

Diseño y evaluación experimental de un sistema de electrólisis alcalina para la generación de hidrógeno.

Osmar Josué Aguilera Flores¹
Arath Joshua Sánchez Gonzales²
Juan Alberto Betanco Maradiaga³

1. Resumen

La presente investigación muestra el diseño y evaluación de un sistema electrolisis alcalina para la generación de hidrógeno. A modo de contextualización, se realizó una comparación documental de las tecnologías actuales de producción de hidrógeno, destacándose las tecnologías AEC, PEM y SOEC, siendo la tecnología AEC la más eficiente actualmente. Para la parte experimental, se determinaron los materiales a usar y sus dimensiones y se construyó un prototipo basado en la tecnología AEC para la realización de pruebas manipulando las variables pertinentes. Finalmente se realizó una evaluación de los parámetros que influyen en la electrólisis de la celda, determinándose correlaciones (Pearson) entre las principales variables y análisis causa-efecto, mediante el ANOVA y la prueba LSD de Fisher. Mediante el ANACORR se encontraron fuertes correlaciones entre la corriente y el caudal (0.97), entre temperatura y corriente (0.97) y entre temperatura y caudal (0.62). Mediante el ANOVA, ANCOVA y la prueba LSD de Fisher se pudieron determinar los efectos de las diferentes disoluciones usadas como electrolito en las variables respuesta de interés, especialmente en la variable eficiencia. De estas pruebas se permitió deducir que se obtiene una mayor eficiencia empleando una disolución de hidróxido de sodio al 15% masa-volumen. Mediante el análisis de regresión no lineal se realizó ajuste de curvas tensión – corriente, el resultado fue que para todos los tratamientos los datos se ajustan a un modelo exponencial con un alto coeficiente de determinación R². Gracias al análisis de regresión lineal para caudal – corriente y corriente – temperatura se pudieron obtener los parámetros de la ecuación de la recta de regresión para cada tratamiento con un buen ajuste. Mediante el análisis termodinámico y eléctrico de los datos obtenidos con la experimentación se determinó que la eficiencia máxima de la electrólisis fue del 63%.

Palabras clave: Electrólisis alcalina, hidrógeno, electrolito, energías renovables

¹ Egresado de la carrera Ingeniería en Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua – FAREM, Estelí. Correo: osmarjosue75@gmail.com

² Egresado de la carrera Ingeniería en Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua – FAREM, Estelí. Correo: arathjsgon99@gmail.com

³ Docente y coordinador de Investigación, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua – FAREM, Estelí. Correo: betancoja@yahoo.com

Design and experimental evaluation of an alkaline electrolysis system for hydrogen generation.

Abstract

This research shows the design and evaluation of an alkaline electrolysis system for hydrogen generation. As contextualization, a documentary comparison of the current technologies of hydrogen production by electrolysis was carried out and it was found that among the AEC, PEM and SOEC technologies, the AEC technology is the most efficient at present. For the experimental part, the materials to be used and their dimensions were determined and a prototype based on AEC technology was built for testing by manipulating the relevant variables. Finally, an evaluation of the parameters that influence cell electrolysis was carried out, determining correlations (Pearson) between the main variables and cause-effect analysis, by means of ANOVA and Fisher's LSD test. ANACORR found strong correlations between current and flow rate (0.97), between temperature and current (0.97) and between temperature and flow rate (0.62). By means of ANOVA, ANCOVA and Fisher's LSD test it was possible to determine the effects of the different solutions used as electrolyte on the response variables of interest, especially on the efficiency variable. From these tests it was possible to deduce that a higher efficiency is obtained using a 15% mass-volume sodium hydroxide solution. The non-linear regression analysis was used to adjust the voltage-current curves; the result was that for all treatments the data fit an exponential model with a high coefficient of determination R^2 . Thanks to the linear regression analysis for flow - current and current - temperature, it was possible to obtain the parameters of the regression line equation for each treatment with a good fit. Through the thermodynamic and electrical analysis of the data obtained from the experiment, it was determined that the maximum electrolysis efficiency was 63%.

Keywords: Alkaline electrolysis, hydrogen, electrolyte, renewable energy

2. Introducción

Es necesario establecer cambios necesarios en las matrices productivas para poder hacer frente al cambio climático que se vive actualmente es necesario comprender que la emisión de gases de efecto invernadero es el principal factor que contribuye a incrementar los efectos del cambio climático. La producción de energía a partir de combustibles fósiles y quema de carbón genera grandes cantidades de monóxido y dióxido de carbono.

Una de las líneas de interés para las energías renovables actualmente es el aprovechamiento del hidrógeno verde. El hidrógeno puede ser empleado en centrales de energías renovables como un medio de almacenamiento cuando la oferta sobrepase la demanda. Mediante el uso de electrolizadores, la energía que no se está utilizando puede usarse para generar hidrógeno a partir de agua, este puede ser llevado a tanques de almacenamiento y posteriormente usarse cuando se requiera mediante pilas de hidrógeno, las cuales realizan el proceso inverso a la electrólisis generando energía eléctrica y vapor de agua a partir de hidrógeno y oxígeno.

