

Análisis de la variación de la resistencia eléctrica en celda de electrólisis alcalina mediante curvas de polarización I-V

Mario Guillermo Ponce-Hernández
Gerardo Marx Chávez-Campos

January 2026

Resumen

The present work studies the behavior of the electrical resistance of an alkaline electrolysis cell based on its I-V polarization curves. The experimental setup consists of a cell with flat AISI 304 stainless steel electrodes and a 1 M NaOH solution. The system is powered by a programmable DC power supply, and the measurements are performed using high-precision multimeters. A graphical user interface developed in Python is implemented for data acquisition and instrument control, using PyVISA as the communication interface with the instruments. Additionally, a PT1000 sensor is employed to measure the temperature of the electrolyte. The methodology consists of four experimental test rounds, during which the same pair of electrodes and the same electrolyte are used in order to observe variations in the resistance behavior throughout each test. It is expected that, based on the obtained data, the electrical resistance can be used to identify the degradation of the cell and to associate it with the regions where the main losses occur.

Palabras Claves: Electrólisis alcalina, Resistencia Eléctrica, Curva de Polarización, Temperatura, Corriente, Voltaje.

1. Introducción

Debe ser breve y sin subtítulos, debe indicarse claramente la importancia del tema, la justificación de la investigación. Hipótesis y los objetivos planteados.

El hidrógeno **H** es el elemento químico mas simple y pequeño, formado por un solo protón y un solo electrón. Debido a su simplicidad estructural, es el elemento mas abundante del universo, estando presente de forma masiva en las estrellas y los planetas gaseosos. En condiciones normales, el hidrógeno se encuentra en forma de molécula de gas diatómico, H_2 . Posee un valor elevado de energía por unidad de masa, significativamente mayor que el de los combustibles tradicionales.

La producción de hidrógeno tiene la ventaja de desacoplar la generación de energía con el consumo, cosa que viene a mitigar el problema de aleatoriedad en la disponibilidad de las energías renovables y su uso no produce emisiones de gases de efecto invernadero al ambiente. Existen diversas formas de generar hidrógeno, pero dos destacan por su mayor presencia: *Generación térmica* y *Electroquímica*. La producción de hidrógeno mediante procesos térmicos no es la mas limpia, ya que depende del uso de combustibles fósiles.

Se espera que el hidrógeno verde juegue un papel crucial en la transición energética, debido a que es una de las pocas opciones viables para des-carbonizar sectores difíciles de reducir tales como la industria metalúrgica y química. Proyecciones para el hidrógeno verde asciende a una demanda de 500 millones de toneladas en 2050.

La electrolisis es el proceso químico que utiliza energía eléctrica para inducir una reacción de oxidación-reducción no espontánea en una sustancia química. Este fenómeno ocurre en una celda electroquímica, donde una corriente eléctrica externa se aplica a través de electrodos sumergidos en un electrolito, provocando la descomposición de un compuesto químico en sus componentes fundamentales. En la electrolisis del agua, al aplicar un voltaje y una corriente continua, se promueve la disociación de las moléculas de agua (H_2O) en hidrógeno (H_2) y oxígeno (O), que se liberan en estado gaseoso.

La reacción básica de la electrolisis o disociación del agua se representa a través de la ecuación 1:



El proceso de la electrólisis se puede llevar a cabo por medio de dispositivos denominados *Electrolizadores*, sus componentes principales son los siguientes:

- Fuente de Alimentación.
- Electrodos.
- Electrolito.

Una de las tecnologías para llevar a cabo el procesos de electrólisis del agua es la electrólisis de agua alcalina. Este tipo de tecnología es de la mas implementada a escala industrial debido a su robustez, bajo costo y durabilidad, aunque presenta limitaciones en densidad de corriente y capacidad de respuesta dinámica. Las investigaciones se han centrado en mejorar la eficiencia de estos sistemas mediante la implementación de nuevos materiales o recubrimientos que ayuden a disminuir la degradación de los electrodos que son los elementos encargados de inyectar la energía eléctrica, así como la mejora del electrolito buscando aumentar la conductividad del medio.

Para poder evaluar el comportamiento de estos sistemas, se realizan mediciones por medio de las curvas de polarización. Una forma de encontrar información relevante sobre la contribución de cada uno de los elementos del sistema a partir de las curvas de polarización, es analizando la dependencia del potencial de la

celda con la densidad de corriente. Las contribuciones óhmicas hacia el potencial de la celda como lo es la resistencia del electrolito, tiene una dependencia lineal con la densidad de corriente, mientras que los sobre-potenciales tiene una dependencia logarítmica de acuerdo con la ecuación de *Tafel*. Por medio del análisis de las curvas de polarización es posible separar las contribuciones óhmicas de los otorgados por los sobre-potenciales.

La reducción de la resistencia óhmica es crucial para lograr una mayor densidad de corriente. Existen diversas razones para que esta resistencia crezca, estudios realizados por [ref47-13] reportan que la resistencia óhmica en sistemas equipados con membrana para la separación de gases tiende a aumentar debido a las nanoburbujas generadas en la interfaz membrana-electrodo. [ref47-22] reporta que la resistencia se puede ver afectada por el uso de distintos materiales en los electrodos, esto causa que la interfaz de conexión tenga una mayor oposición al flujo de corriente. [ref47 23,24] han observado variaciones en el rendimiento de la celda debido a diferentes niveles de compresión, esto es atribuido a la resistencia de contacto interfacial.

