

Ciencia Latina
Internacional

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), julio-agosto 2024,
Volumen 8, Número 4.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4

**LA SEPARACIÓN DE LOS ELECTRODOS
COMO FACTOR PARA EL CONSUMO DE
POTENCIA ELÉCTRICA EN LA PRODUCCIÓN
DE GAS BROWN CON ELECTROLIZADORES
BIPOLARES ALCALINOS**

**ELECTRODE SEPARATION AS A FACTOR FOR CONSUMPTION
ELECTRICAL POWER IN THE PRODUCTION OF BROWN GAS
WITH BIPOLAR ALKALINE ELECTROLYZERS**

José Luis Sosa Pedraza

Instituto Tecnológico de Lázaro Cárdenas, México

Jorge Salazar Rocha

Instituto Tecnológico de Lázaro Cárdenas, México

Jose Enrique Munguía Tapia

Instituto Tecnológico de Lázaro Cárdenas, México

La Separación de los Electrodoes como Factor para el Consumo de Potencia Eléctrica en la Producción de Gas Brown con Electrolizadores Bipolares Alcalinos

José Luis Sosa Pedraza ¹

ing.jl.sosa@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-2850-5891>

Instituto Tecnológico de Lázaro Cárdenas
México

Jorge Salazar Rocha

jorgesalazarrocha@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3847-0554>

Instituto Tecnológico de Lázaro Cárdenas
México

Jose Enrique Munguía Tapia

jenrique.munguia@lcardenas.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0002-3847-0554>

Instituto Tecnológico de Lázaro Cárdenas
México

RESUMEN

La electrólisis de agua alcalina es de los métodos más fáciles para la producción de hidrógeno. Para el uso generalizado de la electrólisis del agua hay que reducir el consumo de energía, costo, mantenimiento y aumentar la fiabilidad, durabilidad y seguridad. Actualmente existe una gran oportunidad en México ya que solamente el 3.2% de la producción de hidrogeno se realiza por electrolisis uno de los factores es el alto costo de los materiales y la electricidad el primero se puede amortiguar aumentando la densidad de corriente que transita por los electrodos. La alteración de la microestructura superficial, el electrolito y la separación de los electrodos incide directamente en el consumo eléctrico. En el presente estudio se experimentó con claros entre electrodos obtenidos en otras investigaciones (6.0, 10mm), resultando la separación de 10 mm con una mínima diferencia en la producción de gas Brown a un menor consumo de electricidad.

Palabras clave: bipolar, gas brown, separación, potencia eléctrica

¹ Autor principal.

Correspondencia: ing.jl.sosa@gmail.com

Electrode Separation as a Factor for Consumption Electrical Power in the Production of Brown Gas with Bipolar Alkaline Electrolyzers

ABSTRACT

Alkaline water electrolysis is one of the easiest methods for hydrogen production. For the widespread use of water electrolysis, energy consumption, cost, maintenance must be reduced and reliability, durability and safety must be increased. Currently there is a great opportunity in Mexico since only 3.2% of hydrogen production is carried out by electrolysis, one of the factors is the high cost of materials and electricity, the first can be damped by increasing the current density that passes through the electrodes. The alteration of the surface microstructure, the electrolyte and the separation of the electrodes directly affects electrical consumption. In the present study, we experimented with gaps between electrodes obtained in other investigations (6.0, 10mm), resulting in a separation of 10 mm with a minimum difference in the production of Brown gas at lower electricity consumption.

Keywords: bipolar, gas brown, separation, electrical power

*Artículo recibido 10 julio 2024
Aceptado para publicación: 15 agosto 2024*



INTRODUCCIÓN

Ahora, la contaminación de los combustibles de petróleo aumenta día a día en todo el mundo y, como sabemos los combustibles de petróleo no son renovables, por lo que un cambio en los intereses de los científicos es observado recientemente, hacia un menor consumo de combustible. Esto alienta a los investigadores a buscar soluciones alternativas para usar en motores un combustible alternativo sin la necesidad de un cambio dramático en el diseño del vehículo (Usmani 2018)

Los combustibles fósiles son una fuente de energía versátil y vital que la vida productiva humana depende en gran medida de los productos básicos; el transporte y la producción de energía.