El hidrógeno es un elemento gaseoso reactivo, insípido e incoloro. Además, es un gas diatómico altamente inflamable; es el más ligero portador de energía y el más abundante en el universo (75 %) y es considerado como una solución futura para reemplazar a los combustibles convencionales ya que, al ser quemado, o al reaccionar con el oxígeno genera como subproducto solamente agua.

Quezada Romero, Torres Gualan (2014) en su trabajo de tesis de grado realizado en Cuenca, Ecuador, construyeron e implementaron un generador de HHO de celda seca en tres modelos distintos de vehículos concluyendo que al adicionar gas HHO a la mezcla aire-combustible del motor de combustión se pueden reducir las emisiones de gases contaminantes.

El presente trabajo investigativo, tiene por objetivo recoger los elementos más importantes para indagar en la construcción e identificar los parámetros de funcionamiento de un sistema de electrolisis alcalina, lo cual significa un punto de partida para la investigación del hidrógeno verde en la casa de estudios UNAN Managua.

Esta investigación beneficia a estudiantes, profesores e investigadores, debido a que ayuda al aprendizaje de tecnologías emergentes y en crecimiento y da pautas para el diseño de electrolizadores, lo cual promueve la innovación. Aporta un alto valor teórico debido a que explica los fundamentos físico-químicos de la electrólisis, ayuda a conocer en mayor medida el comportamiento de las variables involucradas en este proceso. Además de aportar una utilidad metodológica puesto que facilita la experimentación con este tipo de tecnologías y muestra un procedimiento para la recolección y análisis de datos, el cual puede ser empleado como referencia.

3. Materiales y métodos.

Según el enfoque filosófico de la investigación el estudio es cuantitativo, según el nivel de profundidad el estudio se define en tres niveles: Exploratorio, descriptivo y correlacional; de acuerdo al método de investigación el estudio es experimental, Según el tiempo de ocurrencia de los hechos y registro de información el estudio es prospectivo, y según el periodo y secuencia es un estudio transversal.

El proceso de recopilación de información se realizó a través de una revisión de bibliografía disponible. Se acudió a fuentes como artículos de revistas, libros, trabajos de investigación, material multimedia, páginas web, documentos de sitios web entre otros. Luego de la revisión bibliográfica se realizó un resumen de los aspectos más importantes referentes al tema y se concluyó en una ficha comparativa de las diferentes tecnologías.

Se realizó una valoración de las tecnologías disponibles y se seleccionó la opción más apropiada en cuanto a la disponibilidad de recursos. Seguidamente se determinaron las dimensiones del prototipo y los materiales a utilizar.

Para la experimentación, el prototipo fue provisto de diversos equipos de medición, a saber, un multímetro y un termómetro electrónico, los cuales permitieron la medición de la corriente y la tensión parcial de placas, la tensión total y la temperatura. En adición, se dispuso de un flujómetro para la medición del caudal.

Se realizaron diversas pruebas manipulando la tensión, las sustancias de la disolución, y la concentración de esta, mientras se midieron simultáneamente las demás variables.

Se modificaron las sustancias de la disolución realizando pruebas con agua del grifo y disoluciones de hidróxido de sodio (NaOH) a concentraciones de 10%, 15% y 20%.

La primera prueba se realizó empleando solamente agua, mediante el uso de una fuente DC de laboratorio se realizó un barrido de la tensión desde 2 V a 20 V con incrementos de 2V.

Las siguientes tres pruebas se realizaron empleando las disoluciones de diferentes concentraciones de hidróxido de sodio. Se realizó un barrido de la tensión desde 1V a 10V, con incrementos de 1 V.

Para estudiar la relación entre la temperatura y la corriente, se realizó una prueba estableciendo una tensión fija de 9V empleando como electrolito NaOH al 20%, se midieron estas variables cada 10 segundos hasta que se lograra una estabilización.

4. Análisis y discusión de resultados

A continuación, se detallan los principales resultados obtenidos de la aplicación de técnicas de recolección de datos

Comparación teórica de las tecnologías de producción de hidrógeno por electrólisis

Tabla 1. Tecnologías de producción de hidrogeno por electrolisis

Tecnología	AEC ⁴	PEM ⁵	SOEC ⁶
Electrolito	Solución de KOH	Membrana polimérica	Óxido solido
Portador de carga	OH	H+	O ²⁻
Densidad de la corriente (A/cm ²)	0.5	2.0	2.0
Voltaje(V)	1.75-2.4 V	1.6-2.0 V	1.2- 1.3 V
Temperatura de operación (°C)	60-80	50-80	650-1000
Presión de trabajo	1-30	30-80	1
Eficiencia eléctrica (kWh/Nm ³ de h ₂ producido)	4.3-5.5	4.5-5.4	3.2-3.7
Eficiencia eléctrica (% , PCI ⁷)	63-70	56-60	40

La tecnología AEC, es la que posee una mayor madurez como tecnología, seguido por un crecimiento de la tecnología PEM, que con unos rendimientos parecidos pero una mayor flexibilidad para adaptar su operación a fuentes renovables, y un menor volumen por la misma capacidad, está siendo una de las tecnologías más probadas en proyectos de demostración, tanto en aplicaciones industriales como de movilidad

⁴ Celda de electrolisis alcalina

⁵ Electrolito de membrana polimérica

⁶ Celda de electrolisis de óxido sólido

⁷ Poder calorífico inferior

Tabla 2. Comparación de electrolizador teórico vs experimental de este estudio

Tecnología AEC	Experimental	Teórico
Electrolito	NaOH	KOH
Portador de carga	OH	OH
Densidad de corriente (A/cm ²)	0.1	0.5
Voltaje (V)	0.25-2.56	1.75-2.4V
Temperatura de operación (°C)	40	60-80
Presión de trabajo	1	1-30
Eficiencia eléctrica (PCS)	63%	63-70

En la tabla 2 se encuentra una comparación entre los datos teóricos y los datos experimentales obtenidos. El procedimiento de obtención de los parámetros se realizó mediante la experimentación cuyos resultados se muestran más adelante.