La mayoría de los estudios hacen uso de métodos como la *Espectroscopia de Impedancia Eléctrica (EIS)* para evaluar el estado interno de los sistemas electroquímicos. Sin embargo, este tipo de análisis suele realizarse en condiciones controladas y fuera del régimen operativo real, lo que limita su aplicabilidad durante la operación continua del sistema [ref60]. Si bien la *EIS* permite desglosar con precisión las variables internas (resistencia óhmicas, capacitancias y sobrepotenciales) y determinar que componente afecta mas significativamente el rendimiento [ref61], su implementación en tiempo real sigue siendo compleja y poco práctica en muchos entornos.

El presente trabajo propone un enfoque mas directo y funcional: realizar un monitoreo eléctrico continuo de las variables fundamentales del sistema, específicamente **voltaje** y **corriente**, durante su operación activa. Este monitoreo se lleva a cabo mediante dispositivos de alta resolución, lo que permite capturar con fidelidad el comportamiento dinámico del sistema frente a distintas pruebas de esfuerzo. Esta estrategia no solo simplifica el estudio, sino que también abre la posibilidad de detectar patrones de respuesta, fluctuaciones críticas y zonas de inestabilidad sin necesidad de interrumpir el proceso.

A diferencia de otros planteamientos que fragmentan el análisis separando cada componente o variable, aquí se propone una visión integrada: unificar el monitoreo eléctrico para obtener una lectura mas orgánica y representativa del sistema en su conjunto. Esta aproximación busca no solo facilitar el diagnóstico, sino también sentar las bases para futuras estrategias de control adaptativo y optimización energética.

2. Material y Métodos

Para obtener las curvas de polarización, se construyó un electrolizador alcalino básico con electrodos de acero inoxidable y *NaOH* como electrolito. El electrolizador se instrumentó con una fuente de *CD* programable y con equipos

de medición de alta resolución controlados mediante el protocolo *VISA*. Para garantizar la reproducibilidad de los experimentos, se desarrolló una interfaz en Python para adquirir automáticamente las variables eléctricas y obtener las curvas de polarización tensión-corriente del sistema. La Figura 1 muestra el diagrama general de la metodología implementada en el presente trabajo:

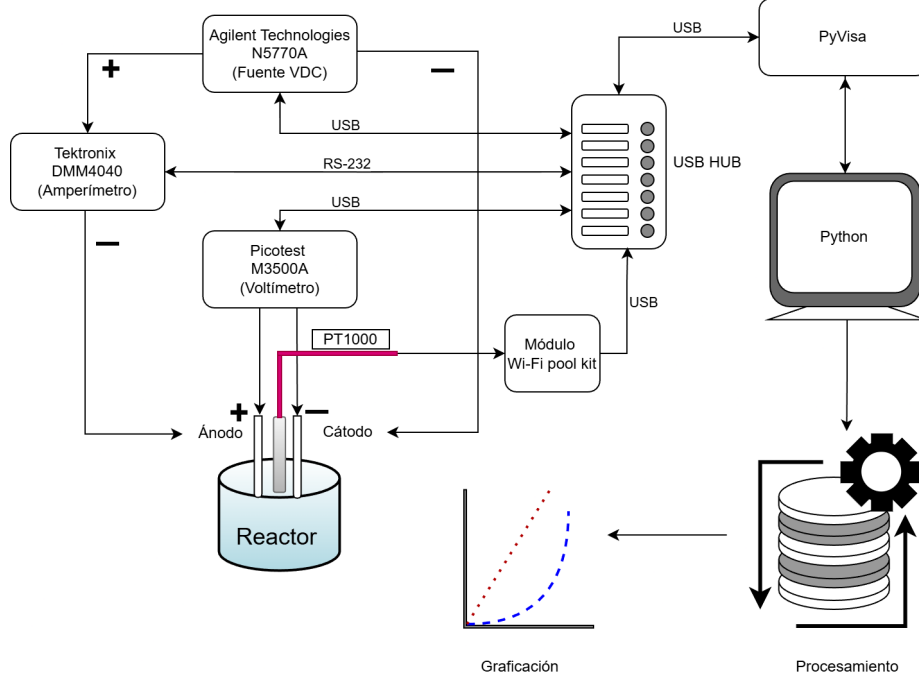


Figura 1: Diagrama de metodología para la caracterización del sistema.

2.1. Electrolizador

Desde la perspectiva de la identificación de sistemas, el electrolizador empleado se considera una planta experimental compuesta por un electrolizador de agua alcalino dividido en tres elementos fundamentales: electrodos, electrolito y carcasa. Los electrodos son los encargados de inyectar la corriente al electrolito para producir la electrólisis y, debido a su exposición directa a la reacción química, requieren materiales resistentes a la corrosión; por ello, se utilizan electrodos de *Acero Inoxidable 304* de calibre 22 ($0,740\text{mm approx}$), con un área expuesta de 90mm^2 y dimensiones totales de $20 \times 93\text{mm}$ definidas por el diseño de la carcasa. El electrolito es una solución 1M de *hidroxido de sodio* (NaOH) disuelta en agua destilada. Finalmente, la carcasa del sistema consiste en un recipiente de vidrio con una tapa impresa en 3D, fabricada en *polipropileno* (*PPP*) para asegurar resistencia química y evitar daños por corrosión, garantizando así una operación adecuada del electrolizador. La Figura 2 muestra la planta experimental en

donde se realizarán las pruebas.



