Desarrollo de un prototipo para la producción de Hidrógeno a partir de electrolisis

Investigación Terminada

Rojas Mantilla, Andres Mauricio
Ingeniería en Energía
Facultad de Ingeniería
arojas303@unab.edu.co

Quilaguy Fajardo, Meggeen Elisa
Ingeniería en Energía
Facultad de Ingeniería
mquilaguy@unab.edu.co

Universidad Autónoma de Bucaramanga

RESUMEN

En este artículo se presenta la elaboración de un electrolizador alcalino de agua para la producción de Hidrógeno, verificando la aplicación de las leyes de Faraday a la electrólisis. La celda y el sistema en general se diseñaron y construyeron durante el desarrollo del presente proyecto. Las condiciones de operación de la celda fueron puestas a punto mediante la experimentación sobre el electrolito (evaluación del NaOH y el KOH y determinación de la concentración óptima de trabajo).

ABSTRACT

This paper presents the realization of an alkaline electrolyser for water to produce hydrogen, verifying the aplication of Faraday's law to electrolysis. The cell and the system were designed and constructed during the development of the present project. The cell operation conditions were tuned through the experimentation of the electrolyte (evaluating the NaOH and the KOH and determinating the optimal concentration to work with)

Área de Conocimiento

Ingenierías, Ciencias Naturales, Tecnologías y Medio Ambiente.

Palabras Clave

Leyes de Faraday, electrólisis, Hidrogeno.

INTRODUCCIÓN

El Hidrógeno como vector energético ofrece el mayor beneficio en términos de la reducción de emisiones y la alta eficiencia energica puesto que:

- La energía química del hidrógeno puede ser convertida directamente en energía eléctrica, sin el paso intermedio de un ciclo térmico de potencia, lo que puede hacerlo más eficiente.

- El hidrogeno no implica dependencia de combustibles fósiles porque puede ser producido a partir de fuentes renovables o nucleares.

- Su combustión sólo produce agua, por lo que evita las emisiones contaminantes.

Los métodos alternativos de producción como los electrolíticos, fotoelectroquímicos, por gasificación de biomasa, biotecnológicos o termoquímicos no están completamente desarrollados, es decir, siguen realizándose investigaciones que permitan optimizar su implementación a escala industrial. Dentro del grupo de los métodos alternativos la electrólisis alcalina es uno de los el más desarrollado.

Dada la importancia de la electrólisis dentro del ámbito energético como método para la producción de Hidrógeno, se decidió demostrar las ecuaciones de Faraday para la electrólisis. Se propone construir un modelo a escala de electrodializador de agua para la producción de Hidrógeno, más exactamente para la producción de la mezcla Hidrogeno-Oxígeno en proporción 2:1 (estequeométrica), la cual es la proporción ideal para su combustión completa.

Este artículo pretende mostrar el desarrollo experimental de un prototipo para la producción de hidrogeno a partir de electrolisis, habiendo superado previamente dentro del semillero (SIVIT) las etapas de fundamentación y establecimiento del estado del arte, la bibliografía más relevante en la cual se basa este desarrollo se muestra en el numeral 6 referencias de este artículo.

CONTENIDO DEL ARTÍCULO

Objetivos

General

Construir un prototipo funcional para la producción de hidrógeno mediante electrólisis alcalina

Específicos

- Diseñar la celda, el electrolizador y los componentes auxiliares de seguridad. Construir el prototipo.

- Desarrollar la etapa de experimentación con el prototipo a fin de establecer parámetros de operación y el electrolito adecuado que optimice la producción.

- Evaluar las mejores configuraciones de trabajo del electrolizador y establecer las recomendaciones y posibles mejoras.

Desarrollo del proyecto

Inicialmente se realizó la debida revisión bibliográfica, que permitió definir las características básicas del proceso de electrolisis y de las celdas electrolíticas. Entre esas características se tiene que:

- Según el tipo de electrolito usado, la electrolisis puede ser alcalina, tipo PEM (membrana de intercambio protónico) o de óxido sólido. El electrolito más accesible es el alcalino y ésta es la técnica más madura y frecuente, puede producir Hidrogeno con una pureza nominal de 99.8%.