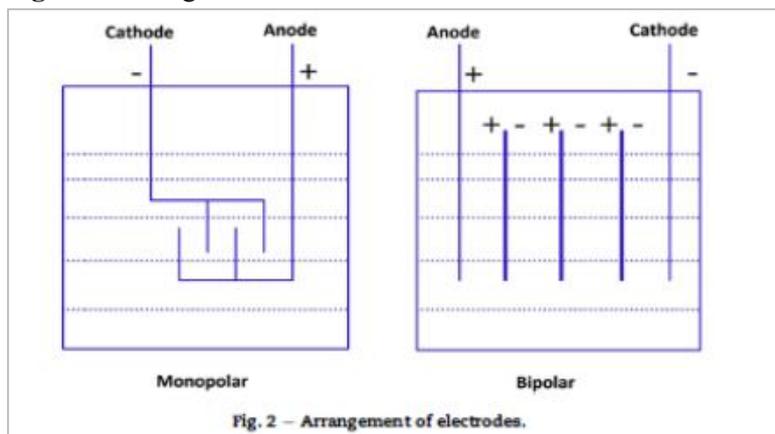
La investigación y el desarrollo (I + D) realizados en las últimas décadas han demostrado que el sector de la energía eléctrica y el sector del transporte representan el 82% y 95% respectivamente de todo el combustible fósil consumido en el mundo.

Los estudios han revelado además que la quema continua de estos combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) liberan una enorme cantidad de contaminantes (radiactividad, metales pesados, y cenizas) y gases de efecto invernadero (CO, CO₂, SO_x y NO_x) en el medio ambiente causando el calentamiento global y otras enfermedades humanas relacionadas (Essuman et al. 2019).

(Zoulias et al. s. f.), revisaron varias técnicas de hidrógeno producción. Señalaron que se pueden usar soluciones electrolíticas ácidas o alcalinas. Sin embargo, se prefiere este último debido a un menor riesgo de corrosión, lo que permite el uso de productos más baratos materiales de construcción.

La electrólisis alcalina se puede transportar utilizando arreglos monopolares o bipolares de electrodos, en donde los electrodos están dispuestos en paralelo y en serie respectivamente como se muestra en la Fig. El uso de la disposición bipolar tiene las ventajas de compacidad y menor requerimiento de material. Sin embargo, este arreglo puede producir corrientes de derivación en los conductos de electrolitos si no está diseñado correctamente. Los autores han citado diseños de células electrolíticas alcalinas con presiones operativas de hasta 30 bar, corriente densidad hasta 10 kA / m² y eficiencia superior al 80%.(Subramanian y Ismail 2018) .

Figura 1: Arreglo de los electrodos.



Fuente: (Subramanian y Ismail 2018)

MARCO TEÓRICO

Electroquímica de la electrólisis del agua

De acuerdo a (Abe s. f.), (Shrikant Bhardwaj y Subodh Kumar Sharma s. f.) y (Zouhri y Lee 2016) el proceso de electrólisis del agua consiste en tres partes principales; el cátodo, el ánodo y el electrolito conductor de iones durante el proceso, el hidrógeno y el oxígeno se producen en el cátodo y el ánodo, respectivamente.

La reacción química para la electrólisis del agua alcalina es descrita por la siguiente ecuación:



La reacción que se produce en el lado del ánodo se puede describir por lo siguiente:



La reacción se produce en el lado del cátodo se puede describir como sigue:



Termodinámica

La termodinámica proporciona un marco para describir el equilibrio de la reacción y los efectos térmicos en los reactores electroquímicos. También da una base para la definición de las fuerzas que dan lugar a la aparición de los fenómenos de transporte en los electrolitos y conduce a la descripción de las propiedades de las soluciones. A continuación, hay una breve descripción de la termodinámica que se da a bajas temperaturas en reacciones electroquímicas hidrógeno-oxígeno para un modelo de electrolizador.

