

# Producción de Oxihidrógeno como Alternativa Energética

## Oxyhydrogen Production as an Energy Alternative

Marco Rosero<sup>1,\*</sup>, Humberto González<sup>2,\*</sup>, Patricia Ochoa<sup>3,\*</sup>, Magdalena Díaz<sup>4,\*</sup>, Edward Jiménez<sup>5,\*</sup>,  
Cristina Castillo<sup>6,\*</sup>, Diego Chulde<sup>7,†</sup>, Ullrich Stahl<sup>8,\*</sup>

\*Grupo de Investigación e Ingeniería en Procesos Químicos, Físicos y Biológicos,  
Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador

†Instituto de Investigación Geológico y Energético, Quito, Ecuador

Email: <sup>1</sup>mvrosoero@uce.edu.ec, <sup>2</sup>hgonzalez@uce.edu.ec, <sup>3</sup>pochoa@uce.edu.ec, <sup>4</sup>madiaz@uce.edu.ec, <sup>5</sup>ehjimenez@uce.edu.ec,  
<sup>6</sup>cacastillof@uce.edu.ec, <sup>7</sup>diego.chulde@geoenergia.gob.ec, <sup>8</sup>ustahl@uce.edu.ec,

**Resumen**— El empleo de oxihidrógeno (HHO) en los motores de combustión interna de gran potencia, mejora su desempeño, en comparación con combustibles fósiles. El propósito de este trabajo es mostrar el potencial de producción electroquímica de HHO, así como el deterioro de sus electrodos. El proceso incluye el uso de reactores electroquímicos de celdas húmedas y secas, alimentadas con corriente continua. En este trabajo dichas celdas emplean soluciones acuosas 0.3 M y 1 M de hidróxido de sodio (NaOH) las cuales favorecen las reacciones de óxido reducción en los electrodos. El gas generado se recolecta, su composición es determinada por un equipo detector de gases portátil y se prueba su poder de combustión. El deterioro de las celdas se analiza identificando las variaciones físicas de los electrodos por inspección visual. Se comprueba la producción de HHO con un promedio de 1240 mililitros por minuto, con una relación 2:1 (H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>).

**Palabras Clave**— Gas oxihidrógeno, Celdas electroquímicas, Deterioro de electrodos.

**Abstract**— The use of oxyhydrogen (HHO) in high power internal combustion engines improves their performance compared to fossil fuels. The goal of this work is to show the potential of electrochemical production of HHO as well as the deterioration of its electrodes. The process involves the use of electrochemical reactors with wet and dry cells design, fed with direct current. In this work these cells used 0.3 M and 1 M aqueous solutions of sodium hydroxide (NaOH) which help redox reactions at the electrodes. The gas generated is collected, its composition is determined by a portable gas detector equipment and its combustion power is tested. The deterioration of the cells is analyzed, identifying the physical variations of the electrodes by visual inspection. HHO production is verified with an average of 1240 milliliters per minute, at a 2:1 ratio (H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>).

**Keywords**— Oxyhydrogen gas, Electrochemical cells, Deterioration of electrodes.

### I. INTRODUCCIÓN

Los requerimientos energéticos en la industria manufacturera y la demanda de motores estacionarios cada vez son mayores debido al crecimiento poblacional. Este aumento

de consumo energético se refleja en la alta demanda de combustibles fósiles lo cual incide en el aumento de la contaminación global. Con la finalidad de reducir los niveles de contaminación se analiza con más interés alternativas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, a la par de un mejor aprovechamiento del combustible. En este sentido, el gas oxihidrógeno puede favorecer a la reducción de la emisión de gases tóxicos al ambiente. La combustión con hidrógeno contribuye a la reducción de las emisiones de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrocarburos (HC) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). Este tipo de combustión solo produce vapor de agua en presencia de oxígeno puro (O<sub>2</sub>) y NO<sub>x</sub> cuando trabaja con aire y a temperaturas de combustión adiabática altas [1]-[3].

