



**IV CONFERENCIA INTERNACIONAL DE DESARROLLO
ENERGÉTICO SOSTENIBLE
CIDES 2025**

**ALUMINIO RECLICADO EN LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO
POR HIDROLISIS DE NaOH CON AGUA DE MAR/DESTILADA**

***RECYCLED ALUMINUM IN THE PRODUCTION OF HYDROGEN
BY HYDROLYSIS OF NaOH WITH SEA/DISTILLED WATER***

**Agustín Vázquez Escudero¹, Cristóbal Patiño Carachure², José Enrique Flores
Chan³, J.D. Calan Canche⁴, E.A. Álvarez García⁵, Francisco Eneldo López
Monteagudo⁶, Alejandro B. Duffus Scott⁷.**

1-Agustín Vázquez Escudero. Universidad Autónoma del Carmen, México. E-mail:
aves cudero@pampano.unacar.mx

2- Cristóbal Patiño Carachure. Universidad Autónoma del Carmen, México. E-mail:
cpatino@pampano.unacar.mx

3-José Enrique Flores Chan. Universidad Autónoma del Carmen, México. E-mail:
jeflores@pampano.unacar.mx

4-José Damián Calan Canche. Universidad Autónoma del Carmen, México. E-mail:
jodcalan@gmail.com

5-Emilio A. Álvarez García. Universidad Tecnológica de Campeche, México. E-mail:
alvarezgarciaemi@gmail.com

6-Francisco Eneldo López Monteagudo. Universidad Autónoma de Zacatecas, México.
E-mail: eneldolm@yahoo.com

7-Alejandro B. Duffus Scott. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.
E-mail: aduffus@uclv.edu.cu



Resumen: Las problemáticas principales en la tecnología del hidrógeno de los sistemas portátiles que utilizan celdas de combustibles para la generación de energía eléctrica, son la producción y el almacenamiento de hidrógeno. Así, en este estudio se propone resolver tanto la producción como el almacenamiento de hidrógeno, utilizando un sistema de producción de hidrógeno in situ, empleando la activación química de aluminio reciclado en morfologías de cubos, aros y polvos, utilizando molaridades de NaOH 0.25, 0.75 y 1.25 mol/L en agua de mar y agua destilada. Se emplearon técnicas de caracterización para identificar los subproductos después de cada proceso. Fueron obtenidos diferentes caudales de gas de hidrógeno en función de la concentración y la morfología. Los análisis de los resultados indican que la reacción de la producción de hidrógeno se lleva a cabo con mayor efectividad en la solución alcalina de agua destilada. Mientras que las muestras sometidas a la solución alcalina en agua de mar sugieren la formación inmediata de una capa de óxido y especies salinas producto del agua de mar que se sitúan sobre la superficie del material de aluminio, inhibiendo así, la reacción de producción de hidrógeno. Para tales aplicaciones de la tecnología del hidrógeno, al variar la concentración y la morfología de la materia prima, estos resultados son viables para controlar el flujo de hidrógeno acorde a la demanda de las celdas de combustible empleadas en sistemas portátiles de generación de energía eléctrica.

Abstract: *The main problems in hydrogen technology for portable systems that use fuel cells for electricity generation are the production and storage of hydrogen. Thus, this study proposes to solve both the production and storage of hydrogen, using an in-situ hydrogen production system employing the chemical activation of morphologies of cubes, rings, and powders of recycled aluminum, with molarities of NaOH 0.25, 0.75, and 1.25 mol/L in seawater and distilled water. Characterization techniques were used to identify the byproducts after each process. Different hydrogen gas flow rates were obtained depending on the concentration and morphology. The analysis of the results indicates that the hydrogen production reaction is carried out more effectively in the alkaline solution of distilled water. While the samples subjected to the alkaline solution in seawater suggest the immediate formation of an oxide layer and saline species from the seawater that are located on the surface of the aluminum material,*



inhibiting the hydrogen production reaction. For such applications, these results may be viable for controlling the hydrogen flow according to the demand of the fuel cells used in portable electricity generation systems.

Palabras Clave: Producción de hidrógeno; Agua de mar; NaOH; Aluminio reciclado.