Pueden hacerse los siguientes supuestos sobre el agua para una reacción de división:

- (a) el hidrógeno y el oxígeno son gases ideales
- (b) el agua es un fluido incompresible
- (c) las fases gas y líquido son separadas.

Basado en estos supuestos el cambio de entalpía ΔH , de entropía ΔS y la energía de Gibbs ΔG de la reacción de división del agua puede calcularse con referencia a hidrógeno puro (H_2), oxígeno puro (O_2) y agua (H_2O) a temperatura y presión ($25^\circ C$ y 1 bar) estándar. El cambio total de entalpía para dividir el agua es la diferencia de entalpía entre los productos (H_2 y O_2) y los reactantes (H_2O). Lo mismo se aplica para el cambio total de entropía. El cambio en la energía de Gibbs se expresa por.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.4)$$

En condiciones normales ($25^\circ C$ y 1 bar) la división de agua es una reacción no espontánea, esto significa que el cambio en la energía de Gibbs es positiva. La energía de Gibbs estándar para dividir el agua es $\Delta G = 273 \text{ kJ mol}^{-1}$. Para un proceso electroquímico que opera a temperatura y presión constante, el trabajo útil posible máximo (es decir, el trabajo reversible) es igual al cambio en la energía de Gibbs ΔG .

La ley de Faraday relaciona la energía eléctrica (emf) necesaria para dividir el agua a la tasa de conversión química en cantidades molares. La emf para un proceso electroquímico reversible o el voltaje reversible de la celda reversible, se expresa por.

$$U_{rev} = \frac{\Delta G}{z * F} \quad (2.5)$$

$$U_{rev} = \frac{\Delta G}{z * F} = \frac{237000J}{296485C} = 1.23 V$$

La cantidad total de energía necesaria en la electrólisis del agua es equivalente al cambio de entalpía ΔH . De la ecuación (4) se ve que ΔG incluye la irreversibilidad térmica $T\Delta S$, que para un proceso reversible es igual a la demanda de calor. La entalpía estándar para dividir el agua es $\Delta H_o = 286 \text{ kJ mol}^{-1}$. La demanda total de energía ΔH está relacionada con el voltaje termoneutro de la celda por la expresión

$$U_{rev} = \frac{\Delta H}{z * F} \quad (2.6)$$



$$U_{rev} = \frac{\Delta H}{z \cdot F} = \frac{286000J}{296485C} = 1.48 V$$

En condiciones estándar $U_{rev} = 1.229 V$ y $U_{tn} = 1.482$, pero estos cambiarán con la temperatura y la presión. En el rango de temperaturas aplicables U_{rev} disminuye ligeramente con el aumento de la temperatura ($U_{rev}@80^{\circ}C, 1 \text{ bar} = 1.184 V$), mientras que se U_{tn} se mantiene casi constante ($U_{tn}@80^{\circ}C, 1 \text{ bar} = 1.473 V$). Aumentando la presión aumenta ligeramente U_{rev} ($U_{rev}@25^{\circ}C; 30 \text{ bar} = 1.295 V$), mientras que U_{tn} permanece constante. (Ramirez Piedrahita 2015)

Potencia teórica del HHO

El proceso de electrólisis, hay más de un tipo posible de reacción eléctrica, entonces un anión simple se desprenderá del ánodo positivo (por ejemplo, cloruro), que carece de este anión, OH^- será creado por división de agua. El voltaje de disolución del agua a $25^{\circ} C$ (temperatura ambiente) es $1.23 V$ (fuerza electromotriz, FEM), el coeficiente de temperatura es $0.85 \text{ mV} / K$, lo que significa que a $100^{\circ} C$ la tensión baja a $1,17 V$. Por lo tanto, a la luz de estos datos, la demanda de energía específica para hacer hidrógeno a través de la electrólisis en $25^{\circ} C$ se puede calcular de la siguiente manera

La cantidad de carga necesaria para separar 1 kg de gas de hidrógeno es

$$q = z F / M \quad (2.7)$$

$$= (2 \cdot 96; 487) / 2 = 96; 487 \text{ As} / \text{mol} = 26; 801 \text{ Ah} / \text{kg}$$

donde

z es el número de carga del ion específico,

F es la constante de Faraday (aproximadamente $96,500 \text{ C} / \text{mol}$) y

M es el peso atómico estándar.