Por tal razón se ha realizado investigaciones sobre alternativas para reducir el consumo de combustibles tradicionales, incluso ser sustituidos en un futuro, siendo una, la adición indirecta de gas oxihidrógeno (HHO) con el propósito de aumentar el poder energético del combustible y reducir su consumo. A este fin, en la literatura se ha evaluado el efecto de la adición de gas oxihidrógeno por su elevado valor de poder calórico evidenciado en la Tabla I, y se ha evaluado la adición de HHO en la mezcla aire/combustible en un motor de combustión interna de gasolina, como resultado se obtuvo la reducción de un 36% de consumo de combustible [4].

El gas oxihidrógeno es una mezcla de hidrógeno (H<sub>2</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>) en una relación molar de 2 a 1 (H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>). Se obtiene por métodos electroquímicos de la electrólisis del agua, ocurriendo en los electrodos reacciones de óxido reducción (Ver ecuaciones 1, 2 y 3), siendo el oxígeno producido simultáneamente como subproducto del hidrógeno [1]. Esta mezcla puede ser quemada a presión y temperatura normal cuando esta contiene un porcentaje entre el 4% y 94% de hidrógeno, con una mínima energía de ignición necesaria de 20 micro julios [5].

La lógica de desarrollo de reactores electroquímicos es indispensable en definir variables de proceso como: voltaje, tiempo de proceso, concentración del electrolito, selección de

Tabla I  
PODER CALÓRICO INFERIOR (MJ/KG).

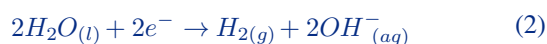
Sustancia	Valor
Oxihidrógeno	120,00
Gas natural	47,13
GLP	46,60
Gasolina	43,44
Diesel bajo en azufre	42,60
Etanol	26,95
Carbón (base húmeda)	22,73
Metanol	20,09
Residuos forestales	15,40

electrodos, área de electrodos, entre otros. Estos reactores pueden operar con celdas de tipo seca y húmedas, siendo la principal diferencia el nivel de contacto de la sustancia electrolítica con los electrodos [6], [7].

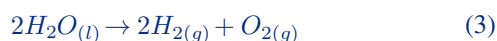
Reacción anódica:



Reacción catódica:



Reacción global:



Cuando se usa metales como acero inoxidable A304 para los electrodos de trabajo se debe considerar que: el hidrógeno puede ingresar a la red metálica de acero intersticialmente como hidrógeno monoatómico y la cantidad disuelta en la estructura es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la densidad de corriente de carga catódica [8], por tal razón este material puede sufrir daños estructurales por fragilización por hidrógeno, si el contenido de hidrógeno en la superficie es alto [9].

El oxihidrógeno no solo constituye un vector energético viable como precursor de hidrógeno, sino que también representa una forma de almacenamiento de energía. Esta tecnología se encuentra aún en investigación, sin embargo, es una opción que en un futuro no muy lejano tendrá aplicación tecnológica.

## II. METODOLOGÍA

La investigación se realizó a partir de dos celdas electroquímicas de 1 litro de capacidad y con potencial de generar el oxihidrógeno (HHO). Como electrolito se usó una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 0.3 M para la celda húmeda y 1 M para la celda seca [10]. Estos datos pertenecen a un trabajo previo exploratorio, en el proyecto semilla fase 3b de la Universidad Central del Ecuador, en el cual se determinó la mejor concentración y voltaje para la producción de gas en cada tipo de celda.

Para la medición de la concentración del gas de salida obtenido, se usó el tren de medición del equipo NOVA serie 970P, según como se detalla en la Figura 1 en primera instancia. Seguido del registro de datos, se recolectó el gas y realizó la prueba cualitativa de explosividad.

