2018 y CHILEXPO, 2018). En la tabla 1 se muestran las características consideradas para la selección del material de los electrodos.

Tabla 1 Características de interés en los aceros seleccionados.

Característica	Acero		
	304	316	430
Composición níquel %Peso	8	12	0.5
Resistividad eléctrica $\mu\Omega \cdot m$	0.73	0.74	1.397
Conductividad térmica $W/m \cdot K$	15	15	26.1

La primera es la composición del níquel, esta es muy importante debido a que sirve como catalizador para la producción de hidrógeno, es decir, mientras más níquel presente en el sistema mayor será el HER, que depende completamente de los parámetros establecidos en la celda electrolítica (Olivares et al, 2007); la segunda es la resistividad eléctrica (RE) que tiene cada uno de los metales, con la finalidad de calcular la resistencia que ponen los electrodos al flujo de corriente, por lo tanto, se busca que sea la menor posible para evitar pérdidas mayores; por último, pero no menos importante es la conductividad térmica (CT) propia de cada material, es necesaria para calcular el calor disipado, que es generado en el electrolito durante el proceso de electrólisis porque es imperativo mantener una temperatura alta para mejorar las propiedades eléctricas de la cuba en general (Phillips et al, 2017).

Geometría

La geometría de los electrodos está definida por la ecuación 1.

$$R = \rho \frac{s}{A} \quad (1)$$

Donde R es la resistencia (Ω) por electrodo, ρ es la resistividad eléctrica (Ω/m) del acero elegido, s (m) representa espesor de la placa y A (m^2) es el área de trabajo. Se hace evidente en la ecuación 1 que, para obtener una resistencia baja, el espesor de los electrodos debe ser mínimo, así como un área de trabajo grande; esta última depende de la densidad de corriente (j) que es definida por el investigador. Mediante pruebas experimentales establece que, $j=500$ $m \cdot A/cm^2$ es suficiente para tener una alta producción de H_2 (Nagai et al, 2003). j está dada por la ecuación 2.

$$j = \frac{I}{A} \quad (2)$$

Donde I es la corriente (A) que pasa por los electrodos, conocida por el investigador. Una vez definidos I y j se obtiene el área de trabajo óptima A , ecuación 3.

$$A = \frac{I}{j} \quad (3)$$

Espacio entre electrodos

En las celdas por electrólisis alcalina debe existir una separación entre electrodos, donde el electrolito trabajará como medio de conducción, sin embargo, también representa una resistencia al paso de corriente eléctrica, que se define en la ecuación 4.

$$R_e = \rho_e \frac{l}{A} \quad (4)$$

Donde R_e es la resistencia del electrolito (Ω), ρ_e (Ω/m) es la resistividad eléctrica propia de la mezcla, l (m) es la distancia entre placas y A (m^2) es el área de trabajo. En la ecuación 4, A está definida por la ecuación 3, por lo que, para mantener una resistencia baja l debe ser mínimo; se recomienda una separación de 2 mm (Nagai et al, 2003), no obstante, para que su eficiencia compita contra la PEM y SOEC, es posible utilizar el espacio cero, esta característica es propia de las celdas PEM y SOEC, que implica el uso de una membrana que define una separación de 0.5 mm a 2 mm dependiendo de su espesor (Phillips et al, 2017).

Electrolito

Para la producción de H_2 mediante electrólisis alcalina (método más común) existen dos tipos de electrolitos principales, que son: hidróxido de potasio (KOH) e hidróxido de sodio (NaOH); ambos son altamente utilizados en estudios de investigación para la producción de H_2 , por ejemplo: para reducir la resistencia