La potencia eléctrica es igual al producto del voltaje por la corriente podemos calcular la potencia necesaria para producir un kilogramo de hidrogeno de la siguiente manera:

$$WH_2 = q E_{MF} = 26; 801 \cdot 1.23 = 32; 966 \text{ Wh} / \text{kg} \quad (2.8)$$

Dado que el volumen de 1 kg de estado estándar H_2 es $12,474 \text{ L}$, la cantidad de energía requerida para producir 1 L de hidrógeno es

$$WH_2 = 32; 966 / 12; 474 = 2.64 \text{ Wh} / \text{L}; \quad (2.9)$$

Para producir 1 L de hidrógeno, se necesitan $1,5 \text{ L}$ de gas HHO. La energía demanda de producir 1 L



de gas HHO (usando (3)) es

$$W_{\text{HHO}} = 0.667 * 2.64 = 1.76 \text{ Wh / L:} \quad (2.10)$$

(Göllei, Görbe, y Magyar 2016)

METODOLOGÍA

Descripción del método

Para el proceso de la electrolisis se requieren según (Tijani, Yusup, y Rahim 2014).

Electrodos

Ánodo

Cátodo

Electrolito

Fuente de cc.

El Stanley Steel AISI 316 es 10 veces más barato que el níquel, de acuerdo con (Symes et al. 2015), utilizaremos este material para realizar este experimento.

En base a la metodología que se utilizó en “Evaluación del efecto de las modificaciones superficiales en electrodos basados en Ni para electrólisis del agua alcalina” en el Centro de Energía, Universidad de Western Australia (Zeng y Zhang 2014), se realizaron modificaciones a la microestructura superficial del acero inoxidable AISI 316 para ser utilizados en electrolizadores bipolares alcalinos para la producción de oxhidrógeno. El aumento en el área superficial se traduce en un mayor flujo de corriente, así como en un incremento en la producción. Como electrodo se utilizaron placas de 35 x 35 mm a las cuales se les aplicó un lijado con una lijadora BLACK + DECKER modelo SS200 y una lija GSO 50 posteriormente se les colocó un alambre de cobre recubierto de calibre 16 AWG para su conexión a la electricidad, se preparará un juego de electrodos para cada separación 6 y 10, mm entre placas, las pruebas se harán de la siguiente manera: para cada separación un par de electrodos, un par de electrodos y un neutro un par de electrodos y dos neutros, se utilizó como electrolito hidróxido de potasio al 20%.

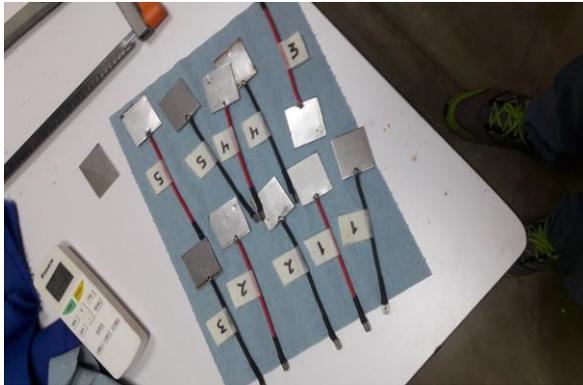
METODOLOGÍA

Se cortaron de una misma pieza pequeñas probetas de acero AISI-316

El grado 316 es la segunda forma de acero inoxidable más común. Tiene casi las mismas propiedades físicas y mecánicas del acero inoxidable 304. La diferencia es que incorpora alrededor de 2% a 3% de molibdeno, que incrementa su resistencia a la corrosión, en particular contra el cloruro y otros solventes industriales. (“Acero inoxidable 304 y 316”, 2018)

Las dimensiones de las probetas son (35 x 35 x 1.3 mm) al cortar las probetas se cuidó que tuvieran las mismas medidas (Figura1).