Figura 2: Planta experimental.

2.2. Instrumentos de Medición

El sistema ha sido alimentado con una fuente programable de CD *Agilent NA5770A*, capaz de suministrar $1500W$. El voltaje entre el ánodo y el cátodo se mide con un multímetro de precisión *Picotest M3500A*, con resolución de $10\mu V(10E^{-12})$, ambos dispositivos tienen resolución global de pantalla $6\frac{1}{2}$ dígitos; véase la Figura 3.

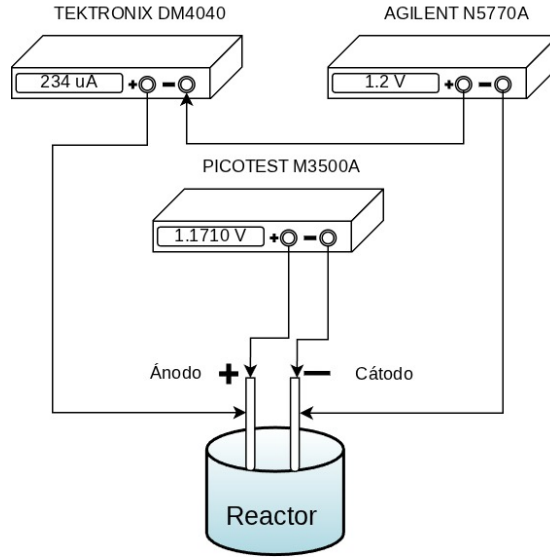


Figura 3: Diagrama de conexión de instrumentos.

2.3. Adquisición de Datos

Los instrumentos de medición utilizan el protocolo *VISA* (*Virtual Instrument Software Architecture*), una *API* (*Interfaz de Programación de Aplicaciones*) estandarizada para comunicarse con equipos de pruebas mediante *USB* y *RS-232*. Para gestionar esta comunicación se emplea *NI-VISA*, mientras que la librería *PyVisa* permite que *Python* controle los instrumentos mediante comandos *SCPI* (*Standard Commands for Programmable Instruments*) y automatice las lecturas. Sobre esta base se desarrolla una interfaz gráfica que muestra las variables medidas y calcula parámetros derivados, registrándolos en una tabla para su análisis posterior. Esta tabla incluye: *Número de Muestra*, *Voltaje Inyectado*, *Voltaje Electrodo*, *Corriente Electrodo*, *Corriente Inyectada*, *Resistencia*, *Temperatura* y *Observaciones*.

2.4. Flujo de Experimentación

Para la caracterización del sistema se plantea el siguiente flujo de trabajo. El estudio se divide en dos experimentos los cuales se llevarán acabo de la misma forma, buscando igualar las condiciones iniciales y de operación. Existen ciertas variables como la temperatura ambiente que no se puede controlar, por lo que cada experimento en principio puede tener diferentes valores de temperatura. Cada experimento consta de cuatro rondas, además de los valores obtenidos por medio del sistema de adquisición de datos, se lleva acabo un registro en una bitácora de operación, la cual lleva un control sobre las observaciones realizadas

antes y después de una ronda. La bitácora contiene los siguientes campos:

1. Mediciones: En esta se especifica la forma en la que va a inyectar el voltaje en la celda, la forma en que se hacen las mediciones de voltaje y corriente.
2. Solución (Electrolito): Se especifica la fecha en la que se realizó la solución original, se indica el PH inicial y final, así como la cantidad de electrolito.
3. Electrodo: Se indican la matrícula correspondiente al ánodo y cátodo, el número de usos acumulados, el tamaño del electrodo así como la superficie sumergida y el material del electrodo.
4. Observaciones Finales de la Ronda: Se realizan notas sobre el comportamiento del sistema a lo largo de la caracterización.

En cada experimento se hará uso del mismo par de electrodos así como el electrolito, esto con el objetivo de observar si el desgaste de estos componentes influyen en el comportamiento de las variables eléctricas. Cada ronda tendrá el siguiente flujo de trabajo.

1. Se aplican incrementos de 0,1 V en la inyección de voltaje hacia la planta experimental, avanzando paso a paso hasta alcanzar el límite de corriente que puede suministrar la fuente de alimentación, en este caso de 10,5 A
2. Se espera un tiempo aproximado de 1 mín entre pasos para la estabilización de la medición.
3. Se establece un promedio de 5 muestras para la toma de cada parámetro.

Una vez concluida la ronda, se obtiene una tabla como la que se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1: Ejemplo de tabla al finalizar una ronda.

No Muestra	Vol Iny	Vol Elec	Corr Elec	Corr Iny	Res	Temp
1	2.5 V	2.3 V	0.12 A	0.15 A	20	25 °C
2	3.0 V	2.8 V	0.20 A	0.22 A	18	27 °C
3	3.5 V	3.2 V	0.25 A	0.28 A	15	30 °C
.