Descripción funcional y constructiva del sistema de electrólisis alcalina

Electrolizador

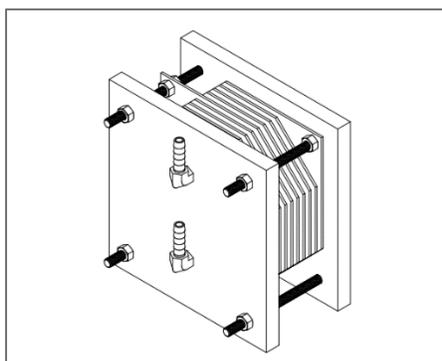


Figura 1. Electrolizador

El electrolizador o la celda electrolítica (Figura 1) es el componente fundamental del sistema, la celda consiste en un conjunto de 9 placas de acero 316L de 1.8mm de espesor dispuestas de forma intercalada con separadores de caucho. De estas 9 placas se diferencian 3 placas polares y 6 placas neutras. Estas placas constan de dos orificios ubicados verticalmente uno del otro, el de la parte inferior para la entrada de agua con electrolito y el superior para la salida de gas. Las placas polares son las encargadas de recibir la tensión de la fuente de alimentación y las placas neutras permiten que la tensión de entrada se divida entre ellas.

Reservorio

El reservorio (Figura 2) está hecho de Tubo PVC de 3 pulgadas, tiene un adaptador y una tapa de alta presión, cerrado herméticamente para evitar las fugas de gas, y del electrolito, este tiene la función es mantener un balance entre consumo y generación, mantiene un flujo

constante del fluido electrolítico haciendo que la producción de gas sea ininterrumpida. Además, permite una última protección en caso de retroceso de llama al utilizarse el gas para producir calor.

Burbujeador

El burbujeador (Figura 3) está fabricado de tubo PVC de 2 pulgadas, consta de dos tapones y un adaptador, es un dispositivo de protección y purificación del gas, cerrado de manera hermética para evitar las fugas, funciona como una válvula antirretorno de la llama, evitando que en el caso de un fallo los demás dispositivos no se vean afectados. Además, el burbujeador tiene la función de purificar el gas de salida atrapando los vapores de hidróxido de sodio que puedan salir del reservorio.

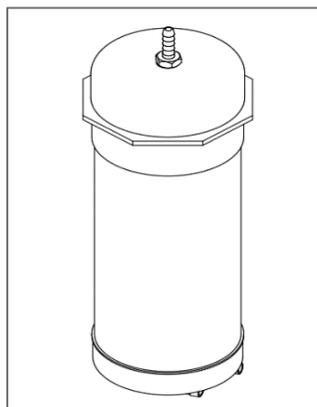


Figura 2. Reservorio

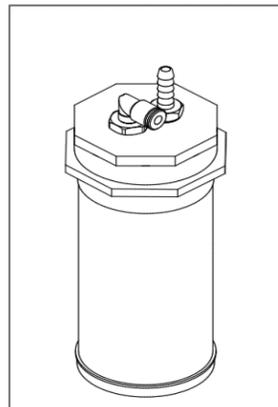


Figura 3. Burbujeador

Configuración del sistema

La celda de electrólisis está conectada a una fuente de corriente continua, la cual proporciona la energía necesaria para realizar la electrólisis. El agua con electrolito que entra hacia el electrolizador proviene del reservorio y el gas que sale pasa por este mismo, permitiendo que a medida que salga el gas, se cree un vacío del lado de la salida de agua del reservorio y este alimente constantemente a la celda, mientras el gas sube y se acumula para pasar con una mayor presión a su siguiente etapa.

El gas que sale del reservorio es dirigido a la entrada del burbujeador, el cual purifica el gas y brinda una protección contra retroceso de llama. Este está lleno de agua hasta cierto nivel con una manguera que se introduce hasta la parte final de su base para que el gas pase primero por el agua y si existe un retroceso de llama y se dé una explosión sea contenida en el volumen que el gas ocupa en el burbujeador. En la (Figura 4) se muestra la configuración del sistema descrita.