Keywords: *Hydrogen production; Seawater; NaOH; Recycled aluminum.*

1. Introducción

Los desafíos energéticos actuales giran en torno a la necesidad de encontrar un combustible alternativo al petróleo y sus derivados, con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que representan una seria amenaza para la humanidad. Diversos estudios han señalado que el hidrógeno, gracias a sus propiedades químicas, es una opción viable para su uso en celdas de combustible, permitiendo la generación de energía eléctrica de forma limpia (Carraro, 2019; Figueiredo, 2018; Yürüm, 2009). Sin embargo, la tecnología del hidrógeno enfrenta dos obstáculos principales en aplicaciones portátiles: su producción y almacenamiento. Actualmente, los métodos disponibles para producir y almacenar hidrógeno son complejos, costosos y, en algunos casos, peligrosos. En cuanto al almacenamiento, se han propuesto soluciones como las nanoestructuras de carbono (Carraro, 2019; Figueiredo, 2018; Yürüm, 2009) y una variedad de hidruros metálicos (Zhang, 2019; Bhouri, 2018). Más recientemente, se ha investigado el uso de materiales a base de aluminio y sus aleaciones, activados mediante sustancias ácidas y alcalinas para facilitar la producción de hidrógeno (Raptis, 2019; Liu, 2018; Irankhah, 2018). Estos estudios han explorado variables como la concentración molar, la temperatura, el tamaño de las partículas y el dopaje de las aleaciones de aluminio. No obstante, la mayoría de estas investigaciones no abordan la posibilidad de generar hidrógeno de manera eficiente, económica, sustentable y con menor sofisticación tecnológica. Por ello, el presente trabajo se enfoca en analizar y comparar la producción de hidrógeno utilizando aluminio reciclado proveniente de latas de refresco, empleando distintas concentraciones de NaOH en soluciones de agua destilada y agua de mar.



2. Metodología

A partir de latas de aluminio de refresco, se obtuvieron lingotes por colada convencional utilizando un horno eléctrico de fundición marca Felisa (capacidad hasta 1200 °C). Los lingotes fueron seccionados en pequeños lingotes (paralelepípedos de base cuadrada) de dimensión 8x8x6 mm de aproximadamente de 1 g en peso. Los aros (anillas) de las tapas de las latas de aluminio fueron también obtenidas como materia prima para realizar la experimentación. Posteriormente otros lingotes fueron desbastados con limas de acero, para obtener polvos cuya distribución de tamaños oscila entre 0.2-0.5 mm. Fueron preparadas soluciones alcalinas de NaOH empleando los dos medios de agua destilada y agua de mar (parte norte de Cd. del Carmen, Camp., Mex) como se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Condiciones experimentales para la reacción de producción de hidrógeno. Fuente: elaboración propia.

Medio disolvente	Morfología de aluminio (1 gramo)	Concentración molar de NaOH (Mol/L)		
		0.25	0.75	1.25
Agua de Mar/ Agua destilada	Lingotes	X	X	X
	Aros	X	X	X
	Polvos	X	X	X

La composición química de los disolventes de agua destilada y agua de mar fue determinada utilizando la técnica espectrometría de masas como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Componentes químicos del agua destilada y agua de mar (ppm). Fuente: elaboración propia.

Medio	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni	Pb	V	Ca	Co	Mn	Na	Zn	Al	C	P
Agua Destilada	127	140.5	521	79.1	147.5	155.2	480.9	163.333	108	61.6	77.77	219.9	-	-	-
Agua de mar	454	707.3	681	482.3	509.8	511.8	206.07	856.633	421.4	242	173.366	863.8	328.4	969.2	349.8

Las mediciones del caudal de hidrógeno se realizaron mediante la técnica de “arrastre de burbuja por presurizado (ABP)”, donde la burbuja de jabón se desplaza a lo largo de un



tubo graduado en centímetros. Para ello, se registraron sistemáticamente los intervalos de tiempo y la distancia recorrida, con el fin de determinar la velocidad promedio del desplazamiento. Con base a estos datos, se calcularon el caudal y el volumen de hidrógeno empleando las ecuaciones (1) y (2) correspondientes de la dinámica de fluidos como sigue.

$$Q = v A = \frac{d}{t} A = V/t \quad (1)$$

$$V = \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{V}{t} \right) dt = \int_{t_1}^{t_2} Q dt \quad (2)$$

Dónde:

- v = Velocidad de la burbuja (cm/min).
- t = Tiempo en minutos (min).
- $t_{1,2}$ = Tiempo inicial en la marca 1 y final en la marca 2.
- A = Área de la sección transversal del tubo (cm²).
- Q = (V/t) Caudal o flujo en ml/min.
- V = Volumen de hidrógeno (ml).