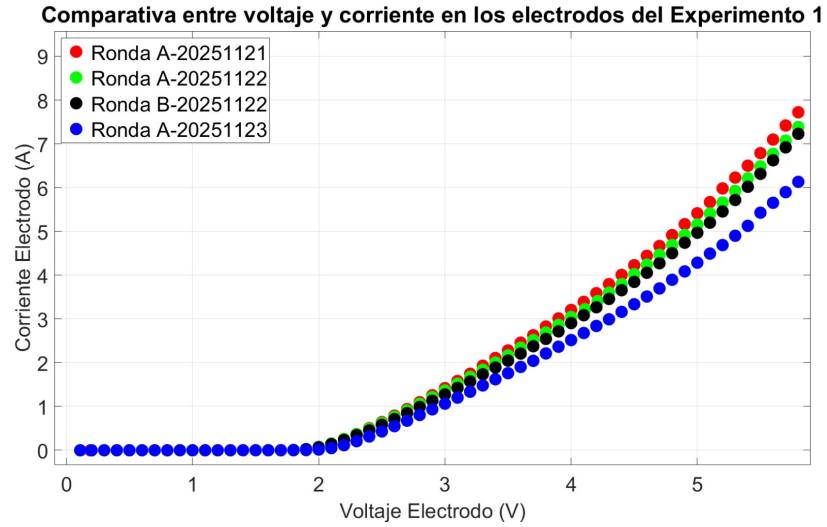
3. Resultados y Discusiones

El Cuadro 2 muestra algunos datos producto del resultado de la ronda A correspondiente al Experimento 1.

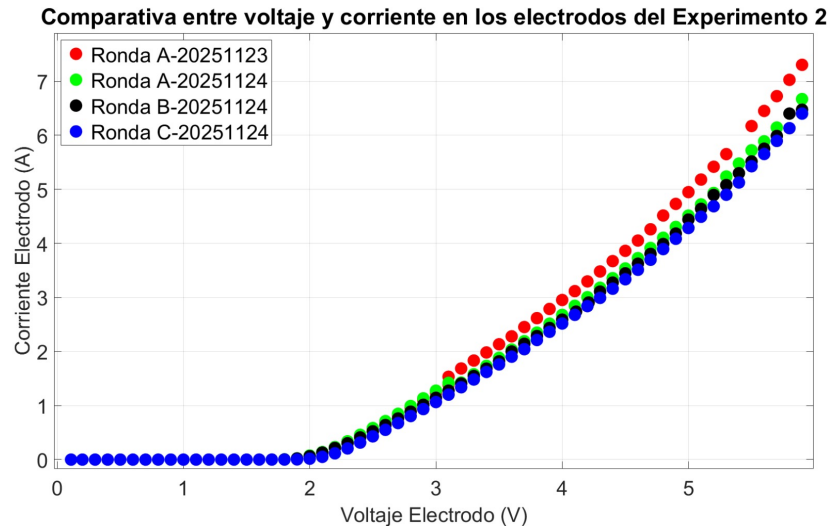
Cuadro 2: Tabla representativa de datos de la *RONDA-A-20251121* del *Experimento 1*. No se incluyen todos los valores.

No Muestra	Vol Iny	Vol Elec	Corr Elec	Corr Iny	Res	Temp
10	1.0 V	0.969 V	0.000210 A	0.001 A	4606,84 Ω	21.49 °C
11	1.1 V	1.071 V	0.000271 A	0.001 A	3923,31 Ω	21.51 °C
12	1.2 V	1.171 V	0.000234 A	0.001 A	5014,92 Ω	21.52 °C
13	1.3 V	1.270 V	0.000225 A	0.001 A	5636,44 Ω	21.56 °C
14	1.4 V	1.370 V	0.000225 A	0.001 A	6082,10 Ω	21.54 °C
15	1.5 V	1.470 V	0.000309 A	0.001 A	4751,88 Ω	21.55 °C
16	1.6 V	1.572 V	0.000426 A	0.001 A	3688,75 Ω	21.58 °C
17	1.7 V	1.672 V	0.000487 A	0.001 A	3431,58 Ω	21.6 °C
18	1.8 V	1.771 V	0.000806 A	0.001 A	2197,29 Ω	21.62 °C
19	1.9 V	1.871 V	0.003639 A	0.010 A	514,22 Ω	21.64 °C
20	2.0 V	1.969 V	0.016564 A	0.100 A	118,912 Ω	21.67 °C
21	2.1 V	2.060 V	0.050870 A	0.100 A	40,5084 Ω	21.7 °C
22	2.2 V	2.144 V	0.116211 A	0.870 A	18,4545 Ω	21.73 °C
23	2.3 V	2.222 V	0.207145 A	0.870 A	10,7311 Ω	21.75 °C
24	2.4 V	2.299 V	0.315034 A	0.870 A	7,299 04 Ω	21.78 °C
25	2.5 V	2.371 V	0.430436 A	0.870 A	5,510 49 Ω	21.88 °C
26	2.6 V	2.442 V	0.551020 A	0.919 A	4,433 50 Ω	21.9 °C
27	2.7 V	2.513 V	0.675942 A	0.919 A	3,718 50 Ω	22.0 °C
28	2.8 V	2.585 V	0.806100 A	1.074 A	3,207 28 Ω	22.11 °C
29	2.9 V	2.655 V	0.934523 A	1.231 A	2,841 43 Ω	22.24 °C
30	3.0 V	2.724 V	1.064797 A	1.395 A	2,559 03 Ω	22.41 °C
31	3.1 V	2.794 V	1.201838 A	1.561 A	2,325 47 Ω	22.57 °C
32	3.2 V	2.864 V	1.338410 A	1.733 A	2,139 91 Ω	22.83 °C
33	3.3 V	2.936 V	1.481502 A	1.733 A	1,981 82 Ω	23.02 °C
34	3.4 V	3.004 V	1.621473 A	1.902 A	1,852 96 Ω	23.34 °C
35	3.5 V	3.073 V	1.761034 A	2.07 A	1,745 15 Ω	23.55 °C