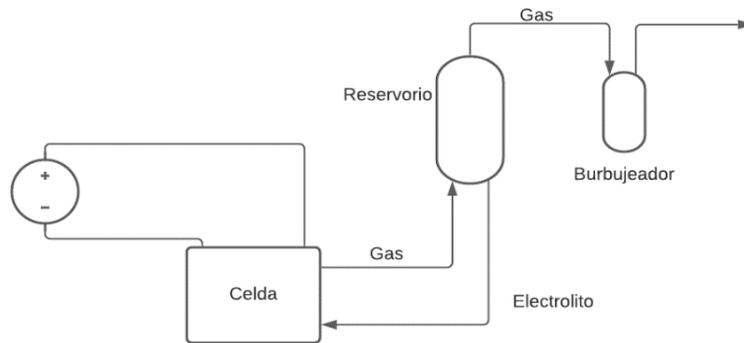


Figura 4. Configuración del sistema

Relación entre las variables físico químicas que intervienen en el proceso de la electrolysis

Curvas de polarización

Mediante la medición simultánea de la corriente y la tensión y el registro de datos se obtuvieron las curvas de polarización de la celda para cada sustancia y concentración empleada.

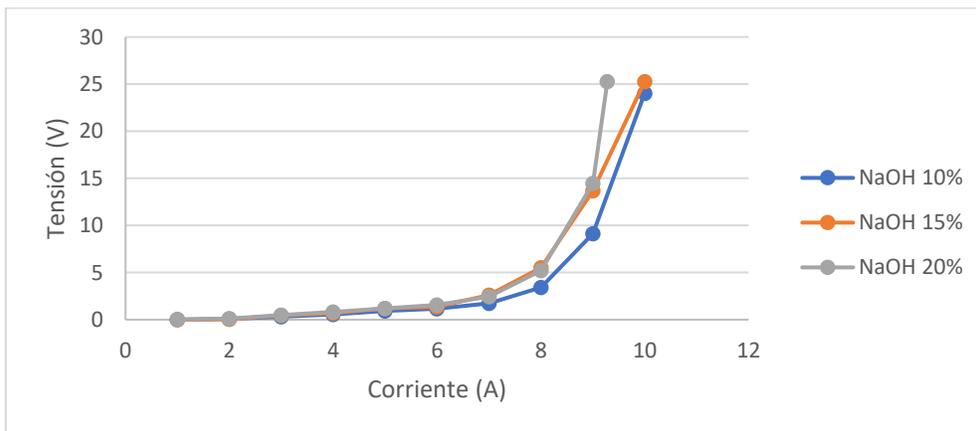


Figura 5. Curva de polarización con NaOH a distintas concentraciones

La figura 5 revela que, mediante la utilización de un electrolito, como en este caso, hidróxido de sodio a diversas concentraciones masa-volumen, se obtiene una corriente que aumenta exponencialmente a medida que el voltaje aumenta, lo cual acelera el proceso de electrolysis y aumenta la producción de gas. Puede observarse que para tensiones del orden de los 10 V se pueden obtener corrientes de hasta 25 A.

Se puede apreciar que estas curvas presentan pequeñas diferencias en cuanto al crecimiento exponencial de la corriente respecto a la tensión. En cuanto a la disolución al 10% es la que más lento crece exponencialmente, mientras que la disolución al 20% es la que crece con mayor rapidez.

Serie temporal temperatura-corriente

Un dato de relevancia encontrado mediante la experimentación fue el aumento de la corriente junto a un aumento de la temperatura en función del tiempo de operación de la celda, ambas variables aumentaron linealmente, hasta lograr una estabilización alrededor de los 1000 segundos. Es importante considerar esto ya que implica que la celda pasa por un período transitorio para alcanzar un régimen permanente tras cierto tiempo, al momento que la temperatura y la corriente de operación se estabilizan.

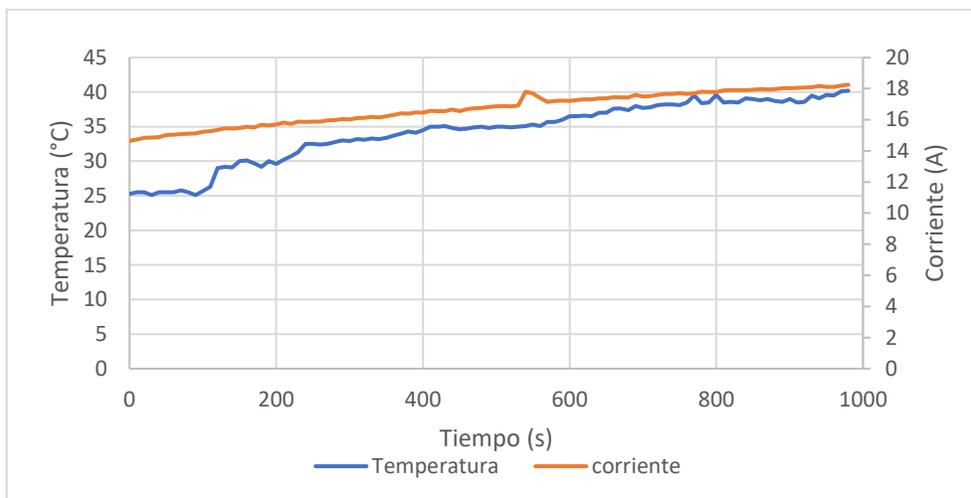


Figura 6. Serie temporal corriente y temperatura

Correlaciones

Tabla 3 Correlación de Pearson Corriente Caudal

Variable(1)	Variable(2)	n	Pearson	p-valor
Corriente	Caudal	40	0.97	<0.0001

Esta relación concuerda con la primera de las leyes de las electrólisis establecidas por Faraday, la cual dice la masa de una sustancia liberada en la electrólisis (en este caso, cantidad de gas) es directamente proporcional a la cantidad de electricidad que ha pasado a través del electrólito (corriente) (Sancler, 2022).