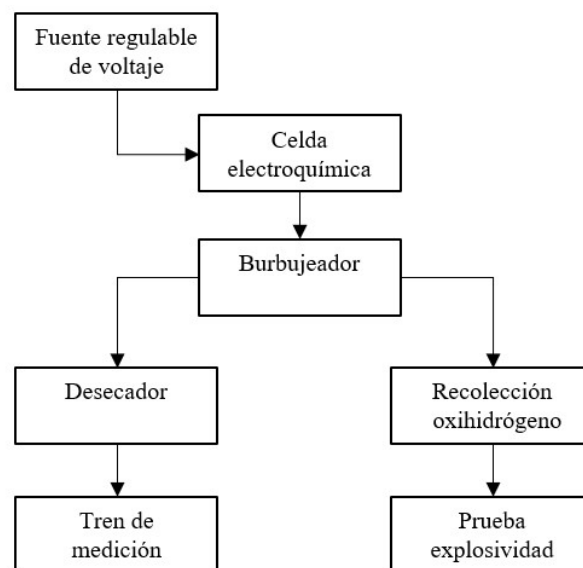


Figura 1. Etapas del proceso de producción de Oxihidrógeno.

Ambos reactores electroquímicos de producción estaban formados por cuatro celdas electrolíticas con conexiones monopolares entre sus electrodos de trabajo, empleando además 4 electrodos neutros en cada celda para incrementar el área de contacto, para así aumentar la producción de gas oxihidrógeno. El material seleccionado como electrodos neutros y de trabajo fue acero inoxidable A304 de un milímetro de espesor, la separación entre electrodos se consiguió usando empaquetaduras.

### A. Cuantificación de volumen generado de oxihidrógeno

La cuantificación de gas generado con cada tipo de celda electroquímica se determinó mediante el método de desplazamiento de agua. Se empleó contenedores de volumen fijo y registró el tiempo una vez desplazado todo el volumen del recipiente. La cuantificación de volumen se realizó en diferentes instancias de proceso de producción de gas. La medición del caudal por desplazamiento de líquido en el ingreso del gas es una variable que se registró como promedio de las 10 pruebas, como se evidencia en la Tabla II.

### B. Análisis de composición del gas producido

Los análisis de composición fueron realizados con un dispositivo de acondicionamiento del gas y un analizador portable de gases de síntesis de marca NOVA. Se registró la presencia de gases y porcentajes de referencia de producción para cada reactor electroquímico de gas. El analizador emplea una celda de conductividad térmica para  $H_2$  y un sensor electroquímico para medir niveles porcentuales de  $O_2$ .

### C. Prueba de explosividad

Una de las características del oxihidrógeno es su alta explosividad, por lo cual se realizó una prueba cualitativa al gas generado durante el proceso de óxido reducción en ambas celdas. Esta prueba consistió en llenar un recipiente de agua y



Figura 2. Prueba cualitativa de explosividad.

por desplazamiento de líquido se llenó de gas producido para cada una de las celdas. Luego, el recipiente fue montado en una lanzadera para realizar una ignición mediante un cerillo en la boca de llenado. Una vez dada la ignición se detectaba un fugaz resplandecer como el mostrado en la Figura 2, y un estruendo de la implosión. El recipiente recibía esta fuerza y era impulsado rápidamente hacia adelante.

#### D. Registro de variaciones: intensidad de corriente y temperatura externa del reactor electroquímico

El registro de la variación de intensidad de corriente (A) fue determinado con el uso de una pinza amperimétrica Fluke 376 durante todo el proceso de producción de gas. El registro de temperatura externa fue registrada al inicio y final del proceso con un termómetro infrarrojo en diferentes partes de los reactores electroquímicos.

### III. RESULTADOS

Durante la investigación se efectuaron diez pruebas de funcionamiento para cada uno de los reactores electroquímicos, de las cuales tres se efectuaron durante todo el proceso y se registró los datos en función del tiempo correspondiente a: porcentaje de  $H_2$  y  $O_2$  del producto gaseoso, intensidad eléctrica necesaria para mantener la reacción y temperatura externa del reactor electroquímico.

#### A. Funcionamiento de los reactores electroquímicos

El funcionamiento de los reactores electroquímicos se controló a través del control de potencial eléctrico, registrando los datos de variación de intensidad vs tiempo, evidenciando en ambos escenarios un comportamiento creciente del requerimiento de corriente en función del tiempo, tal y como se muestra en las Figuras 3 y 4 y evidenciando la confiabilidad de medidas de corriente respecto al tiempo, como se observa en la Figura 5.