Una vez que se obtienen los datos se realiza un procesamiento, en este procesamiento se realiza una comparación en el comportamiento de las variables durante las 4 rondas. La Figura 4a y la Figura 4b muestran una comparación entre la curva de la corriente en las cuatro rondas correspondientes a sus experimentos.



(a) Gráfica comparativa de las 4 rondas entre Voltaje y Corriente en los Electrodos del Experimento 1

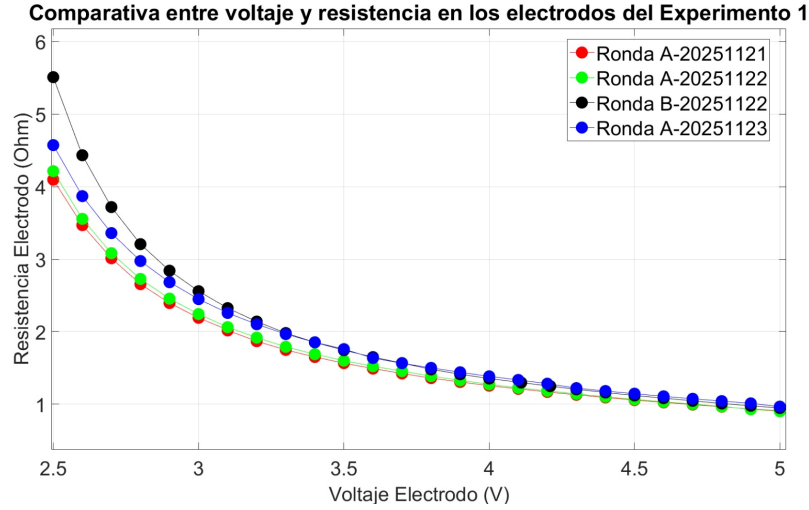


(b) Gráfica comparativa de las 4 rondas entre Voltaje y Corriente en los Electrodos del Experimento 2

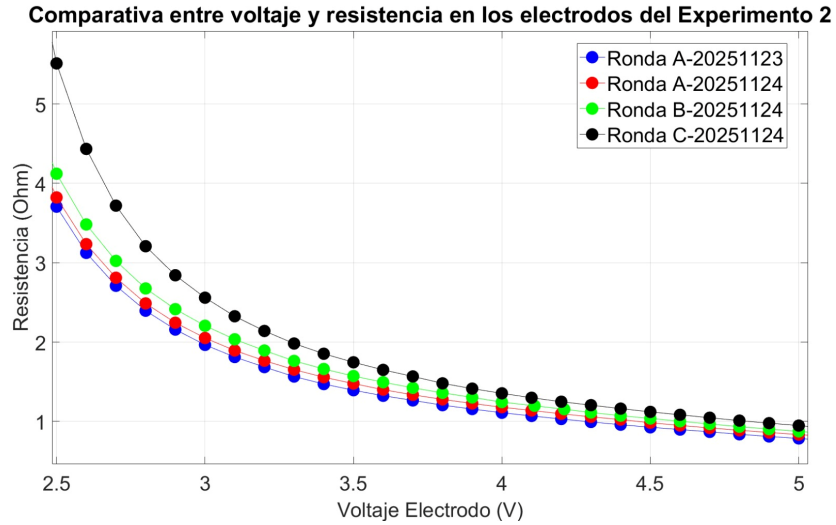
Figura 4: Gráficas comparativa entre Voltaje y Corriente en los Electrodos correspondiente a los Experimentos 1 y 2.

En la Figura 5a y 5b, se muestra una comparativa entre los valores del voltaje y la resistencia en una ventana de $2,5\text{ V} - 5\text{ V}$ correspondiente al Experimento 1 y 2. Se selecciona este rango para graficar debido a que al principio del estudio al no haber un flujo de corriente, el valor de la resistencia es muy alto, por lo

que no se puede apreciar de mejor manera el cambio del valor.



(a) Gráfica comparativa de las 4 rondas entre Voltaje y Resistencia Eléctrica del Experimento 1.