Tabla 4. Correlación de Pearson Corriente Temperatura

Variable(1)	Variable(2)	n	Pearson	p-valor
Temperatura	Corriente	99	0.97	<0.0001

Esto quiere decir que la temperatura es un factor importante en la obtención de hidrógeno, lo cual concuerda con el modelo planteado por Clemente Jul, et al. (2018), en el cual se determina que a medida que aumenta la temperatura, es necesario menor voltaje eléctrico,

ya que aumenta la conductividad del electrolito, el voltaje reversible disminuye y se favorece la electrólisis.

Tabla 5. Correlación de Pearson Potencia Caudal

Variable(1)	Variable(2)	n	Pearson	p-valor
Potencia	Caudal	40	0.96	<0.0001

Esta correlación indica que la producción de gas está estrechamente relacionada con la potencia eléctrica consumida por electrolizador.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..3. Analisis de ANCOVA para la variable corriente, con covariable tensión

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	Coef
Modelo	604.31	4	151.08	4.06	0.0083	
Tratamiento	487.06	3	162.35	4.37	0.0103	
Tensión	435.85	1	435.85	11.72	0.0016	0.87
Error	1301.59	35	37.19			
Total	1905.90	39				

Análisis de varianza

El análisis de la covarianza para evaluar los efectos de los distintos tratamientos sobre la variable corriente demostró que existe un efecto significativo de los distintos tratamientos (agua, NaOH 10%, NaOH 15%, NaOH, 20%) sobre la variable respuesta *corriente*, lo cual se evidencia con un p-valor de 0.0083 el cual es mayor que el nivel crítico de comparación ($p = 0.05$).

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..4. Test: LSD Fisher corriente, covariable tensión Alfa=0.05 DMS=5.53652

Tratamiento	Mediasn	E.E.	
NaOH 20%	6.41 10	1.96	A
NaOH 15%	6.27 10	1.96	A
NaOH 10%	5.32 10	1.96	A
H2O	-3.47 10	2.20	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

La prueba LSD de Fisher para las covarianzas refleja que existe diferencia entre dos grupos, teniendo el hidróxido de sodio al 15% 20% y 10% la categoría A con medias de 6.41, 2.27 y

5.32 respectivamente, y el agua solo la categoría B con una media de -3.47, esto quiere decir que se obtienen mayores corrientes con soluciones de hidróxido de sodio, tomando en cuenta la tensión como covariable.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..5. Análisis de covarianza para la variable caudal, covariable tensión

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	Coef
Modelo	2.34	4	0.59	3.09	0.0280	
Tratamiento	1.85	3	0.62	3.26	0.0331	
Tensión	1.69	1	1.69	8.89	0.0052	0.05
Error	6.64	35	0.19			
Total	8.99	39				

El análisis de la varianza para evaluar los efectos de los distintos tratamientos sobre la variable caudal demostró que existe un efecto significativo de los distintos tratamientos sobre la variable respuesta *caudal*, lo cual se evidencia con un p-valor de 0.028 el cual es mayor que el nivel crítico de comparación $p = 0.05$.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..6. Test:LSD Fisher Caudal Alfa=0.05 DMS=0.39551

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
NaOH 15%	0.40	10	0.14	A
NaOH 20%	0.38	10	0.14	A
NaOH 10%	0.26	10	0.14	A
H2O	-0.23	10	0.16	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

La prueba LSD de Fisher para la variable caudal, refleja que existe diferencia entre dos grupos, teniendo el hidróxido de sodio al 15% 20% y 10% la categoría A con medias de 0.40, 0.38 y 0.26 respectivamente, y el agua sola la categoría B con una media de -0.23 esto indica que se obtienen mayores caudales con soluciones de hidróxido de sodio, tomando en cuenta la tensión como covariable.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..7. Análisis de la varianza para la variable eficiencia

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.54	3	0.18	10.75	0.0003
Tratamiento	0.54	3	0.18	10.75	0.0003
Error	0.30	18	0.02		

Total 0.84 21

El análisis de la varianza para evaluar los efectos de los distintos tratamientos sobre la variable eficiencia demostró que existe una respuesta estadística significativa de los distintos tratamientos sobre la variable respuesta *eficiencia*, lo cual se evidencia con un p-valor de 0.0003 el cual es menor que el nivel crítico de comparación $p = 0.05$.

Ya que el análisis de varianza mostró que, si existe una relación de causalidad entre los tratamientos y la eficiencia de la celda, y que hay diferencias significativas entre al menos uno de los tratamientos y los demás, se procedió a realizar la prueba de Fisher para la variable *eficiencia*.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..8. Test:LSD Fisher para eficiencia Alfa=0.05 DMS=0.17716

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
NaOH 15%	0.39	4	0.06	A
NaOH 20 %	0.27	4	0.06	A
NaOH 10%	0.23	4	0.06	A
H2O	0.00	10	0.04	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

La prueba LSD de Fisher para la variable eficiencia refleja que existe diferencia entre dos grupos, teniendo el hidróxido de sodio al 15% 20% y 10% la categoría A con medias de 0.39, 0.27 y 0.23, respectivamente, y el agua sola la categoría B con una media de 0, esto indica que entre utilizar puramente agua y utilizar disolución de hidróxido de sodio existen diferencias significativas en la eficiencia obtenida de la celda, obteniéndose medias de eficiencia mayores con disoluciones de NaOH.