Para identificar las fases presentes, composición química y morfología de los subproductos de las muestras sometidas a la reacción de producción de cada proceso, fueron caracterizados por las técnicas de difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB).

3. Resultados y discusión

La figura 1 presenta las mediciones del caudal de hidrógeno producido en función del tiempo, utilizando una muestra con morfología tipo lingote y soluciones de NaOH en agua destilada con concentraciones de 0.25, 0.75 y 1.25 mol/L. En la figura 1a, se observa que la solución con una concentración de 1.25 mol/L inicia con un caudal de 3 ml/min, el cual disminuye de manera lineal conforme avanza el tiempo, alcanzando un valor mínimo al cabo de 540 minutos. En contraste, la concentración de 0.75 mol/L comienza con un caudal de 2 ml/min, mostrando una reducción gradual hasta aproximadamente 1.4 ml/min. Por su parte, la solución de 0.25 mol/L mantiene un caudal prácticamente



V Convención Científica Internacional UCLV 2025
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
ALUMINIO RECLICADO EN LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO POR HIDROLISIS DE NaOH CON
AGUA DE MAR/DESTILADA

constante de 0.75 ml/min desde el inicio de la reacción. Estos resultados indican que el caudal de producción de hidrógeno tiende a iniciar en valores elevados y decrece progresivamente de manera lineal con el tiempo.

Para determinar el volumen total de hidrógeno producido, se calculó la curva de acumulación para cada curva de caudal, como se muestra en la figura 1b. En el caso de la concentración de 1.25 mol/L, se obtuvo un volumen total cercano a los 1200 ml. Este valor es cercano al máximo volumen estequiométrico de 1245 ml de hidrógeno por gramo de aluminio. En cuanto al volumen de la concentración de 0.75 mol/L, se observa una disminución logrando los 700 ml, mientras que para la concentración de 0.25 mol/L, la disminución fue aún más pronunciada, alcanzando 300 ml de hidrógeno. Estos resultados permiten deducir que la reacción de producción de hidrógeno se incrementa significativamente con el aumento de la concentración de NaOH en agua destilada.

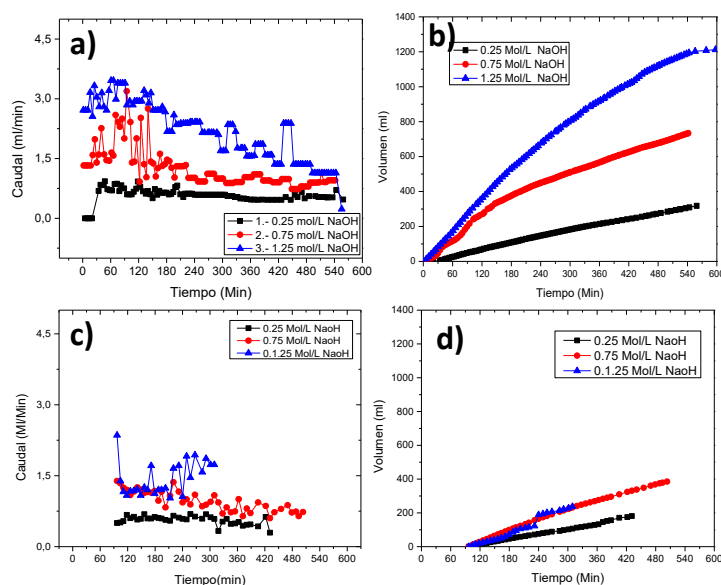


Figura 1. Producción de hidrógeno de las muestras con morfología tipo lingote en los medios de: agua destilada a) caudal, b) volumen; y en agua de mar c) caudal y d) volumen. Fuente: elaboración propia.