- Para una mayor eficiencia en el electrolizador se deben tener en cuenta los materiales de los electrodos. Para la electrólisis del

agua, el ánodo es el encargado de atraer el oxígeno. La eficiencia del ánodo puede ser disminuida debido a que se puede presentar corrosión, dificultando su trabajo. Es por esto que se utilizan materiales como óxidos tales como espinelas, ferritas, entre otros, aleaciones de níquel o cobalto, y compuestos orgánicos metálicos.

Por otro lado, el cátodo es el encargado de atraer el hidrógeno. Al igual que el ánodo, debe ser de materiales especiales para disminuir el sobrevoltaje que se presenta al reaccionar con el hidrógeno. El níquel y el cobalto son los elementos más comunes presentes en su constitución.

También es posible fabricar lo electrodos en acero inoxidable, para lo cual se requiere un proceso de pulido, limpieza electrolítica (para eliminación de grasa), neutralización y activación con Níquel. La limpieza electrolítica se realiza con una electrolisis con solución de jabón y KOH a 30 mA/cm por 3 minutos, la neutralización consiste en dejar los electrodos por 1 minuto en una solución de HCl al 30%, y la activación con Níquel se realiza con una electrolisis a una solución de $NiCl_2.6H_2O$ y H2SO4 por 2 minutos a 50 mA/cm2 usando como ánodo una placa de Níquel metálico.

Un factor a tener en cuenta con los electrodos es el calor que se produce en el proceso. Esto se debe a que el sistema no es 100% eficiente y, por lo tanto, parte de la energía se pierde en calor. Una ventaja de este hecho es que a mayor temperatura hay mayor conductividad, lo que puede beneficiar la eficiencia el sistema. A pesar de esto, se debe tener en cuenta que un sobrecalentamiento puede generar pérdida de eficiencia al aumentar la resistencia óhmica del electrolito; por lo tanto, puede ser necesaria la aplicación de un refrigerador.

- Se emplean separadores o diafragmas para evitar el contacto entre el hidrógeno y el oxígeno producidos en el cátodo y ánodo respectivamente sin obstruir el flujo de electrolito. Consiste en un material con una porosidad mayor al 50% a fin de mantener una resistencia eléctrica relativamente baja y con poros cuyo diámetro debe ser inferior al diámetro de las burbujas de gas más pequeñas (10 µm para el caso del hidrogeno).

- En cuanto a las características electroquímicas del electrolito, se puede decir que la aplicación de una tensión debe hacer circular una corriente a través de él. Ésta cualidad requiere que presente conductividad eléctrica. El electrolito empleado para la electrolisis alcalina generalmente es una disolución acuosa de una base fuerte como KOH o NaOH, las cuales presentan una gran conductividad eléctrica, no sufren descomposición química a los voltajes de operación y soporta las variaciones de pH que resultan de los cambios en la concentración protónica sobre los electrodos del proceso. La conductividad máxima de una disolución de KOH se da cuando está una concentración próxima al 28% en peso.

- Se requiere una aplicar una tensión continua a los electrodos de la celda. El cálculo de la tensión a aplicar se puede realizar como la sumatoria de los voltajes requeridos por los diferentes elementos constituyentes de la celda más el voltaje que requiere el desarrollo de la reacción (demanda eléctrica y demanda térmica), es decir:

$$V = Vt + Va + Vc + Vr$$

Donde:

Vt: Voltaje mínimo de descomposición teórico.

Va: Sobre-Voltaje del ánodo.

Vc: Sobre-Voltaje del cátodo.

Vr: Caída de tensión debido a la resistencia óhmica del electrolito.

- Se ha encontrado que el voltaje ideal de funcionamiento de una celda es alrededor de 1.48 V (determinado en condiciones estándar cuando se suministra a una celda una energía exactamente igual a la entalpía de disociación del agua), pero en la práctica generalmente se encuentra que funcionan con alrededor de 12 V.