óhmica durante la electrólisis se propone el uso de NaOH como electrolito (Phillips et al, 2017); mientras que, otros investigan la influencia de la concentración y otros parámetros en la producción de H₂ utilizando KOH como medio electrolítico (Mahrous, Sakr, Balabel & Ibrahim, 2011). Sin embargo, durante la investigación sobre la electrólisis alcalina se encontró que, son más estudios los que emplean el KOH como electrolito. Las características que se compararon entre estos dos álcalis fueron: el nivel de riesgo para la salud, donde el KOH presenta ligeramente menor riesgo debido a que suele lavarse con más facilidad que el NaOH (Regla, Vázquez, Cuervo & Neri, 2014); como se mencionó anteriormente el número de artículos que realizan estudios con cada electrolito; la solubilidad que presentan en el agua, donde ambas varían sólo por 1 gr/ml entre el KOH (Cydsa, 2002) y el NaOH (Cydsa, 2006). El precio que tiene cada sustancia en el mercado, siendo el KOH hasta tres veces más costoso que el NaOH; y por último su disponibilidad en el mercado. Recordando al investigador que existen más electrolitos con los cuales puede trabajar, sin embargo, en el presente se enlistan los dos más empleados.

Condiciones de trabajo

En los artículos consultados se encontró que las propiedades de los materiales usados, tales como: RE y CT del acero, ρ_e del electrolito; dependen de la temperatura, tal como se muestra en la figura 1.

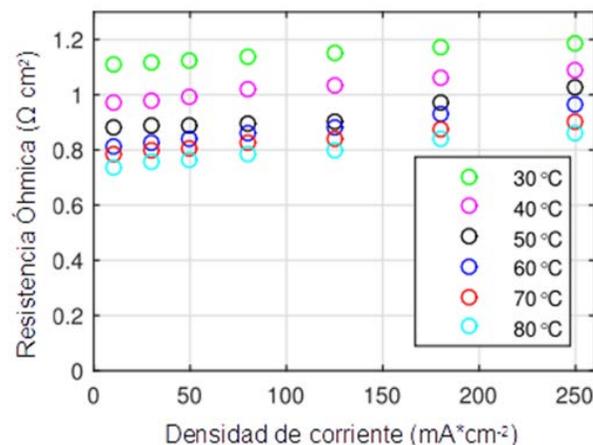


Figura 1 Temperatura de celda sobre la resistencia óhmica (Phillips et al, 2017).

En la figura 1 se observa que, la resistencia óhmica disminuye a medida que la temperatura incrementa, esto ocurre porque la conductividad eléctrica aumenta ($1/\rho$) (Phillips et al, 2017).

Por lo tanto, es imperativo que el investigador trabaje su celda electrolítica a temperaturas altas, pero sin alcanzar el punto de ebullición de la mezcla porque de ser el caso, obtendría vapor de agua junto con HHO provocando que se humedezca haciendo ineficiente la combustión del gas.

Consideraciones finales

El investigador debe recordar que está trabajando en un ambiente corrosivo, por lo que, si decide emplear materiales aparte del acero inoxidable, debe considerar la resistencia química de estos para evitar desgaste en su celda, evitando un mantenimiento correctivo frecuente.

El investigador debe definir la concentración de la mezcla de forma experimental porque dependen de las características de operación deseables.

Finalmente, la celda electrolítica debe operar con voltajes bajos y corrientes altas, evitando pérdidas por calor.

3. Resultados

Como producto de los artículos consultados, en la tabla 2 se muestra un listado de los parámetros que influyen en la producción de H₂.

Por último, en la figura 2 se presenta un diagrama de flujo que se sugiere sirva de guía al investigador en el diseño de una celda electrolítica.

4. Discusión

En lo descrito anteriormente (tabla 1), se hace evidente que, en la electrólisis intervienen aspectos que van desde la temperatura trabajo hasta resistencia de los materiales a un ambiente corrosivo. El presente trabajo fue una revisión de los parámetros que influyen en la producción de hidrógeno en una celda electrolítica alcalina, y que estos varían si se trata de una PEM o SOEC.

Tabla 2 Compendio de los parámetros de diseño para la celda electrolítica.