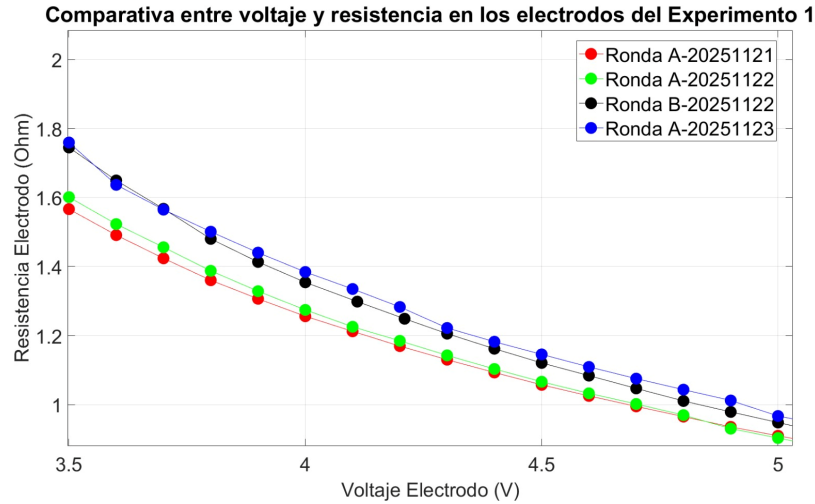


(b) Gráfica comparativa de las 4 rondas entre Voltaje y Resistencia Eléctrica del Experimento 2.

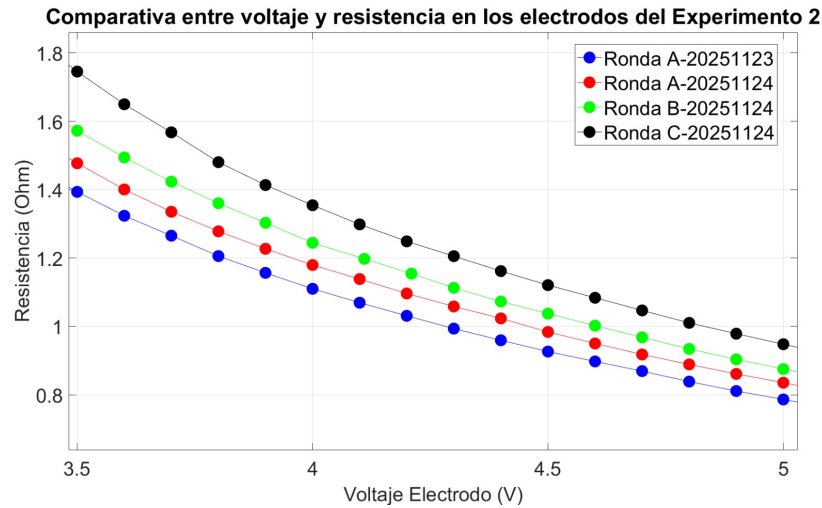
Figura 5: Gráficas comparativa entre Voltaje y la Resistencia eléctrica correspondiente a los Experimentos 1 y 2.

Como se puede apreciar en las Figuras 5a y 5b, al inicio se puede apreciar una caída abrupta del valor de la resistencia eléctrica, esto dentro del rango 2,5 V – 3,5 V. Posterior a este valor el comportamiento tiende a tener una estabilidad

al grado de poder deducir que se tiene el mismo valor, sin embargo, los valores no son los mismos. Debido a esto se realiza nuevas gráficas eligiendo los valores que se encuentran dentro del rango $3,5\text{ V} - 5\text{ V}$.



(a) Gráfica comparativa de las 4 rondas entre Voltaje y Resistencia Eléctrica del Experimento 1 dentro del rango de $3,5\text{ V} - 5\text{ V}$



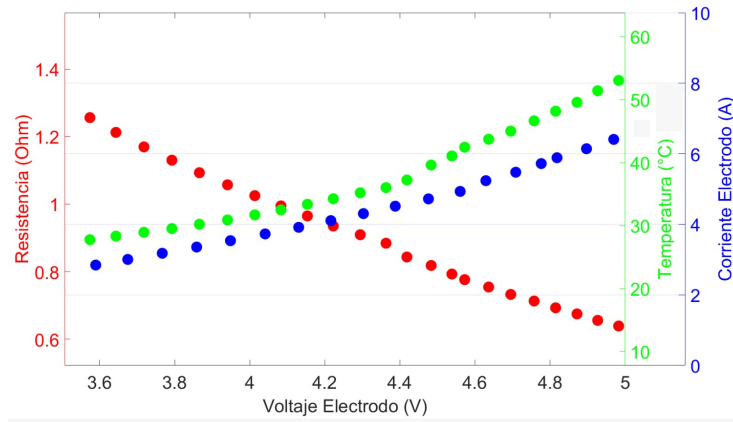
(b) Gráfica comparativa de las 4 rondas entre Voltaje y Resistencia Eléctrica del Experimento 2 dentro del rango de $3,5\text{ V} - 5\text{ V}$.

Figura 6: Gráficas comparativa entre Voltaje y la Resistencia eléctrica correspondiente a los Experimentos 1 y 2 dentro del rango $3,5\text{ V} - 5\text{ V}$.