En una segunda etapa se definieron las características básicas de la celda, entre éstas los materiales:

- Dado que la electrólisis alcalina es la tecnología más madura para la producción de hidrógeno y que incluso se ha implementado a escala industrial, así como que requiere un electrolito más accesible a los recursos del proyecto; se decidió construir una celda de electrólisis alcalina.

- Considerando que las celdas de electrólisis alcalina emplean como electrolito soluciones de bases fuertes, se determinó trabajar NaOH y KOH para la operación de la celda.

- Debido al costo de los materiales preferidos para los electrodos, se escogió realizarlos con acero inoxidable. Tampoco fue posible realizar el proceso de limpieza electrolítica, neutralización y activación con Níquel.

Por otra parte, aunque se conocen las ventajas de perforar las placas de los electrodos, no se disponía de la broca necesaria para hacer estas perforaciones; por lo tanto, no se realizó.

- Puesto que se encontró que usando electrodos con mayor área se favorece la circulación de corriente a través de la celda, se determinó emplear electrodos cuadrados. Así mismo, se planteó el uso de electrodos neutros entre los electrodos cargados positiva y negativamente ya que esto disminuye las caídas tensión favoreciendo la producción.

- Puesto que la celda y todos sus elementos quedan sumergidos en la solución básica del electrolito, se determinó usar acero inoxidable para todas las piezas, excepto cuando no conviniera un material conductor, en tal caso se podría escoger otro material según la necesidad o aislar con teflón.

- Adicionalmente, se decidió implementar elementos complementarios al funcionamiento y la seguridad de la celda. Entre estos se encuentran un burbujeador, que consiste en un recipiente cerrado que contiene agua, el cual recibe el gas producido por la celda y lo burbujea en el agua antes de que posteriormente salga por otra manguera; esto con el fin de prevenir que, durante una regresión de llama, la llama llegue a la celda generadora. Otro de los implementos usados fue un arrestallamas cuya función es prevenir el paso de una chispa o llama hacia el burbujeador, de tal modo que no se produzca algún accidente. El último elemento de este grupo es un soplete que se conecta al arrestallamas, ahí se produce y mantiene la llama; por lo tanto, es importante conocer el flujo de producción y la velocidad de combustión del hidrógeno para un diseño adecuado.

Resultados obtenidos

Seguidamente se realizó el dimensionamiento y los diseños del prototipo. Para esto se diseñó una celda que cumpliera de una manera efectiva con la electrólisis sin despreciar otros factores como la practicidad y los costos requeridos. Se usó un recipiente contenedor disponible y se dimensionaron los electrodos y demás elementos acordes a éste. El diseño se realizó en el Software Solidworks y se usó como guía para la construcción del prototipo.

Durante este proceso se planteó la importancia de alimentar el sistema con energía limpia; por lo que el sistema se diseñó con un panel solar que suministraría la energía requerida a los electrodos. La Figura 1 siguiente muestra una vista general del rendenrizado sistema diseñado.

Se observa un recipiente contenedor plástico y de forma cilíndrica, el cual contiene por dentro la solución electrolítica y los electrodos, con una tapa con tres agujeros: Uno para la salida de la manguera con el gas y otros dos para el puente que conecta a la fuente con los electrodos.

El diseño del conjunto de electrodos que conforman la celda, cuadrados y con los agujeros diseñados se muestra en la Figura 2. Se puede observar su distribución en el montaje de la celda: son 7 placas, 4 cargadas y 3 neutras.