En la figura 1c) se observan los caudales de H_2 producidos en el medio de agua de mar. Donde se aprecia una disminución de los caudales de producción de hidrógeno comparado con los caudales de la figura 1a, por ejemplo, para la concentración 1.25 mol/L, el caudal inicia alrededor de los 1.5 ml/min disminuyendo de manera lineal conforme pasa el tiempo, mientras que las otras concentraciones (0.75 y 0.25 ml/min) se



V Convención Científica Internacional UCLV 2025
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
ALUMINIO RECLICADO EN LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO POR HIDROLISIS DE NaOH CON
AGUA DE MAR/DESTILADA

encuentran inicialmente por debajo de los 1.5 ml/min disminuyendo de forma semejante a las anteriores. Al obtener la curva de acumulación de hidrógeno producido, se observa que el volumen total disminuyó significativamente (figura 1d). Por lo tanto, de estos resultados se puede deducir que la reacción de producción de hidrógeno se efectúa en mayor proporción para las muestras cuyo medio sea en agua destilada y que disminuye este fenómeno en el medio de agua de mar.

En la figura 2 se muestran los perfiles de producción de hidrógeno para la muestra con la morfología de aros de lata de aluminio empleando las concentraciones de NaOH y medio de agua destilada. Donde en la figura 2a) se aprecia los caudales de producción de hidrógeno, el perfil de caudal correspondiente a la concentración de 1.25 mol/L forma una curva abierta hacia abajo sugiriendo un caudal máximo de 12 ml/min alrededor del tiempo de 60 minutos, y que posteriormente desciende formando una curva. Sin embargo, el caudal de las concentraciones de 0.75 y 0.25 mol/L, que inicia debajo de los 10 y 7 ml/min respectivamente, disminuyen linealmente cuando el tiempo se incrementa.

De acuerdo con la figura 2b), que corresponde a volumen acumulado en función del tiempo, se observa que evidentemente las muestras sujetas a las concentraciones de 1.25 y 0.75 mol/L se produce un volumen cercano a los 1300 ml, y que la concentración de 0.25 mol/L logra un volumen de 1000 ml. En estas graficas también es posible observar que típicamente se manifiesta una región lineal y que la pendiente indica la velocidad de producción de hidrógeno, por lo tanto, se puede deducir que, con el incremento de la concentración molar, la velocidad de producción de hidrógeno se incrementa.

Así mismo, éstas muestras con morfología de aros fueron sujetas a las mismas concentraciones en un medio de agua de mar. En la comparación, es evidente que el comportamiento de cada curva posee la misma tendencia con una proporción menor de del caudal como se muestra en la figura 2c), por otro lado, se puede notar que en la concentración de 0.25 mol/L de NaOH, el caudal disminuye en gran proporción. Como consecuencia de esta velocidad de producción de hidrógeno (0.25 mol/L), se puede notar que el volumen generado (fig. 2d) también se ve afectado encontrándose alrededor de los 200 ml de H_2 , mientras que las otras dos concentraciones molares (1.25 y 0.75 mol/L) logran producir en su totalidad el volumen esperado.



V Convención Científica Internacional UCLV 2025
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
**ALUMINIO RECLICADO EN LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO POR HIDROLISIS DE NaOH CON
AGUA DE MAR/DESTILADA**