Figura 1: Placas de acero inoxidable antes de su limpieza



Fuente: Elaboración propia

Se les aplicaron los siguientes tratamientos ver (Tabla.1).

Tabla 1: Detalle de las probetas empleadas, tratamientos aplicados a cada una de ellas y la función que desarrollan.

Probeta	Función	Tratamiento
AISI316	Cátodo	Rayado - Limpieza
AISI316	Ánodo	Rayado - Limpieza

Fuente: Elaboración propia

Las etapas que corresponden a los tratamientos son: se tomó como base a;(Lavorante et al. s. f.), (Lavorante y Franco 2016)

Para el tratamiento de limpieza

- Lavar las probetas con agua destilada y dejar secar al aire.
- Mojar un papel de filtro con acetona, limpiar la probeta y dejar evaporar el solvente.
- Mojar un papel de filtro con alcohol isopropílico, limpiar la probeta y dejar evaporar el solvente.

Para el tratamiento de rayado

- Rayar dos de las probetas con lija J-73 Fandeli ANSI-50 con lijadora BLACK + DECKER modelo SS200 .
- Lavar las probetas con agua destilada, dejar secar al aire.
- Mojar un papel de filtro con acetona, limpiar la probeta y dejar secar al aire.
- Mojar un papel de filtro con alcohol isopropílico, limpiar la probeta y dejar evaporar el solvente.
- Las probetas fueron sumergidas en Potasa caustica al 20% y 80% de agua destilada, los (electrodos) están conectados a una fuente Maisheng DC power supply MS3010D de 110V/60 Hz, 30V/10A.

Figura 2: Imágenes 500x de los electrodos rayado con una lijadora BLACK + DECKER modelo SS200 con papel de lija P50, (microscopio marca Digital Microscope Magnificación)



Fuente: Elaboración propia

Para dar agilidad a la prueba se diseñó un soporte para hacer el intercambio de probetas de manera más rápida este dispositivo se construyó en una impresora 3D como lo muestra la figura.

Figura 3: Dispositivo separador de electrodos tipo placa con diferentes claros



Fuente: Elaboración propia

Para hacer el cambio de probetas más ágil se le colocaron a cada externo del alambre de cobre una terminal macho plana de ¼ in como lo muestra la figura 4.

Figura 4: Dispositivo separador con diferentes claros, y electrodos con cable y terminal plana macho



Fuente: Elaboración propia

Figura 5: Vista general de experimento.



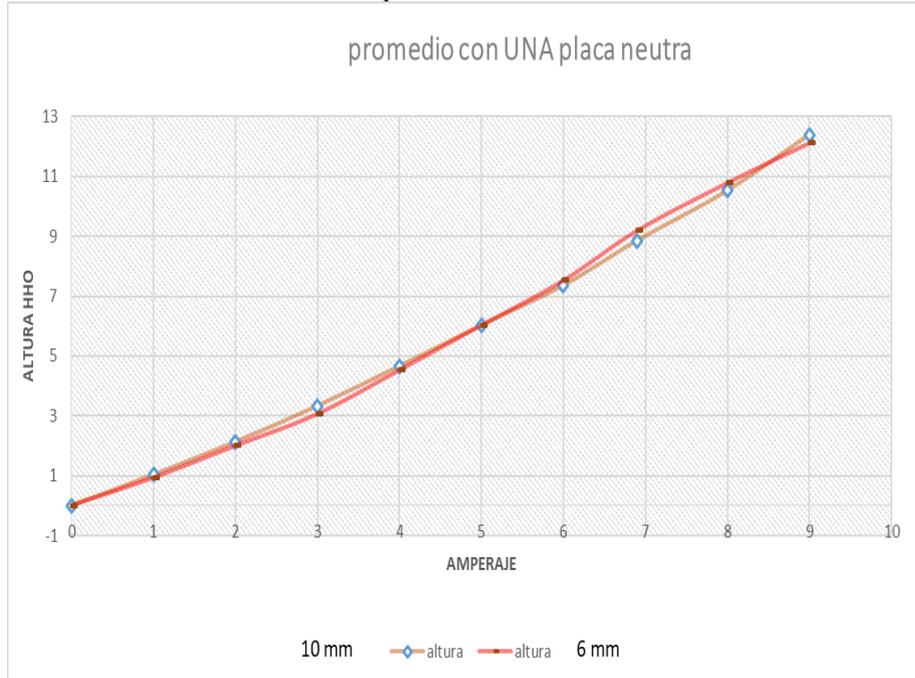
Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS

Resumen de resultados

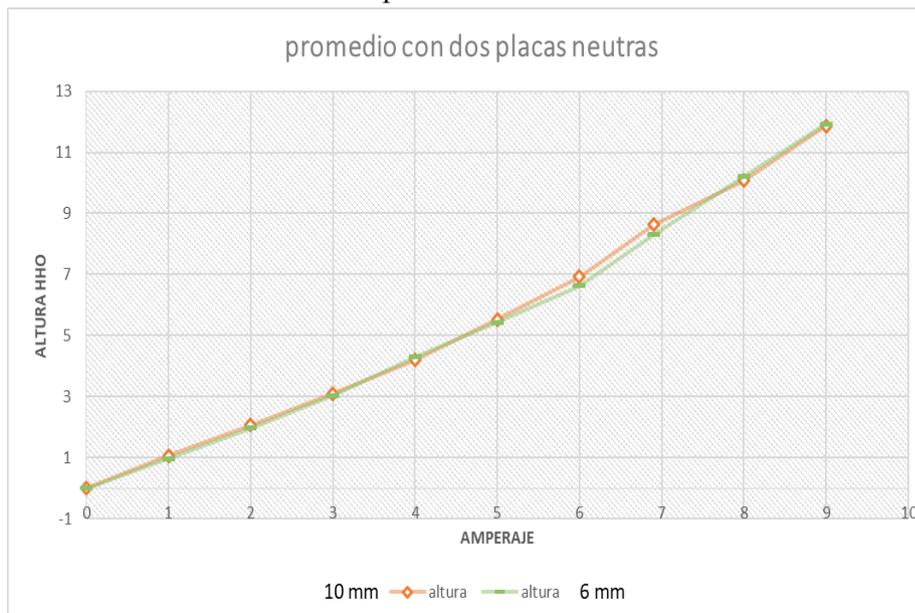
En las siguientes graficas observamos el resumen de resultados, primeramente hacemos la comparación de un juego de electrodos con una placa neutra y observamos como los resultados no son significativamente diferentes, sin embargo tenemos una ligera diferencia para 10 mm.

Grafica 1: Producción con una placa neutra.



Fuente: Elaboración propia

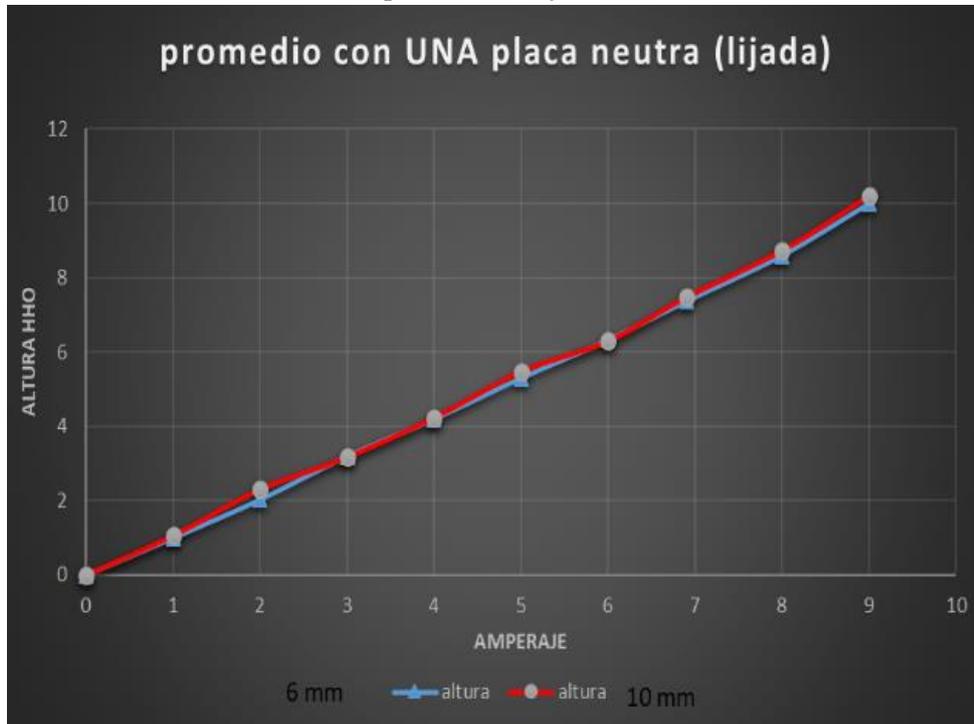
Grafica 2: Producción con una placa neutra