Figura 1. Diseño renderizado de la celda electrolítica y sus elementos complementarios. Fuente: Autores

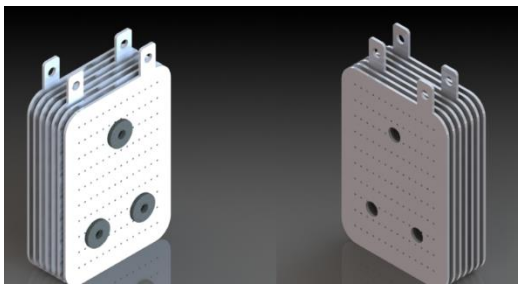

Figura 2. Diseño renderizado de los electrodos de la celda electrolítica. Fuente: Autores

El diseño de los elementos complementarios (burbujeador, arrestallamas y soplete) se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Diseño renderizado de los elementos complementarios. A la derecha el soplete y arrestallamas integrados, a la izquierda el burbujeador. Fuente: Autores

El arrestallamas se elaboró a partir de un tubo de una pulgada de diámetro con 10 centímetros de largo, con adaptaciones para manguera y se rellenó con arena y vidrio molido. El soplete fue realizado mediante la utilización de un quemador de estufa modificado en el torno para la implementación en el sistema y con piezas de acople.

Posteriormente, se inició una etapa de pruebas de funcionamiento y optimización.

Inicialmente se realizaron pruebas sólo para verificar el funcionamiento de la celda, la producción de hidrógeno, las fugas que se presentaban y el funcionamiento de los equipos de seguridad como el arrestallamas y el burbujeador. Durante la experimentación se confirmó la producción de Hidrógeno por medio de la explosión controlada de burbujas de detergente creadas con Hidrogeno. Una vez confirmada la producción de hidrógeno, se implementa el sistema completo hasta el soplete y se le aplica una chispa en él con el fin de crear una llama.

Las pruebas de optimización se iniciaron con una prueba de conductividad del electrolito, utilizando soluciones de KOH y NaOH a diferentes concentraciones y probando su conductividad. Se probaron 6 concentraciones: 5, 10, 15, 20, 25 y 30 %P/V, y se midió su conductividad (Ver Tablas 1 y 2). Luego, estos datos fueron graficados para encontrar las concentraciones óptimas de trabajo para cada electrolito a una temperatura promedio de 20°C. En estas gráficas se encontró que se obtiene más conductividad con el KOH en una solución del 20%, y en el caso del NaOH la solución óptima fue del 15% (Ver Figura 4 y Figura 5.)

Tabla 1. Conductividad NaOH

Electrolito 1: hidroxido de sodio	
Concentracion	**Conductividad [mS/cm]**
5	251
10	311
15	372
20	319
25	268
30	233

Tabla 2. Conductividad KOH

Electrolito 2: hidroxido de potasio	
Concentracion	**Conductividad [mS/cm]**
5	256
10	478
15	667
20	711
25	667
30	600

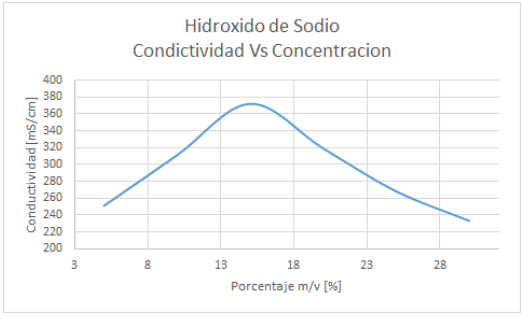

Figura 4. Gráfica Conductividad vs Concentración NaOH. Fuente: Autores

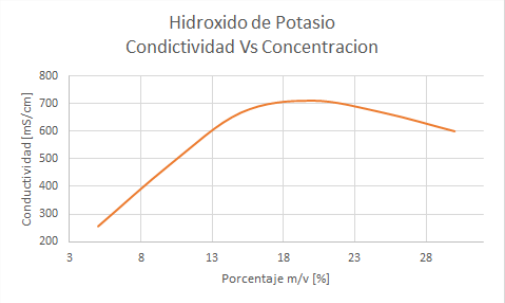

Figura 5. Gráfica Conductividad vs Concentración KOH. Fuente: Autores

Después se realizó una prueba de voltaje vs corriente, la prueba consiste en aplicar un voltaje a la fuente e incrementarlo gradualmente y tomar los datos de la corriente. Luego se tabulan y grafican para analizar la resistencia equivalente del sistema con un determinado electrolito, con esta prueba se obtuvo que el electrolito que en el sistema presentaba la menor resistencia equivalente fue la solución de Hidróxido de potasio. La resistencia equivalente del sistema se calculaba como el inverso de la pendiente de la relación de corriente versus voltaje que se observa en la Figura 7.