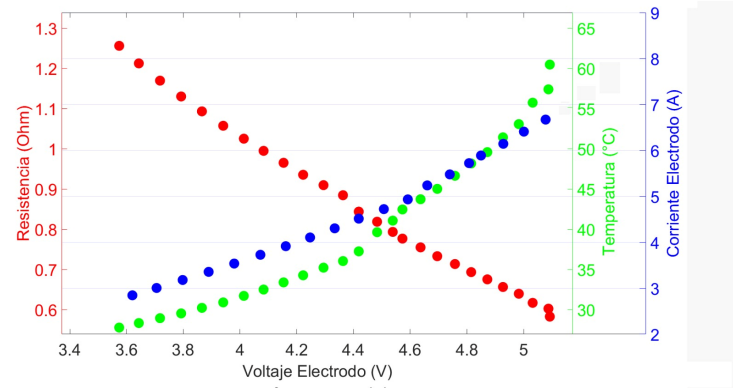
Las Figuras 6a y 6b muestran un acercamiento a un rango de valores mas

chico, sin embargo, se puede apreciar como aunque los valores de la resistencia son mucho menores a los anteriores existe una variación significativa, por lo que no tiene ningún comportamiento estable y los valores dentro de las rondas son distintos.

Las últimas comparaciones corresponden a las Figuras 7a y 7b, donde se aprecia el cambio de la resistencia, temperatura y corriente, respecto al voltaje en los electrodos. Al igual que las Figuras 6a y 6b se opta por un rango menor para poder apreciar mejor el cambio y poder observar su relación entre las variables.



(a) Gráfica comparativa entre la Corriente, Resistencia y Temperatura dentro del rango 3,5 V – 5 V correspondiente al Experimento 1.



(b) Gráfica comparativa entre la Corriente, Resistencia y Temperatura dentro del rango 3,5 V – 5 V correspondiente al Experimento 2.

Figura 7: Gráficas comparativa Resistencia, Temperatura, Corriente contra el Voltaje en los electrodos correspondiente a los Experimentos 1 y 2 dentro del rango 3,5 V – 5 V.

3.1. Discusiones

3.1.1. Análisis de Voltaje y Corriente en los Electrodos.

El estudio [ref-pendiente] reporta que los valores en los cuales el sistema comienza a tener un flujo de corriente en el medio corresponde al rango de voltaje $1,1\text{ V} - 1,3\text{ V}$, esto se reporta de manera correcta en las 4 rondas del Experimento 1 y 2. Sin embargo, el valor donde a simple vista se puede apreciar que comienza la separación de los elementos H_2 y O ronda en los valores de $1,8\text{ V} - 1,9\text{ V}$ teniendo reproducibilidad en las 4 rondas tanto del Experimento 1 y 2.

A partir de los valores de $1,8\text{ V} - 1,9\text{ V}$ el comportamiento de la corriente en los electrodos tiene una tendencia a crecer, sin embargo, existe una gran diferencia entre los valores de una ronda a otra. Como se estipuló antes, durante un experimento los componentes correspondientes a los electrodos y electrolito no fueron sustituidos. La degradación que sufrieron los electrodos y los electrolitos entre cada ronda se vio reflejado en la conducción de corriente. Como se puede apreciar en la Figura 4a los valores correspondientes a la *RONDA A-20251121* y *RONDA A-20251123* del *Experimento 1*, existe una diferencia promedio de corriente de al menos 94 mA teniendo como pico máximo de diferencia el valor de $273,94\text{ mA}$. Analizando los valores correspondientes del *Experimento 2* de la *RONDA A-20251123* y *RONDA C-20251124* se tiene que la diferencia de promedio de corriente es de $248,37\text{ mA}$ y la diferencia máxima es de $562,8\text{ mA}$.

3.1.2. Análisis de Resistencia y Voltaje en los Electrodos

El cálculo de la resistencia se dio a partir de la *Ley de Ohm* la cual corresponde a la Ecuación 2:

$$V = I * R \rightarrow R = \frac{V}{I} \quad (2)$$

Donde V corresponde al $V_{\text{electrodos}}$ y I a $I_{\text{electrodos}}$. Como se muestra en las Figuras 4a y 4b, al inicio del estudio no existe algún flujo de corriente por lo que el valor de la resistencia es muy grande, sin embargo, una vez que se rompe la barrera de conducción y empieza la generación de gas el valor de la resistencia tiene una caída abrupta. La variación del valor de la resistencia en el *Experimento 1* correspondiente a la *RONDA A-20251121* dentro del rango de $1,8\text{ V} - 2,5\text{ V}$ tiene una diferencia de 2192Ω , esto representa una caída del $99,77\%$. En el *Experimento 2* en la *RONDA A-20251123* dentro del mismo rango de voltaje se reporta un cambio en el valor de la resistencia de $1833,6244\Omega$ esto representa una caída del $99,76\%$, aunque el cambio del valor de la resistencia es diferente del *Experimento 1* y *Experimento 2* la variación en porcentaje es el mismo por lo que el comportamiento es similar.

Como se puede apreciar las Figuras 5a y 5b al inicio se puede ver una caída abrupta de del valor de la resistencia en las 4 rondas, tanto para el *Experimento 1* y *2*. Sin embargo, la tendencia que marca en estas gráficas da la impresión que el valor de la resistencia se estabiliza e inclusive que los valores en las 4 rondas se iguala. Realizando un acercamiento y tomando un rango de valores para el

análisis de $3,5\text{ V} - 5\text{ V}$ se puede apreciar una diferencia muy significativa entre los valores de la resistencia respecto de la primera y última ronda. Analizando las rondas correspondientes a *RONDA-A-20251121* y *RONDA-A-20251123* del *Experimento 1* se tiene que existe una diferencia promedio de $23,63\text{ m}\Omega$. En el caso de las rondas *RONDA-A-20251123* y *RONDA-C-20251124* del *Experimento 2* la variación dentro del mismo rango de análisis es en promedio $145,56\text{ m}\Omega$.