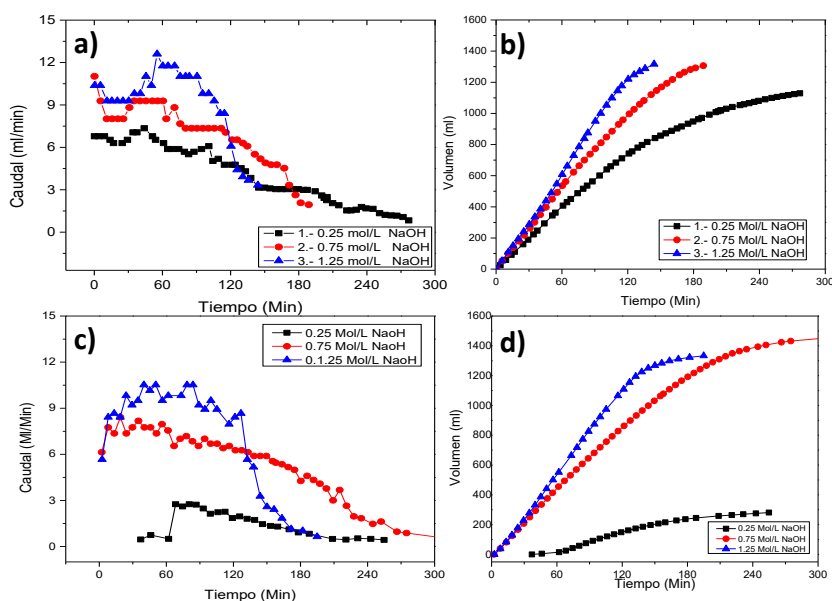


Figura 2. Producción de hidrógeno de las muestras en morfología de aros de latas en los medios de: agua destilada a) caudal, b) volumen; agua de mar c) caudal y d) volumen. Fuente: elaboración propia.

Los perfiles de producción de hidrógeno correspondientes a la morfología de polvo para ambos medios se presentan en la figura 3. En la figura 3a, que muestra los resultados obtenidos en agua destilada, se observa que las concentraciones de 1.25 y 0.75 mol/L exhiben un caudal de H_2 significativamente alto durante los primeros minutos de reacción, alcanzando máximos aproximados de 70 y 47 ml/min, respectivamente. Así mismo es posible observar que la reacción de estas concentraciones se efectúa por un tiempo relativamente corto menor a los 30 minutos. En contraste, la concentración de 0.25 mol/L muestra un caudal de producción considerablemente menor a los 40 ml/min manteniéndose en un tiempo prolongado mayor a los 120 minutos. En cuanto al volumen de hidrógeno generado, se observa que las reacciones han alcanzado una reacción casi completa alrededor de los 1200 ml por gramo de aluminio.

Por otro lado, en el medio alcalino preparado con agua de mar, mostrado en la figura 3c, se observa que los caudales máximos de H_2 para las concentraciones 1.25 y 0.75 mol/L son de 55 y 30 ml/min respectivamente efectuándose alrededor de los 7.5 minutos de reacción. Sin embargo, para la concentración de 0.25 mol/L se observa significativamente



V Convención Científica Internacional UCLV 2025
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
ALUMINIO RECLICADO EN LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO POR HIDROLISIS DE NaOH CON
AGUA DE MAR/DESTILADA

bajo, menor a los 10 ml/min, lo que sugiere una reacción lenta pero prolongada siendo mayor a los 120 minutos. En la figura 3d, correspondiente al volumen acumulado, se aprecia que las concentraciones de 1.25 y 0.75 mol/L lograron alcanzar aproximadamente 1200 ml de H_2 , reflejando una alta eficiencia en la reacción, mientras que la concentración de 0.25 mol/L produjo cerca de 400 ml.