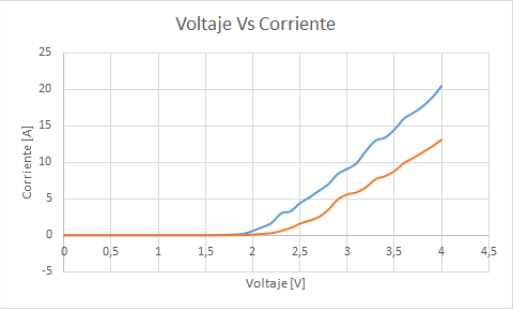

Figura 6. Voltaje aplicado versus corriente

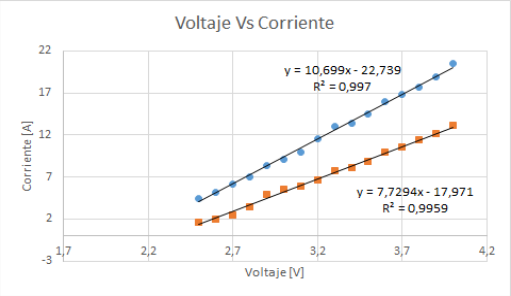

Figura 7. Voltaje aplicado versus corriente (rango con pendiente)

La siguiente fue una prueba de flujo, utilizando un flujómetro y la celda con el burbujeador. En esta prueba se aplicó un voltaje y se tomaron datos de corriente y tiempos del flujómetro, lo cual permitió encontrar el flujo volumétrico de producción a diferentes voltajes. Estos datos se registraron en la Tabla 3.

Tabla 3. Mediciones para flujo volumétrico

Voltaje [V]	Corriente [A]	Tiempo [s]			Tiempo promedio [s]	Escala [mL]	Flujo Volumetrico [mL/min]
2,0	1,2	4	4,1	4	4,03	1	14,88
2,3	3,0	14,5	14,4	14,6	14,50	9	37,24
2,6	5,9	7,4	7,5	7,3	7,40	9	72,97
2,9	9,0	4,7	4,9	4,9	4,83	9	111,72
3,2	12,5	3,4	3,4	3,4	3,40	9	158,82
3,5	15,2	27,2	27,4	27,1	27,23	90	198,29
3,8	18,6	21,8	21,8	21,4	21,67	90	249,23

El gas producido se encuentra a presión ambiental, por lo tanto su comportamiento puede ser predicho mediante la ecuación del gas ideal, para este cálculo se tomarán ciertas consideraciones, la primera es que la fracción molar es equivalente a la fracción volumétrica, por lo tanto tomando como base la ecuación de electrólisis, se puede inferir que del volumen total, dos terceras partes son de hidrógeno, y el restante de oxígeno, de igual manera se debe tener claro que la ecuación de gas ideal en este caso específico nos estará relacionando el cambio que sufre el volumen con respecto al tiempo, con el cambio de la masa con respecto al tiempo, debido a que se estarán manejando flujos volumétricos y másicos.