Fuente: Elaboración propia

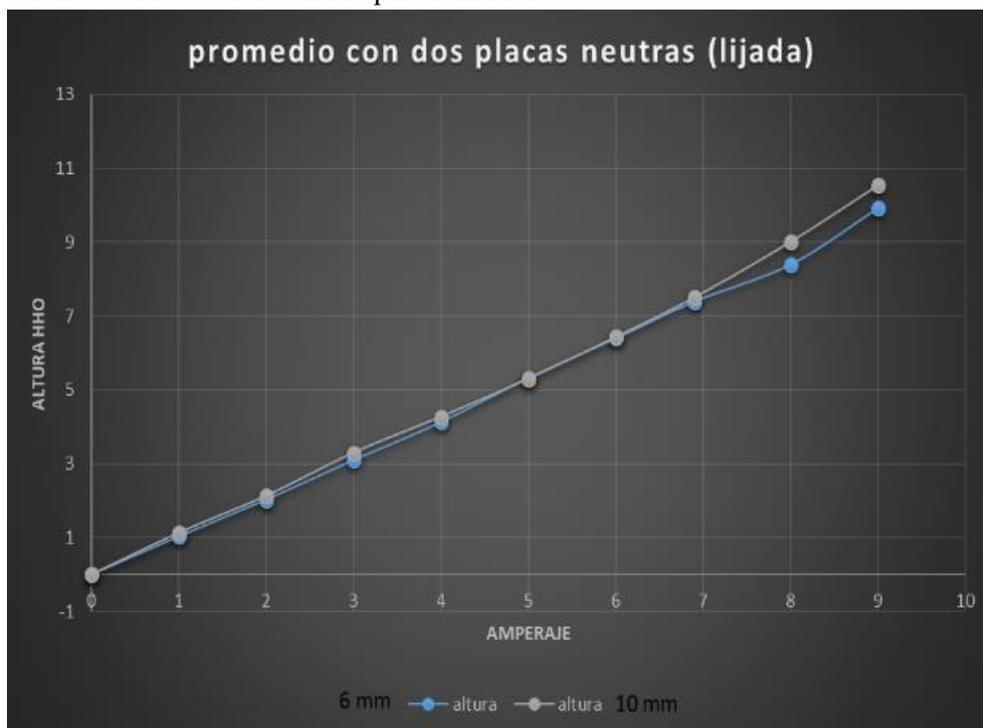
Como observamos en la gráfica los resultados son similares al aumentar a dos las placas neutras
Ahora bien, los resultados de la siguiente grafica fueron obtenidos con los electrodos lijados con un
abrasivo G50

Grafica 3: Producción con una placa neutra lijada



Fuente: Elaboración propia

Grafica4: Producción con dos placas neutras



Fuente: Elaboración propia

Si observamos la gráfica 3 la separación entre electrodos es ligeramente mayor para 10 mm Finalmente para dos placas neutras observamos que la separación con una mejor producción en la de 10 mm

CONCLUSIÓN

Para (Lavorante et al. s. f.) en Argentina la separación de 6.3 es la óptima para electrodos en serie en este estudio se observa una ligera mejora en la producción con la separación de 10.0 mm aplicada a un electrolizador bipolar alcalino.