Esto concuerda especialmente con los resultados esperados debido a que mediante la observación se constató que al utilizar solamente agua en la electrólisis no se producía gas o se producían muy pocas burbujas debido a la baja conductividad del agua pura.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..9. Análisis de la varianza para la variable temperatura

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	387.75	3	129.25	23.76	<0.0001
Tratamiento	387.75	3	129.25	23.76	<0.0001
Error	195.83	36	5.44		
Total	583.58	39			

El análisis de la varianza para evaluar los efectos de los distintos tratamientos sobre la variable respuesta temperatura demostró que existe una respuesta estadística significativa de los distintos tratamientos sobre la variable respuesta *temperatura*, lo cual se evidencia con un p-valor de 0.0001 el cual es menor que el nivel crítico de comparación $p = 0.05$.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..10. Test:LSD Fisher Temperatura; Alfa=0.05 DMS=2.11541

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
NaOH 20 %	30.19	10	0.74	A
NaOH 10%	28.66	10	0.74	A
NaOH 15%	25.89	10	0.74	B
H2O	22.00	10	0.74	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

El test LSD de Fisher para la variable dependiente temperatura muestra que existen diferencias significativas entre los diferentes tratamientos y la temperatura, destacándose tres grupos. En la categoría A se encuentra el hidróxido de sodio al 20% y al 10% con medias de 30.19°C y 28.66°C respectivamente, en la categoría B se encuentra el tratamiento realizado con hidróxido de sodio al 15% con una media de 25.89°C, y finalmente en la categoría C se encuentra el agua sola con una media de 22 °C.

Cálculo de la eficiencia energética

Para calcular la eficiencia termodinámica máxima de una celda de electrólisis que opera de manera reversible produce números sin sentido que superan el 100 %. El problema es que se necesita electricidad y calor para dividir el agua electroquímicamente y el calor no se incluye en el cálculo anterior de la entrada de energía. El potencial electroquímico (potencial estándar) correspondiente al PCS (poder calorífico superior) es de 1.481 V/celda esto representa el voltaje termoneutral al que se encuentran el hidrógeno y el oxígeno producido con una eficiencia térmica del 100 % (es decir, sin calor residual producido por la reacción), (Harrison, Remick, Martin, & Hoskin, 2010).

El voltaje termoneutro es determinado usando la Ley de Faraday, y dividiendo el PCS (285,840 J/mol) por el Faraday constante ($F = 96,485$ culombios mol⁻¹) y el número de electrones necesarios para crear una molécula de hidrógeno ($z = 2$) (Sánchez, 2019).

$$E_o = \frac{\Delta_f H^o}{zF} = \frac{285,840 \frac{J}{mol}}{2 * 96485 \frac{C}{mol}} = 1.481V$$

La fórmula para calcular la eficiencia de voltaje de una celda o pila de celdas se convierte así en la siguiente.

$$\eta_v = \frac{\text{Voltaje Termoneutral (E)}}{\text{Voltaje de operación de la celda (V)}}$$

$$\eta = \frac{1.48}{2.32}$$

$$\eta = 0.63 = 63\%$$

Para el caso de la celda estudiada en esta investigación se determinó la eficiencia de voltaje para cada valor de voltaje de la fuente manipulado, tomándose solamente los datos a partir de los cuales se observó producción de gas.

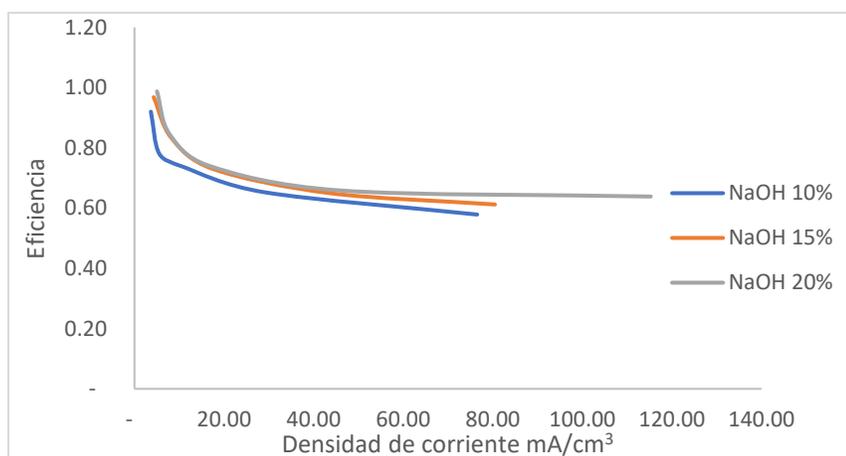


Figura 7. Eficiencia de voltaje en función de la densidad de corriente

En la figura 7 se muestran las diferentes eficiencias de voltaje en función de la densidad de corriente para cada tratamiento con NaOH. Se puede observar que con NaOH al 20% se obtiene una curva que alcanza mayores valores de eficiencia que con los otros dos tratamientos, además esta curva parece tomar valores constantes de eficiencia a partir de 100 mA/cm².