Tabla 4. Cálculo de flujos volumétricos y másicos

Flujo Volumetrico [L/min]	Flujo Volumetrico H2 [L/min]	Flujo Volumetrico O2 [L/min]	Flujo Masico H2 [g/min]	Flujo Masico O2 [g/min]
0,0149	0,0099	0,0050	0,0007	0,0057
0,0372	0,0248	0,0124	0,0018	0,0144
0,0730	0,0486	0,0243	0,0035	0,0282
0,1117	0,0745	0,0372	0,0054	0,0431
0,1588	0,1059	0,0529	0,0077	0,0613
0,1983	0,1322	0,0661	0,0096	0,0766
0,2492	0,1662	0,0831	0,0121	0,0962

Condiciones ambiental	
Temperatura [°C]	28,0
Presion [mmHg]	679,7

Gas ideal	
Presion [atm]	0,8943
Temperatura [k]	295,15
R [atm*L/(mol*k)]	0,08205
Entalpia [kJ/mol]	-286

Seguido a esto con ayuda de las leyes de Faraday, y sabiendo que la reacción tiene una valencia o electrones netos intercambiados de 2 y un peso molecular de 2.016 g/mol H2 se puede obtener la masa en un instante de tiempo esperada en el electrodo.

Tabla 5. Comparación del flujo másico experimental y teórico según las Leyes de Faraday de electrolisis

Flujo Masico H2 [g/min]	Flujo Masico esperado H2 [g/min]	% Error
0,0007	0,0008	1,82
0,0018	0,0019	1,69
0,0036	0,0037	2,05
0,0055	0,0056	1,69
0,0079	0,0078	0,62
0,0098	0,0095	3,31
0,0124	0,0117	6,12

El porcentaje de error demuestra que el principio se demostró satisfactoriamente, y que en el electrodo se formó la masa esperada. A continuación, se mostrará la gráfica de corriente versus producción de hidrógeno, para demostrar la primera ley la cual dice que a medida que la corriente aumenta es mayor la cantidad de hidrogeno que se produce en el electrodo.

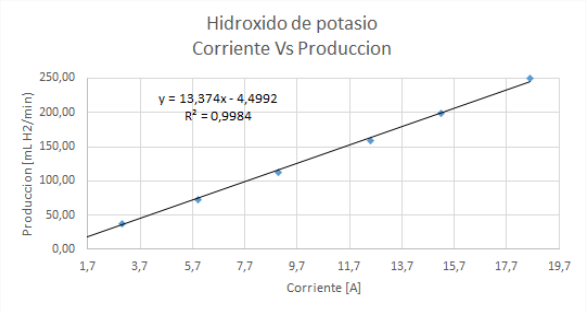

Figura 8. Gráfica de corriente versus Producción con KOH

Se calculó la potencia suministrada al sistema, y con los flujos másicos y la entalpía de combustión del hidrogeno se calculó la potencia teórica en la producción de hidrógeno, y se obtuvo:

Tabla 6. Recuperación de potencia

Potencia Teorica obtenida	Potencia suministrada	% Recuperacion
1,71	2,40	71,29
4,28	6,90	62,08
8,39	15,34	54,71
12,85	26,10	49,23
18,27	40,00	45,67
22,81	53,20	42,87
28,67	70,68	40,56

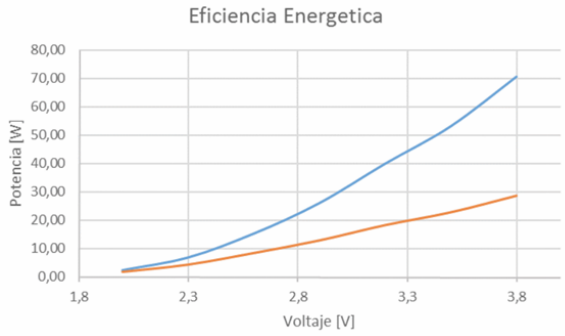

Figura 9. Potencia Vs voltaje

La línea azul representa la potencia suministrada, la línea roja representa la potencia teórica obtenida o almacenada.