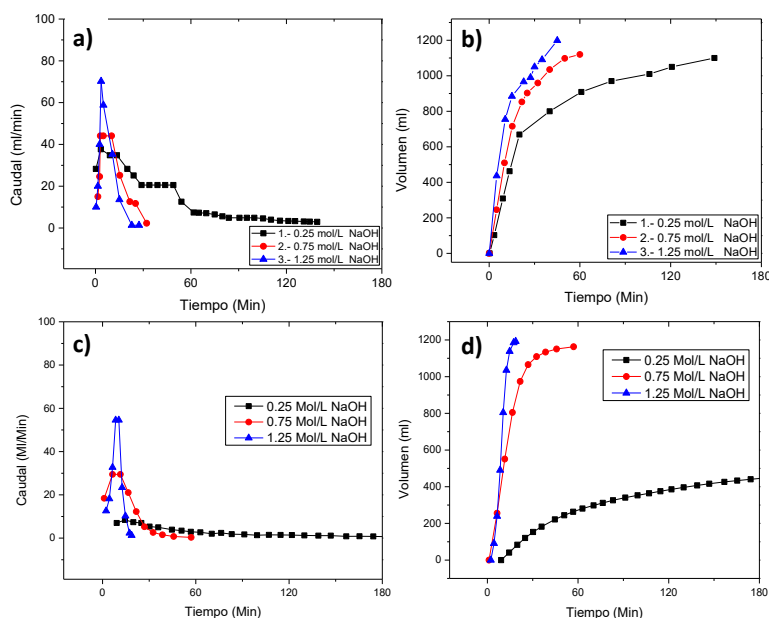


Figura 3. Producción de hidrógeno de las muestras en morfología de polvo en los medios de: agua destilada a) caudal, b) volumen; agua de mar c) caudal y d) volumen. Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, de estos resultados se puede deducir que el uso de aluminio en forma de polvo en un rango de tamaño de 0.2-0.5 mm bajo estas condiciones experimentales favorece una producción elevada de hidrógeno y que el tiempo de duración de la reacción es del orden menor a los 15 minutos.

Para caracterizar la superficie y los subproductos después de la reacción de producción de hidrógeno, se ha analizado la superficie de la muestra de morfología lingote, expuesta en agua de mar, y se procedió a emplear la técnica de microscopia electrónica de barrido como se presenta en la figura 4. En la micrografía obtenida por la técnica de electrones retrodispersados (figura 4a), se puede notar la presencia de varias fases como subproductos de la reacción, por ejemplo, en la región clara que apunta la flecha superior, se ha realizado un análisis químico, el cual indica los subproductos de la reacción y de las impurezas (figura 4b) del agua de mar que recubren tal superficie. Por otro lado, en la

flecha inferior que apunta una región más oscura, el análisis químico indica la formación única del óxido de aluminio correspondiente exclusivamente a la reacción de oxidación y como consecuencia a la liberación de hidrógeno como se muestra en la reacción: $2\text{Al} + 3\text{H}_2\text{O} = \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2$, donde el aluminio reacciona con el oxígeno del agua y forma Al_2O_3 y libera el H_2 .

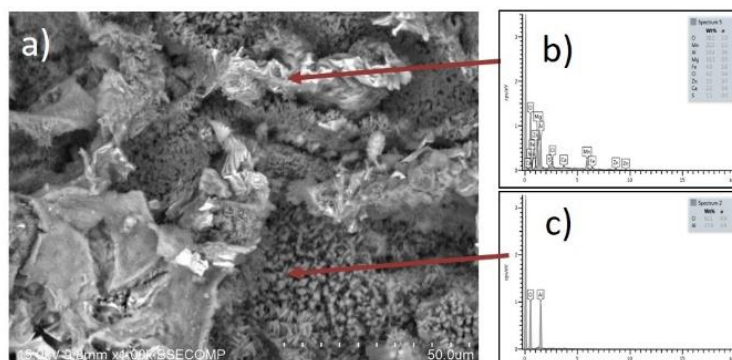


Figura 4. Micrografías de MEB y análisis químico a) superficie del aluminio después de la reacción con la concentración molar de 1.25 Mol/L de NaOH en agua de mar, b) impurezas del agua de mar, c) subproductos de la reacción. Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, los subproductos de la reacción fueron analizados por la técnica de DRX (ver figura 5). En el patrón de DRX a), se muestra el resultado después de la reacción de polvo de aluminio reciclado expuesto a la concentración 1.25 mol/L con agua de mar y NaOH. En este caso, se formó la fase hidróxido de aluminio $\text{Al}(\text{OH})_3$, esta fase es producto de la hidratación del Al_2O_3 . En b) se presenta el patrón de DRX de la muestra sujeta a tratamiento térmico a 300 °C, cuya temperatura corresponde a la deshidratación de la fase hidróxido de aluminio para transformarse en Al_2O_3 . Esto sugiere que los materiales obtenidos pueden reutilizarse en otros procesos, lo que ayudaría a reducir costos. En general, los resultados confirman que la reacción entre el aluminio y el oxígeno del agua es efectiva para liberar hidrógeno.