Parámetro	Influencia en H ₂	Frecuentemente utilizado
Composición de electrodos	Revisar el porcentaje de níquel porque funciona como catalizador en la producción de H ₂ , resistividad eléctrica y conductividad térmica.	Acero inoxidable 304, 316, 430
Geometría	El espesor y área de trabajo son las dimensiones de mayor interés porque definen la resistencia eléctrica que presentan los electrodos.	Definir dimensiones usando ecuación 1
Espacio entre electrodos	Es la distancia que separa los electrodos, donde el electrolito trabaja como medio de conducción, recordando que, representa una resistencia definida por ecuación 4.	0.5 a 2 mm
Electrolito	Su función es facilitar la conducción eléctrica, disminuyendo la resistencia óhmica.	KOH, NaOH
Condiciones de trabajo	Algunas de las propiedades de los materiales utilizados para la celda electrolítica, dependen de la temperatura de operación, estas aumentan la eficiencia a temperaturas elevadas	60 a 80 °C
Consideraciones finales	El investigador debe considerar que los materiales que estén en contacto directo con el electrolito resistan el ambiente corrosivo, la concentración presente en la mezcla agua-álcali y el voltaje y corriente de trabajo	A considerar por el investigador

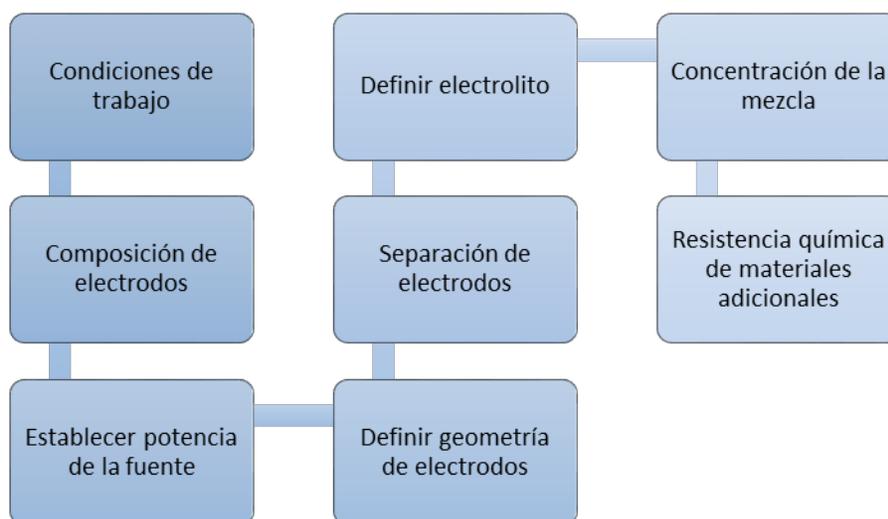


Figura 2 Propuesta de pasos a seguir para el diseño de una celda electrolítica.

Algo importante a considerar es que algunos de los pasos en el diagrama de flujo (mostrado en la figura 2) son experimentales, es decir, el investigador deberá realizar pruebas del funcionamiento de la celda electrolítica cada vez que exista algún cambio en estos, entre los que se encuentran: condiciones de operación,

separación de electrodos y concentración de la mezcla; si la producción de hidrógeno aún no es la esperada, se procede a modificar el material de electrodos o su geometría, estos parámetros son los últimos en cambiar por el tiempo de fabricación.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Babic, U., Suermann, M., Büchi, F. N., Gubler, L., & Shmidt, T. J. Review-Identifying Critical Gaps For Polymer Electrolyte Water Electrolysis Development. *Journal of the Electrochemical Society*, 164, Pp. 387-399 (2017).
- [2] Carbone Stainless Steel. Ficha Técnica del Acero Inoxidable: www.empresascarbhone.com/pdf/ficha-tecnica-del-aceroinoxidable.pdf (junio, 2018).
- [3] Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J., & Stolten, D. A Comprehensive Review on Pem Water Electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, Pp. 4901-4934 (2013).
- [4] Celik, C., San, F. G. B., Sarac, H. I., Influences of Sodium Borohydride Concentration on Direct Borohydride Fuel Cell Performance. *J Power Sources* 2010; 195(9):2599-603.
- [5] Chilexpo. Aleación 430: http://www.Chilexpo.Com/Dinamicos/Calidades/742359-430_Esp.Pdf. (junio, 2018).
- [6] Cydsa. (2002, junio 14). Hidróxido De Potasio, Hoja de Datos de Seguridad Para Sustancias Químicas. Cydsa.: <http://www.aniq.org.mx/pqta/pdf/hidr%C3%B3xido%20de%20sodio%20soluci%C3%B3n%20%28msds%29.pdf>.
- [7] Cydsa. (2006, mayo). Hidróxido de Sodio, Hoja de Datos de Seguridad Para Sustancias Químicas. Cydsa: <http://www.aniq.org.mx/pqta/pdf/koh%20%28msds%29.pdf>.
- [8] Goldemberg, J., *Energia E Desenvolvimento. Estud Avançados*, São Paulo Iea-Usp 1998;12(33):7-15.
- [9] Goldemberg, J., & Lucon, O., *Energia, Meio Ambiente E Desenvolvimento. Ed Univ São Paulo* 2008; 400.