Los flujos volumétricos evidencian la factibilidad de producción de gas oxihidrógeno mediante el uso de reactores con celdas tanto secas y húmedas, obteniéndose un flujo representativo.

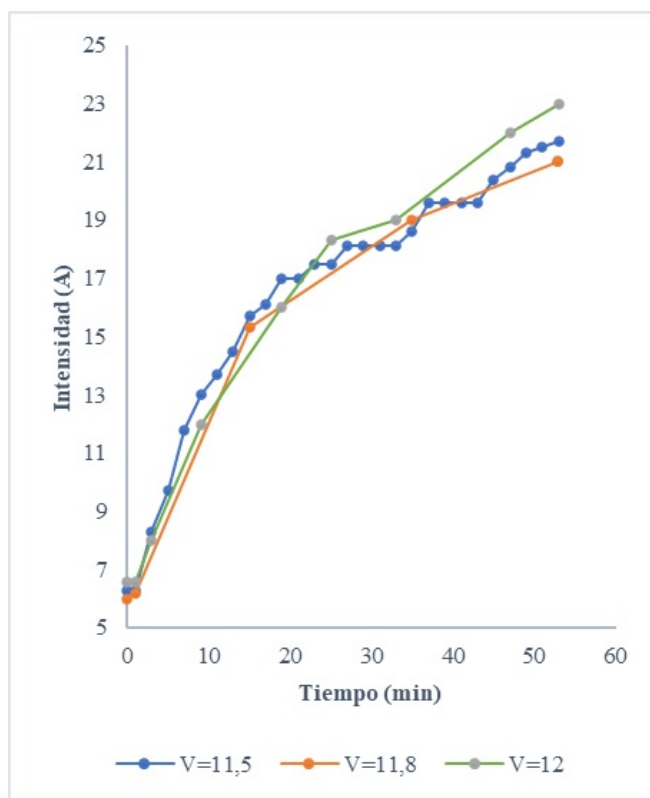


Figura 3. Intensidad vs tiempo en reactor de celda seca.

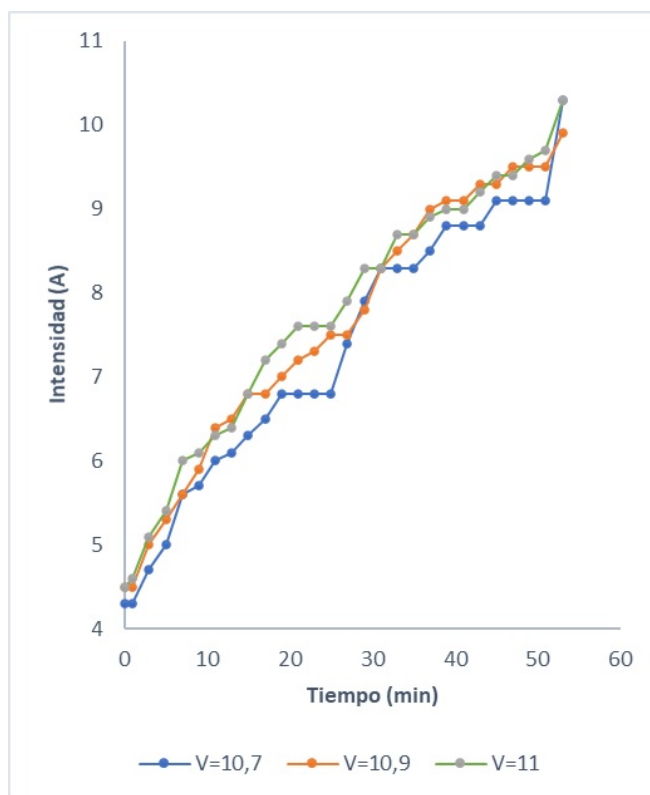


Figura 4. Intensidad vs tiempo en reactor de celda húmeda.