3.1.3. Análisis de Curvas de Corriente en Electrodos, Temperatura y Resistencia.

[referencia-pendiente] reportan que al aumentar la temperatura del electrolito el flujo de corriente aumenta, por ende la resistencia que existe en el medio tendrá una tendencia a disminuir. Como se muestran en las Figuras 7a y 7b la tendencia del valor de la resistencia es a disminuir conforme aumenta la temperatura. El cambio que se reporta en el *Experimento 1* es de $1,745\,154\,\Omega$ a $0,947\,94\,\Omega$ lo que representa una diferencia de $0,797\,214\,\Omega$ que equivale a una disminución del $45,68\%$. En esta misma ventana tenemos un aumento de temperatura de $8,58^\circ\text{C}$ lo cual representa un 36% , hubo un aumento de $0,5362^\circ\text{C}$ por cada punto capturado en esta ventana. En el *Experimento 2* en la misma ventana de análisis, hubo una disminución en el valor de la resistencia, paso de $1,39\,\Omega$ a $0,768\,543\,\Omega$, la diferencia es de $0,627\,433\,\Omega$ lo que representa un $44,95\%$. El aumento de temperatura en esta misma ventana se reporta que fue $8,96^\circ\text{C}$ lo que representa el 38% , hubo un aumento de $0,56^\circ\text{C}$ por cada punto capturado en esta ventana. Como se puede apreciar los cambios generados reportados en tanto en la temperatura y la resistencia en ambos experimentos en la misma ventana de análisis no presentan una gran diferencia, lo que nos dice que hubo una buena reproducibilidad del experimento.

4. Conclusiones

El presente trabajo permitió analizar de manera sistemática la variación de la resistencia eléctrica en una celda de electrólisis alcalina mediante el estudio de curvas de polarización $V-I$, empleando una instrumentación de alta resolución y un esquema de adquisición automatizado. A partir de los resultados obtenidos, se evidenció que el monitoreo continuo de variables eléctricas fundamentales constituye una herramienta efectiva para evaluar el comportamiento dinámico del sistema bajo condiciones reales de operación.

El análisis de las curvas $V-I$ en los electrodos mostró una alta reproducibilidad en el voltaje de activación del sistema, identificándose consistentemente el inicio del flujo de corriente dentro del rango de $1,1\text{ V}$ a $1,3\text{ V}$, y una generación de gas claramente observable a partir de $1,8\text{ V}$ a $1,9\text{ V}$ en todas las rondas correspondientes a los *Experimentos 1* y *2* (4a y 4b). No obstante, a partir de este punto se observaron diferencias significativas en la magnitud de la corriente entre rondas consecutivas. Estas variaciones, que alcanzaron diferencias máximas superiores a 500 mA entre rondas, evidencian el efecto acumulativo de la

degradación de los componentes del sistema sobre su capacidad de conducción eléctrica.

El comportamiento de la resistencia eléctrica calculada mediante la *Ley de Ohm* confirmó una caída abrupta una vez superada la barrera de conducción, registrándose reducciones superiores al 99,7 % dentro del rango de 1,8 V a 2,5 V en ambos experimentos. Este fenómeno refleja el cambio de régimen previo a la electrólisis activa hacia una condición dominada por procesos electroquímicos y pérdidas óhmicas más controladas. Sin embargo, aunque las gráficas globales sugieren una aparente estabilización de la resistencia a voltajes superiores, el análisis detallado en el rango de 3,5 V a 5 V (6a y 6b) permitió identificar variaciones sutiles pero significativas entre rondas, con diferencias promedio del orden de decenas a cientos de mili-ohms, asociadas al desgaste progresivo de electrodos y a cambios en el electrolito.

Asimismo, la evaluación conjunta de resistencia, corriente y temperatura evidenció una relación inversa clara entre la resistencia eléctrica y el incremento térmico del electrolito (7a y 7b). En ambos experimentos se observó una disminución cercana al 45 % en la resistencia dentro de la ventana de análisis seleccionada, acompañada por un incremento térmico aproximado de 9 °C, lo que confirma que el aumento de temperatura favorece la conductividad del medio. La similitud de estos resultados entre experimentos demuestra una adecuada reproducibilidad del sistema y válida la metodología experimental empleada.

En conjunto, los resultados obtenidos confirman que la resistencia eléctrica puede utilizarse como un indicador indirecto del estado de la celda y de su degradación progresiva durante la operación. El enfoque propuesto, basado en el análisis de curvas de polarización y en la medición directa de variables eléctricas, ofrece una alternativa práctica y funcional para el diagnóstico y seguimiento de celdas de electrólisis alcalina en condiciones reales. Finalmente, este trabajo sienta las bases para el desarrollo de estrategias futuras de monitoreo en tiempo real, control adaptativo y optimización energética orientada a mejorar el desempeño y la vida útil de sistemas de producción de hidrógeno.

Acknowledgments

Funding information