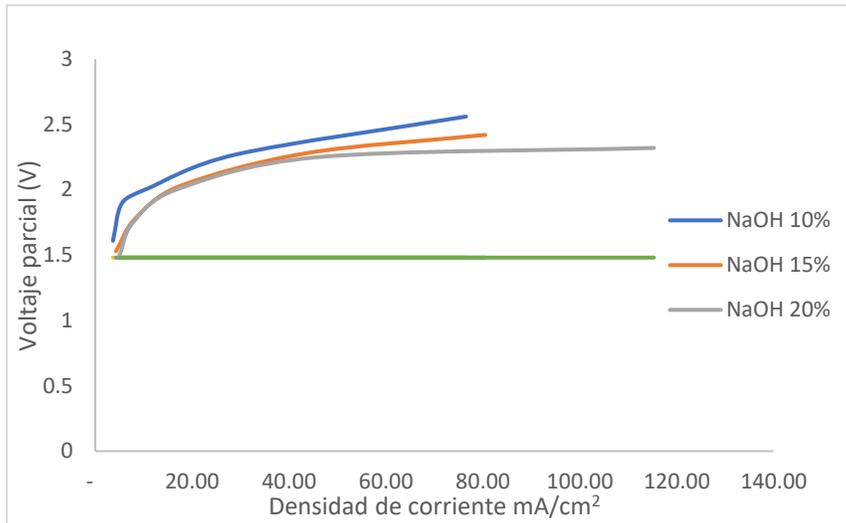


Figura 8. Voltaje parcial aplicado en función de la densidad de corriente

En la figura 8 se muestran las curvas de voltaje parcial de placas en función de la densidad de corriente para cada tratamiento realizado con NaOH, se puede apreciar que los voltajes parciales superan el voltaje termoneutro. Las regiones comprendidas entre el voltaje termoneutro y los voltajes parciales de cada curva se pueden considerar como pérdidas las cuales se ven reflejadas en forma de calor.

5. Conclusiones

Se realizó una investigación de las diferentes tecnologías de producción de hidrógeno por electrólisis, lo que permitió la identificación de los principales parámetros de cada tipo de tecnología mediante los cuales se pudo realizar una comparación técnica de estas. Siendo estos parámetros: el electrolito, portador de carga, densidad de corriente, voltaje, presión de trabajo, temperatura de operación y eficiencia. Mediante la consideración de estos parámetros de comparación se destacaron tres principales tecnologías; celda de electrólisis alcalina (AEC), la cual alcanza eficiencias de 63-70%, electrolizador de membrana polimérica (PEM), con eficiencias de 56-60% y celda de electrólisis de óxido sólido (SOEC) con eficiencia de 40%.

Se efectuó con éxito el diseño, la selección de materiales y la construcción del prototipo, el cual constituyó la unidad experimental para la realización de pruebas, cumpliendo satisfactoriamente con los requisitos de seguridad y fiabilidad esperados, siendo completamente funcional y apto para la experimentación. Además, se logró realizar una descripción detallada de los componentes de este, en cuanto a sus dimensiones físicas y su funcionamiento.

Mediante el análisis de correlación de Pearson se determinaron los coeficientes de correlación entre las variables, el cual permitió determinar que existe una relación muy fuerte entre la corriente consumida por el generador, la potencia, la temperatura y el caudal de gas producido, y que hay independencia de la tensión con el caudal, por lo cual se pudieron contrastar los resultados con la teoría, ya que la producción de hidrógeno depende directamente de la densidad de corriente y la temperatura.

Los análisis de varianza y covarianza permitieron comparar las medias de las variables respuesta con los diferentes tratamientos, y mediante la prueba LSD de Fisher se determinó que existen diferencias significativas entre los tratamientos, la corriente, el caudal, la temperatura y la eficiencia obtenida, obteniéndose mejores resultados (mayores medias) con los tratamientos realizados con hidróxido de sodio que los realizados solamente con agua.

Mediante el análisis de regresión lineal se pudo realizar un buen ajuste de curvas gracias a la regresión no lineal entre las variables tensión-corriente. Se realizó un ajuste de regresión lineal para corriente-caudal para cada tratamiento, y para temperatura-corriente.

Mediante los datos registrados obtenidos en la experimentación se realizó un cálculo matemático en función del voltaje termoneutro y el voltaje entre placas, este determinó la eficiencia eléctrica de la celda, el cual dio como resultado una eficiencia de 63%.

6. Recomendaciones

Para el manejo de electrolitos como hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH) se recomienda un manejo cuidadoso haciendo uso de equipo de protección, como son guantes, bata, lentes de protección, mascarilla y cristalería de química adecuada para el manejo de las disoluciones.

Siempre antes de iniciar cualquier prueba se recomienda purgar el dispositivo, para que los residuos no afecten los resultados.

Se debe verificar que el dispositivo este cerrado herméticamente, que las mangueras estén conectadas de manera adecuada, sin fugas de gas y de fluido electrolítico.

Evitar que el burbujeador se encuentre en un nivel muy bajo de agua por que dejaría de trabajar como elemento de seguridad.

Se debe hacer un uso precavido al usar fuentes de ignición, ya que este es gas es altamente explosivo.