Recomendaciones

Recomendamos que, para la construcción de electrolizadores bipolares alcalinos, se haga con una separación de 10.0 mm.

Sin embargo, si la utilización de los separadores eleva el costo del electrolizador la separación a elegir será de 6.0.

Asimismo, el tratamiento mecánico (lijado con grano G50), no es suficiente se recomienda hacerlo un poco más agresivo para incrementar la superficie.

BIBLIOGRAFIA

Abe, Isao. s. f. «Alkaline Water Electrolysis».

Essuman, Samuel Pamford Kojo, Andrew Nyamful, Vincent Agbodemegbe, y Seth Kofi Debrah. 2019.

«Experimental Studies of the Effect of Electrolyte Strength, Voltage and Time on the Production of Brown's (HHO) Gas Using Oxyhydrogen Generator». *Open Journal of Energy Efficiency* 08(02):64-80. doi: 10.4236/ojee.2019.82005.

Göllei, Attila, Péter Görbe, y Attila Magyar. 2016. «Measurement Based Modeling and Simulation of Hydrogen Generation Cell in Complex Domestic Renewable Energy Systems». *Journal of Cleaner Production* 111:17-24. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.06.025.

Lavorante, M. J., R. Munaro, J. I. Franco, y H. J. Fasoli. s. f. «ESTUDIO SISTEMÁTICO DEL COMPORTAMIENTO DE ELECTRODOS DE ACERO INOXIDABLE 316L PICADOS CON HCl PARA SU USO EN ELECTROLIZADORES BIPOLARES ALCALINOS.»



- Lavorante, María José, y Juan Isidro Franco. 2016. «Performance of Stainless Steel 316L Electrodes with Modified Surface to Be Use in Alkaline Water Electrolyzers». *International Journal of Hydrogen Energy* 41(23):9731-37. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.02.096.
- Ramirez Piedrahita, Gustavo. 2015. «DISEÑO DE UN EQUIPO DE SOLDADURA BASADO EN GAS HHO EXTRAIDO DEL AGUA».
- Shrikant Bhardwaj, Ajay Singh Verma, y Subodh Kumar Sharma. s. f. «Effect Of Brown Gas On The Performance Of A Four Stroke Gasoline Engine». *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*.
- Subramanian, Balaji, y Saleel Ismail. 2018. «Production and Use of HHO Gas in IC Engines». *International Journal of Hydrogen Energy* 43(14):7140-54. doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.02.120.
- Symes, Daniel, Bushra Al-Duri, Waldemar Bujalski, y Aman Dhir. 2015. «Cost-Effective Design of the Alkaline Electrolyser for Enhanced Electrochemical Performance and Reduced Electrode Degradation». *International Journal of Low-Carbon Technologies* 10(4):452-59. doi: 10.1093/ijlct/ctt034.
- Tijani, Alhassan Salami, Nur Afiqah Binti Yusup, y A. H. Abdol Rahim. 2014. «Mathematical Modelling and Simulation Analysis of Advanced Alkaline Electrolyzer System for Hydrogen Production». *Procedia Technology* 15:798-806. doi: 10.1016/j.protcy.2014.09.053.
- Usmani, Mohammad Affan. 2018. «Use of Oxy Hydrogen Gas in Stationary Devices: A Review».
- Zeng, Kai, y Dongke Zhang. 2014. «Evaluating the Effect of Surface Modifications on Ni Based Electrodes for Alkaline Water Electrolysis». *Fuel* 116:692-98. doi: 10.1016/j.fuel.2013.08.070.
- Zouhri, Khalid, y Seong-young Lee. 2016. «Evaluation and Optimization of the Alkaline Water Electrolysis Ohmic Polarization: Exergy Study». *International Journal of Hydrogen Energy* 41(18):7253-63. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.03.119.
- Zoulias, Emmanuel, Elli Varkaraki, Nicolaos Lymberopoulos, Christodoulos N. Christodoulou, y George N. Karagiorgis. s. f. «A REVIEW ON WATER ELECTROLYSIS».