#### B. Análisis de gas oxihidrógeno

Con el equipo NOVA se comprueba la presencia de  $H_2/O_2$ , y se descarta la presencia de  $CO$ ,  $CO_2$  y  $CH_4$  de acuerdo con

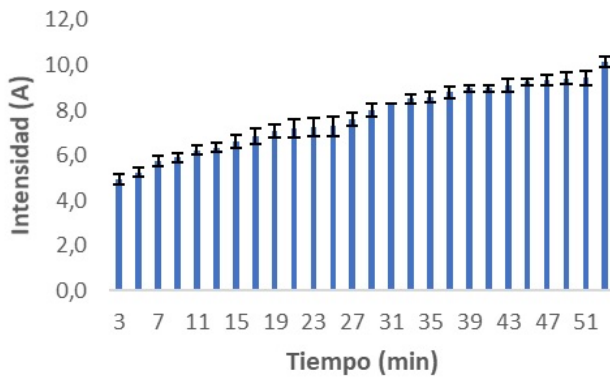


Figura 5. Barras de error respecto al cambio de intensidad en el tiempo, reactor de celda seca.

Tabla II  
PROMEDIO DE FLUJO DE GAS.

Tipo celda	Flujo gas, ml/s
Seca	21,30
Húmeda	13,10

Tabla III  
PROMEDIO DE RELACIÓN MOLAR DE PRODUCCIÓN H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>.

Tiempo, min	Celda seca	Celda húmeda
5	1,17	0,68
15	1,57	0,80
25	1,76	0,88
35	1,89	1,01
45	1,96	1,09
53	1,95	1,19

Tabla IV  
FLUJO DE PRODUCCIÓN DE OXIHIDROGENO, REACTOR DE CELDA SECA.

#	Volumen (ml)	Tiempo (s)	Flujo (ml/min)
1	620	31,12	1195,37
2	620	29,40	1265,31
3	620	30,00	1240,00
4	620	30,00	1240,00
5	620	30,30	1227,72
6	620	31,00	1200,00
7	620	29,40	1265,31
8	620	29,00	1282,76
9	620	29,70	1252,53
10	620	30,00	1240,00
Promedio	620	30,02	1240,33
Desviación estándar, flujo (ml/min)			27,89

el alcance los sensores de detección del equipo.

La producción de gas H<sub>2</sub> es superior al porcentaje de producción de O<sub>2</sub>, para el reactor de celda seca (ver Figura 6), como para el reactor de celda húmeda (ver Figura 7). Este resultado comprueba la relación molar de producción, evidenciada en la ecuación 3. La relación porcentual de composición con el avance del tiempo y estabilización del tren de medición del equipo NOVA se visualiza en la Tabla III, determinando una relación porcentual cercana a dos (2) en

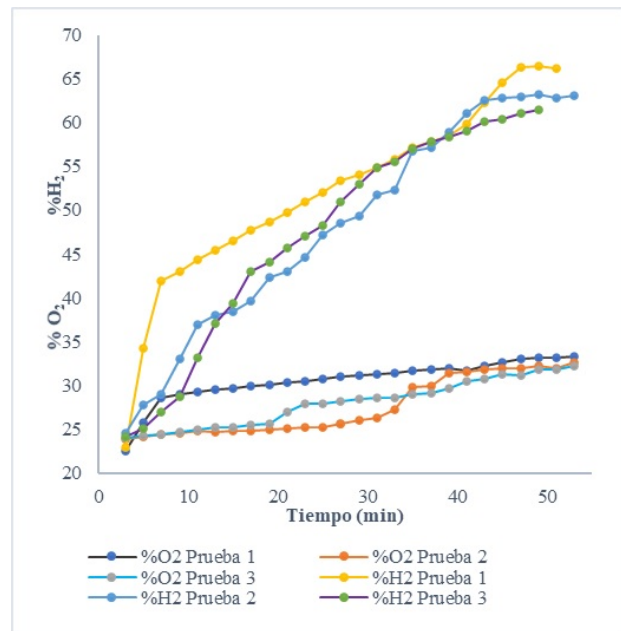


Figura 6. Porcentaje de composición del gas producido en reactor de celda seca.