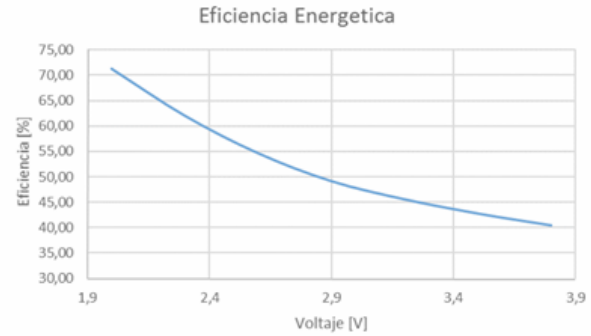

Figura 10. Eficiencia de almacenamiento Vs voltaje

Discusión de resultados

Como resultado de las etapas de revisión y diseño se obtuvo un prototipo funcional de una celda de electrolisis alcalina que se operó de forma óptima con solución de KOH al 20% como electrolito, el cual se encontró que presenta mayor conductividad que las soluciones de NaOH y representa una menor resistencia equivalente en el sistema según los análisis de corriente contra tensión.

Se verificó cualitativamente que en los productos obtenidos se encontraba hidrogeno, mediante la explosión controlada de burbujas de detergente.

La resistencia equivalente del sistema construido a esas condiciones resultó ser 0,093 Ω. Esta es una resistencia baja, que puede explicarse por el hecho de que la presencia del electrolito KOH eleva la conductividad del agua, lo que implica que la resistencia disminuya.

Haciendo uso del modelo de gas ideal, las mediciones de los flujos de producción y considerando equivalentes las relaciones molares estequiometrias y las volumétricas, se pudo determinar el flujo másico de los gases producidos. Estas consideraciones son posibles debido a que tanto el hidrógeno como el Oxígeno pueden considerarse gases ideales a las condiciones ambientales, en las que sale el gas del sistema.

Se pudo observar que a medida que aumenta el voltaje, la eficiencia en la transformación de energía disminuye, siendo una característica importante a la hora de establecer las condiciones de trabajo para un electrolizador especifico, ya que por un lado se encuentra la eficiencia de transformación de energía, pero por el otro, se debe asegurar un flujo de producción tal, que dependiendo del diseño del soplete, permita obtener velocidades de salida mayores o iguales a la velocidad de combustión del hidrogeno, si se desea que esta funcione.

CONCLUSIONES

Se encontró que la concentración de la solución de hidróxido de potasio más óptima para el proceso es de 20% y la del hidróxido de sodio es del 15% para una temperatura promedio de 20°C.

Se encontró que la solución que en el sistema ofrece la menor resistencia equivalente es con la solución de hidróxido de potasio al 20%.

Se comprobó que hay una relación proporcional entre la cantidad de corriente suministrada al sistema y la cantidad de hidrógeno producido según lo descrito por la primera ley de Faraday de la electrólisis.

Se comprobó que la cantidad de hidrógeno producido es modelado por la ecuación de la primera y segunda ley de Faraday de la electrólisis donde indica que la masa producida de hidrógeno es igual a la carga suministrada por la masa molecular del hidrógeno, dividido por el producto entre los electrones de transferencia de la reacción y la constante de Faraday.

Se desarrollaron pruebas de funcionamiento y operación con el prototipo construido, encontrándose que la hermeticidad en los recipientes es un aspecto de vital importancia para el correcto funcionamiento de estas celdas.

Entre las desventajas del trabajo con electrolitos alcalinos, están los peligros asociados al manejo de las bases KOH y NaOH, las cuales son altamente corrosivas y requieren de un manejo controlado y del uso de elementos de protección personal.

RECOMENDACIONES

Se recomienda utilizar electrodos con materiales adecuados, o en su defecto utilizar acero inoxidable con previo tratamiento y

activación del mismo, se puede realizar un estudio para comprobar y verificar sus diferencias operacionales

Se recomienda realizar estudio de las placas del electrodo con y sin agujeros, para evaluar el impacto del gas producido en el sistema como atenuante sobre el voltaje del mismo.

Para aumentar la seguridad del proceso se recomienda hacer separación de la producción por medio de separadores o diafragmas y realizar almacenamiento individual para los productos.