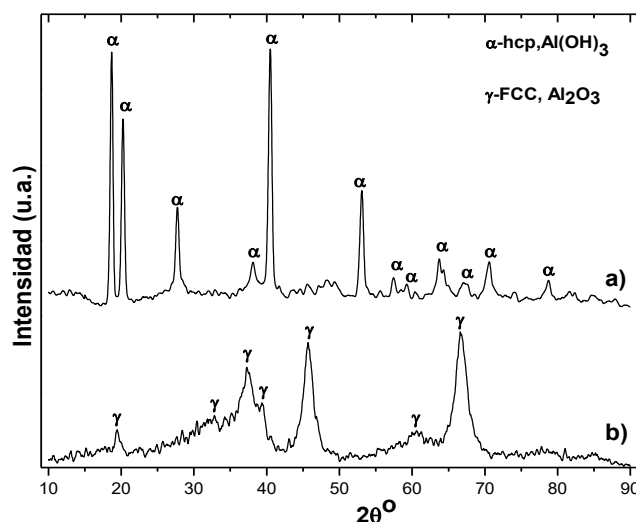


Figura 5. Patrón de difracción de rayos X de las muestras tipo lingote sometidas en la solución de agua de mar, a) hidróxido de aluminio $\text{Al}(\text{OH})_3$ y b) fase Al_2O_3 después de tratamiento térmico a 300°C . Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

Se produjo diferentes caudales de hidrógeno variando las concentraciones de 0.25, 0.75 y 1.25 mol/L de NaOH con agua de mar y utilizando aluminio de latas recicladas en las morfologías de lingotes (paralelepípedos de base cuadrada), aros y polvos de aluminio de latas recicladas.

El tiempo de reacción para los lingotes fue de 540 minutos 350 minutos en promedio para las concentraciones en agua destilada y agua de mar respectivamente. Sin embargo, para los aros fue menor a los 240 minutos en ambos medios. Y el tiempo para los polvos fue menor a los 15 minutos para ambos medios.

El mayor flujo de hidrógeno se produce al emplear una solución de agua destilada con NaOH. En contraste, las impurezas presentes en el agua de mar forman una capa sobre el aluminio, lo que reduce la eficiencia de la reacción de generación de hidrógeno. Al aumentar la concentración molar, se observa una mayor producción de hidrógeno en ambas soluciones. Además, la forma del polvo de aluminio influye significativamente en el proceso, ya que permite reducir el tiempo de reacción en ambos casos. Para lograr una reacción total del aluminio, se recomienda utilizar concentraciones de NaOH de 0.75 y 1.25 mol/L en ambos medios.



Los resultados son viables para dosificar el flujo de hidrógeno en las tecnologías del hidrogeno de acuerdo con la necesidad para sistemas portátiles y estacionarios de generación de energía eléctrica.

5. Referencias bibliográficas

Abdullah Irankhah, Seyed Mohsen Seyed Fattahi, Mohammad Salem, Hydrogen generation using activated aluminum/water reaction, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 43, Issue 33, 2018, Pages 15739-15748.

Bhouri, M. Linder, I. Bürger, Metal hydride reactor for dual use: Hydrogen storage and cold production, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 43, Issue 52, 2018, Pages 23357-23371.

Dimitrios Raptis, Andreas K. Seferlis, Vasiliki Mylona, Constantin Politis, Panagiotis Lianos, Electrochemical hydrogen and electricity production by using anodes made of commercial aluminum, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 44, Issue 3, 2019, Pages 1359-1365.

Hui Liu, Fuli Yang, Bochao Yang, Qian Zhang, Yujun Chai, Ning Wang, Rapid hydrogen generation through aluminum-water reaction in alkali solution, Catalysis Today, Volume 318, 2018, Pages 52-58.

Jiguang Zhang, Yunfeng Zhu, Linglong Yao, Cheng Xu, Yana Liu, Liquan Li, State of the art multi-strategy improvement of Mg-based hydrides for hydrogen storage, Journal of Alloys and Compounds, Volume 782, 2019, Pages 796-823.

José L. Figueiredo, Nanostructured porous carbons for electrochemical energy conversion and storage, Surface and Coatings Technology, Volume 350, 2018, Pages 307-312.

P.M. Carraro, A.A. García Blanco, G. Lener, D. Barrera, S. Amaya-Roncancio, C. Chanquía, H. Troiani, M.I. Oliva, G.A. Eimer, Nanostructured carbons modified with nickel as potential novel reversible hydrogen storage materials: Effects of nickel particle size, Microporous and Mesoporous Materials, Volume 273, 2019, Pages 50-59.