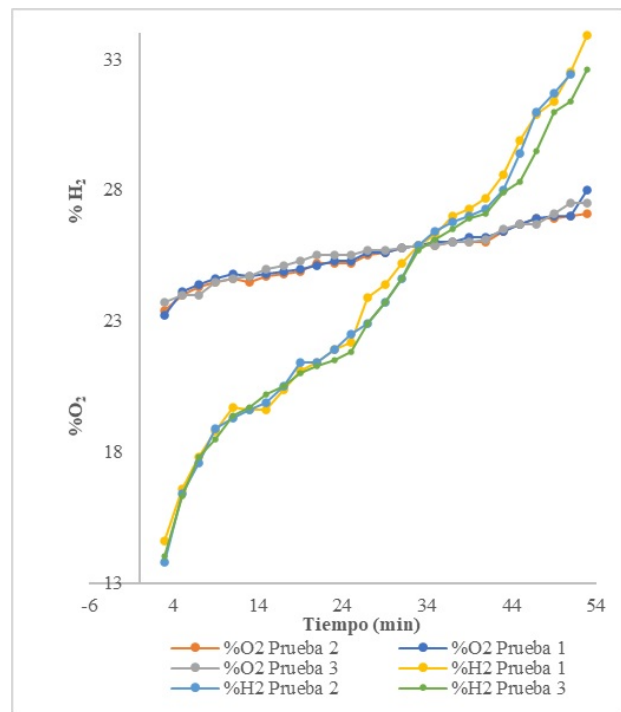


Figura 7. Porcentaje de composición del gas producido en el reactor de celda húmeda.

el reactor de celda seca.

### C. Análisis de variación de temperatura en el reactor

Durante la producción de gas HHO en ambos reactores electroquímicos se evidencia el incremento de temperatura externa (Ver Figura 8), generando deterioro en la estructura del reactor (contenedor de policarbonato), fragilización de los electrodos en conjunto favorecida por la acumulación de

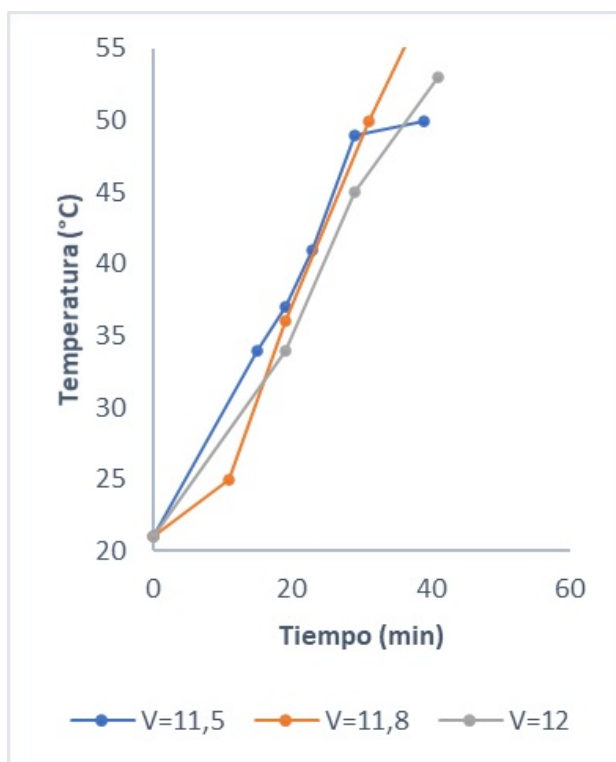


Figura 8. Temperatura vs tiempo en el reactor de celda seca, para diferentes variaciones de voltaje (V).

hidrógeno en la superficie de estos, a más de la evaporación del medio acuoso lo cual conlleva el transporte de humedad en el gas producido.