Se recomienda realizar estudios de geometrías y disposición de electrodos de tal forma que el flujo de densidad de corriente sea el mayor posible

IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Nombre del Semillero	Semillero De Investigación En Vigilancia Tecnológica De Eficiencia Energética Y Fuentes No-Convencionales (SIVIT)
Tutor del Proyecto	Cesar Yobany Acevedo Arenas
Grupo de Investigación	Recursos, Energía y Sostenibilidad (GIRES)
Línea de Investigación	Fuentes alternativas de energia
Fecha de Presentación	2015-11-12

REFERENCIAS

[1] Bowen C. E. (1942). The Production of Hydrogen and Oxygen by the Electrolysis of Water. IEEE. 2-4.

[2] Velásquez J. D., Quiceno J. F. (2013). Proyecto de grado: Diseño de un Sistema de Generación de Hidrógeno por Electrólisis. Consultado el día 26 de septiembre de 2015, disponible en:

http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/3655/1/62143V434.pdf

[3] Fechner, C. (Director). (2002). The Substance for the future - Energy from Hydrogen [DVD]. Alemania: Focus-Film.

[4] Aguinaga, A. (2009). Diseño y construcción de un prototipo de planta dispensadora de hidrógeno doméstica, con electrolizador híbrido, solar y eléctrico. Revista Politécnica. Vol 30 (1).

[5] Rosa Iglesias, M. (2003). Tesis Doctoral: Estudio teórico y experimental sobre la producción de hidrógeno electrolítico a partir de energía solar fotovoltaica: diseño, operación y evaluación de una planta piloto de producción de hidrógeno electrolítico de 1,2 NM^3 H2/h. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. Sevilla.

[6] Linares Hurtado, J., Moratilla Soria, B. (2007). El hidrógeno y la energía. Madrid, España: Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI

[7] Aguilar Jaramillo, E. (2015). Tesis de grado: Modelamiento y simulación de la producción de hidrógeno en un electrolizador a partir de vapor sobrecalentado de agua. Escuela Politécnica Nacional. Quito.

[8] Valle Hernández, J., López Pérez, P. (ND). Estimación de la Eficiencia asociada a la Producción de Hidrógeno con Energía Solar Concentrada. Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica. Vol 1.

[9] Gutiérrez, M., Rojas, N., Moreno, J. (ND). Evaluación de electrocatalizadores para la producción de hidrógeno a partir de electrólisis de agua. ***, Bogotá DC.

[10] Fierro, J., Gómez, L., Peña, M. (ND). El hidrógeno: un vector energético no contaminante para automoción. Instituto de Catálisis y Petroleoquímica, Madrid.

[11] Montes, M., Abánades, A., Martínez, J. (ND). Producción de hidrógeno a partir de energía solar. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Madrid .

[12] Botas, J., Calles, J., Dufour, J., San Miguel, G. (). La economía del hidrógeno – una visión global sobre la revolución energética del siglo XXI. Universidad Rey Juan Carlos, Móstoles.

[13] Holgado Secas, H. (2012). Proyecto de grado: Estudio, diseño y construcción de un generador de hidrógeno por electrólisis. Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona.

[14] Posso, F. (2007). Development in Venezuela of energy system based in the hydrogen. I: Production of electrolytic hydrogen. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia. Vol 30 (3).

[15] Escapa González, A. (2011). Producción de hidrógeno simultánea a la depuración de aguas residuales por medio de electrolisis biocatalítica. Universidad de León, León.

[16] Peláez, E., Valdés, M., González, E. (2005). Características cinéticas de la reacción de desprendimiento de hidrógeno en el electrodo de aleación Ni-Fe. Revista CENIC Ciencias Químicas. Vol 36 (2).

[17] Herraiz Cardona, I. (2012). Tesis Doctoral: Desarrollo de nuevos materiales de electrodo para la obtención de Hidrógeno a partir de la electrólisis alcalina del agua. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

[18] Pineda Erice, D. (2009). Memoria de grado: Evaluación técnico económica de una planta de producción de hidrógeno mediante electrólisis de agua utilizando energía eléctrica producida con celdas fotovoltaicas de alta eficiencia. Universidad de Chile, Santiago de Chile

.