- [10] Da Silva, T., Simonato, T., Messeder, D., Da Silva, A. (2016). Hydrogen: Trends, Production and Characterization of the Main Process Worldwide. *International Journal of Hydrogen Energy*, Xxx, 1-16.
- [11] Iea-International Energy Agency. *Transport, Energy and Co2*. Paris: International Energy Agency. 2009.
- [12] Laguna-Bercero, M. A. Recent Advances in High Temperature Electrolysis Using Solid Oxide Fuel Cells: A Review. *Journal of Power Sources*, 203, Pp. 4-16 (2012).
- [13] Mahrous, A-F. M., Sakr, I. M., Balabel, A., & Ibrahim, K. (2011). Experimental Investigation of the Operating Parameters Affecting Hydrogen Production Process through Alkaline Water Electrolysis. *Int. J. Of Thermal & Environmental Engineering*, 2, Pp. 113-116.
- [14] Nagai, N., Takeuchi, M., Kimura, T., & Oka, T. Existence Of Optimum Space Between Electrodes On Hydrogen Production By Water Electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28, Pp. 35-41 (2003).
- [15] Olivares, J. M., Campos, M. L., Uribe, J., Borja, E., & Castellanos, R. H. Studies on the Hydrogen Evolution Reaction on Different Stainless Steels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, Pp.3170-3173 (2007).
- [16] O'Reilly, C., Farrell, M., Harvey, D., & Cassidy, J. Operation Of An Inexpensive Bipolar Alkaline Electrolyser Producing A Mix Of H₂/O₂ Fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, Pp. 2197-2201b (2016).
- [17] Passas, G., & Dunnill, C. Water Splitting Test Cell for Renewable Energy Storage As Hydrogen Gas. *J Fundam Renew Energy Appl* 2015; 5(5), P.188.
- [18] Phillips, R., Edwards, A., Rome, B., Jones, D. R., & Dunnill, C. W. Minimising the Ohmic Resistance of an Alkaline Electrolysis Cell through Effective Cell Design. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, Pp. 23986-23994 (2017).
- [19] Pletcher, D., & Li, X. Prospects for Alkaline Zero Gap Water Electrolysers for Hydrogen Production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, Pp. 15089-15104 (2011).

- [20] Rashid, M., Al Mesfer, K., Naseem, H., & Danish, M. Hydrogen Production by Water Electrolysis: A Review of Alkaline Water Electrolysis, Pem Water Electrolysis and High Temperature Water Electrolysis. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 4, Pp. 80-93 (2015).
- [21] Regla, I., Vázquez, E., Cuervo, D. H., & Neri, A. C., (2014, mayo 1). La Química del Jabón y Algunas Aplicaciones. *Revista Digital Universitaria*, 15, P.5: <http://www.revista.unam.mx/vol.15/num5/art38/index.html>.
- [22] Rohrich, S. S., Descarbonização do Regime Energético Dominante: Perspectivas para la Economía do Hidrogênio No Brasil. Pp 173. (Phd. Dissertation) Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas. 2008.
- [23] Serway, R., & Jewett, J. Física Para Ciencias E Ingeniería Con Física Moderna. Volumen 2. México, D.F.: Cengage Learning, (2009).
- [24] Xu, J., Liu, G., Li, J., & Wang, X. The Electrocatalytic Properties of an Iro₂/Sno₂ Catalyst Using Sno₂ as a Support and an Assisting Reagent for the Oxygen Evolution Reaction. *Electrochimica Acta*, 59, Pp. 105-112 (2012).
- [25] Zeng, K., & Zhang, D. Recent Progress in Alkaline Water Electrolysis for Hydrogen Production and Applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36, Pp. 307-326 (2010).