#### D. Análisis del estado final de los electrodos

El estado final de los electrodos (cátodos, ánodos y neutros) evidencian deterioro generalizado, con incidencia de pequeños huecos (pitting) en las placas con deterioro de la red cristalina en la superficie. El reactor con celda húmeda, al final del proceso fue desmontado y se analizó la estructura superficial de cátodos (Ver Figura 9) y ánodos (Ver Figura 10), evidenciándose un mayor deterioro de la picadura en la superficie del cátodo en el cual se generaba hidrógeno. Además, se evidencia sedimentación de color anaranjado, en el electrolito retirado al final de cada proceso.

El funcionamiento de los electrodos después de estas incidencias fue errático y disminuyó el caudal de producción de gas y aumentando el consumo de corriente.

#### IV. CONCLUSIONES

La obtención de oxihidrógeno HHO mediante electrodos de bajo costo es posible con caudales de gas significativos para el reactor de celda seca de 1240 ml/min (ver Tabla IV), viable para la implementación en motores de combustión interna. Se comprueba la tendencia de una relación porcentual de producción cercana a 2:1 para  $H_2/O_2$ , siendo esta relación alcanzada prontamente en el reactor electroquímico de celda seca. Dentro de las limitaciones encontradas están: el aumento de la temperatura (máx. 62°C) durante todo el proceso, factor



Figura 9. Estado final del ánodo en el reactor de celda húmeda.



Figura 10. Estado final del cátodo en el reactor de celda húmeda.

importante debido a la acumulación de calor que generan los dispositivos que puede provocar la evaporación de agua del electrolito. En cuanto al deterioro de los electrodos las causas pueden ser muchas; entre ellas, la incidencia en la interfase electrodo-electrolito, de la pared de burbujas formada por los diferentes gases en contacto con la superficie de los electrodos y, la influencia de las reacciones indeseables con la formación de subproductos como óxidos de hierro en corrosión por dealado potenciado por la fragilización de hidrógeno.

#### AGRADECIMIENTOS

Nos complace agradecer a la Dirección General de Investigación de la Universidad Central del Ecuador y al Instituto de Investigación Geológico y Energético del Ecuador.

#### REFERENCIAS

- [1] R. Nag, S. Shrivastava, Oxy-hydrogen fuel as supplement for gasoline vehicles using dry cell generator, International Journal of Scientific & Engineering Research, vol. 7, pp. 1139-1143, 2016.

- [2] F. Alarcon, A. Riquelme, J. Peralta, J. Cruz, "Efectos del oxihidrógeno como aditivo en motores de combustión interna", Reserchgate, 2019.
- [3] A. Díaz, J. González, O. González, "Análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna", Revista UIS Ingenierías, vol. 17, pp. 143-154, 2018.
- [4] J. Barco, J. Durán, M. Mago, "Efecto de la adición de gas oxihidrógeno (HHO) en la mezcla aire/combustible en un motor de combustión interna", 3er. Congreso de Energía Sostenible, 2016.
- [5] G. Ajay, G. Venkateswara, "Performance characteristics of oxy Hydrogen gas on two stroke petrol engine", International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), vol. 6 (7), 2013.
- [6] A. El Soly, A. El Fatih, "Comparative experimental investigation of oxy-hydrogen (HHO) production rate using dry and wet cells", International Journal of Hydrogen Energy, vol.46, 2021.
- [7] A. Rif'ah, J. Pratilastiarso, H. Gayuh, "Performance and exhaust gas análisis of a four stroke engine using oxy hydrogen gas as supplementary fuel" International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications, 2018.
- [8] Ulf, Kivisäkk, "Influence of hydrogen on corrosion and stress induced cracking of stainless steel" Tesis doctoral, Royal Institute of Technology, Sandviken, Suiza, 2010.
- [9] T. Omura, "Corrosion Enginnering" vol. 58 (4), pp. 151-166, 2009.
- [10] N. Coro, D. Escobar, "Método electroquímico para la obtención de gas de Brown mediante celdas electrolíticas seca y húmeda" Bachelor degree Tesis, Universidad Central del Ecuador, Quito , Ecuador, 2017.