Para futuros estudios se recomienda la utilización de otros electrolitos como el hidróxido de potasio (KOH), el cual según diversas investigaciones tiene un buen desempeño para acelerar la electrólisis y aumentar la eficiencia de esta.

Se recomienda, para futuras pruebas utilizar un método que permita separar ambos gases y darles salidas independientes para así obtener hidrógeno puro, el cual tiene más aplicaciones de interés para las energías renovables.

7. Bibliografía

- Alcantará, K. (2019). *Un poco de todo sobre el hidrogeno* (Vol. 1). Mexico. Obtenido de https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/images/revista/70_1/PDF/Hidrogeno.pdf
- Aleasoft. (noviembre de 2020). *Aleasoft*. Obtenido de Aleasoft.com: <https://aleasoft.com/es/todos-colores-hidrogeno/>
- Alvares Contreras, M. I., & Mendieta Gaitán, E. d. (2016). Aplicación del proceso de descarbonización del motor M16A de un vehículo Suzuki SX4 utilizando un generador de HHO. (*Tesis de grado*). UNI, Managua. Obtenido de <https://ribuni.uni.edu.ni/1737/1/90294.pdf>
- Ares, J., Leardini, F., Sánchez, C., Fernandez, J., & Ferrer, I. (agosto de 2019). EL HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO: MUCHO HECHO PERO CASI TODO POR HACER. *Encuentros multidisciplinares*, 10.
- Cengel, Y., & Boles, M. (2012). *Termodinámica*. Mexico: McGRAW-HILL.
- Clemente Jul, M. d., Sánchez Delgado, M., & Rodríguez, L. (2018). Modelado de sistemas de electrolisis alcalina para la producción de hidrógeno a partir de energías renovables. *Anales de la Real Academia de Doctores de España*, 3, 19-36. Obtenido de <https://www.radoctores.es/doc/2V3N1-CLEMENTE%20-%20produccion%20de%20hidrogeno.pdf>
- Da Rosa, A. (2005). *Fundamentals of Renewable energy processes*. standord : Elsevier.
- Díaz Rey, A. O., González Gil, J. E., & González Estrada, O. A. (2018). Análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna. *Revista UIS Ingenierías*, 17(1), 143-154. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/5537/553756967014/html/>
- EPEC. (s.f.). Faraday y la electrolisis . *EPEC*, 2. Obtenido de <https://www.epec.com.ar/docs/educativo/institucional/fichafaraday.pdf>

- Fierro, J. L. (octubre de 2011). Hidrógeno metodologías de producción. *Lychnos*, 01(6), 6. Obtenido de https://fgcsic.es/lychnos/es_es/articulos/hidrogeno_metodologias_de_produccion
- García , A. (9 de 2019). *UDG*. Obtenido de Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial: http://www2.udg.edu/Portals/88/proc_industrials/5%20-%20Otros%20Combustibles-Hidrogeno.pdf
- Harrison, K. W., Remick, R., Martin, G. D., & Hoskin, A. (2010). *Hydrogen Production: Fundamentals case study and summaries*. Springfield: U.S departamen of energy.
- Ísgro, M. d. (2015). *EL HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGETICO: SU OBTENCIÓN POR ELECTRÓLISIS*. ENALTECS.
- Linares Hurtado, J. I., & Moratilla Soria , B. Y. (2007). *El hidrógeno y la energía*. Madrid : Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI.
- López Ramírez, J. R. (2018). *Modelo dinamico de un electrolizador alcalino*.
- Miranda Barreras, Á. L., & Aguer Hortal, M. (2007). *El hidrógeno: Fundamento de un futuro equilibrado* (Vol. 2). España: Editorial Díaz de Santos, S.A. Obtenido de <https://www.editdiazdesantos.com/wwwdat/pdf/9788479788094.pdf>
- Molina, R., Roca, J., Pérez, E., Gato, F., Pardo, H., & Calvo, J. (2021). *Hidrógeno y su almacenamiento: el futuro de la energía eléctrica*. Universidad de caruña. Obtenido de https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/27268/Aguado_Molina_2021_Hidrogeno_y_su_almacenamiento.pdf?sequence=3
- Quezada Romero, E. M., & Torres Gualan, D. F. (2014). Implementación de un generador de hidrógeno de celda seca en un vehículo Chevrolet Steem 1.6L. (*Tesis de grado*). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7354/1/UPS-CT004305.pdf>
- Sánchez Delgado, M. (2019). *Desarrollo y validacion de un modelo para la simulación de sistemas de electrolisis alcalina para la producción de hidrógeno a partir de energías renovables* . Madrid.

Sánchez, F., & Vargas, A. (2005). *La volatilidad de los precios del petróleo y su impacto en América latina*. (C. D. Naciones Unidas, Ed.)

Sancler, V. (2022). Ley de faraday . *Euston96*.

Sarabia, I. P., & Artola, A. A. (2017). *ribuni.uni.edu.nif*. Obtenido de <https://ribuni.uni.edu.ni>: <https://ribuni.uni.edu.ni/1657/1/91310.pdf>

Tomante , J. R., Andreu, T., Garcia , G., Aguilera, J., Tarancón, A., & Torrel, M. (2020). *Hidrógeno vector de una economía descarbonizada*. Madrid: Fundacion Naturgy.

