

Sistema de bajo costo para la caracterización electroquímica del supercapacitor $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$ /Grafeno

Low-cost system for the electrochemical characterization of $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$ /Graphene supercapacitor

Jorge Ordoñez Briones ^a, Naveen Kumar Reddy Bogireddy ^b, Francisco E. Morales López ^c,
 Cristian A. Ospina De La Cruz ^d, Dulce Y. Medina Velazquez ^{e*}

Abstract:

The electrochemical characterization of new materials for energy storage requires specialized equipment whose high cost limits access in academic environments with limited resources. In this work, a low-cost Arduino-based potentiostat is implemented for the characterization of a supercapacitor fabricated with a composite material of erbium-doped lanthanum oxide ($\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$) and graphene. The storage device was constructed on aluminum current collectors of 2×3 cm (active area 4.16 cm^2), using a graphene solution in acetone dispersed by ultrasonication and deposited by drop-casting (≈ 10 mg of graphene), while $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$ (≈ 10 mg) was applied as a powder on a single electrode. After drying and hot pressing at 120°C , the electrodes were assembled with a porous paper separator impregnated with 5 mL of phosphoric acid (H_3PO_4) as electrolyte. Cyclic voltammetry (VC) measurements between -0.5 V and $+0.5$ V at 20 mV/s showed a curve deviating from the ideal rectangle, evidencing pseudocapacitance associated with $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$. From the VC data, a specific capacitance of 1.36 F/g was calculated. Chronoamperometry (CA) revealed an initial current peak of $14,000 \mu\text{A}$ with exponential decay (time constant ≈ 0.4 s), confirming the device's high-speed response. This work demonstrates the feasibility of using low-cost instrumentation for electrochemical research and suggests the potential of the $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$ /Graphene composite material for energy storage applications.

Keywords:

Graphene, $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$, potentiostat, supercapacitor, cyclic voltammetry.

Resumen:

La caracterización electroquímica de nuevos materiales para almacenamiento de energía requiere equipos especializados cuyo alto costo limita su acceso en entornos académicos con recursos limitados. En este trabajo se implementa un potenciostato de bajo costo basado en Arduino para la caracterización de un supercapacitor fabricado con un material compuesto de óxido de lantano dopado con erbio ($\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$) y grafeno. El dispositivo de almacenamiento se construyó sobre colectores de aluminio de 2×3 cm (área activa 4.16 cm^2), utilizando una solución de grafeno en acetona dispersada mediante ultrasonido y depositada por goteo (≈ 10 mg de grafeno), mientras que el $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$ (≈ 10 mg) se aplicó en polvo sobre un solo electrodo. Tras el secado y planchado a 120°C , los electrodos se ensamblaron con un separador de papel poroso impregnado con 5 mL de ácido fosfórico (H_3PO_4) como electrolito, sellando los bordes con silicona y conectando terminales de cinta de cobre. Las mediciones de voltametría cíclica (VC) entre -0.5 V y $+0.5$ V a 20 mV/s mostraron una curva con desviaciones del rectángulo ideal, evidenciando pseudocapacitancia asociada al $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$. A partir de los datos de VC se calculó una capacitancia específica de 1.36 F/g . La cronoamperometría (CA) reveló un pico de corriente inicial de $14,000 \mu\text{A}$ con un decaimiento exponencial (constante de tiempo ≈ 0.4 s), confirmando la alta velocidad de respuesta del dispositivo.

^a Universidad Autónoma de Tlaxcala | Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología | Apizaco-Tlaxcala | México, <https://orcid.org/0009-0009-0677-6030>, Email: 20231714@uatx.mx

^b Universidad Nacional Autónoma de México | Instituto de Ciencias Físicas | Cuernavaca-Morelos | México, <https://orcid.org/0000-0002-9392-926X>, Email: naveen@icf.unam.mx

^c Universidad Autónoma de Tlaxcala | Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología | Apizaco-Tlaxcala | México, <https://orcid.org/0009-0003-5986-9552>, Email: franciscoepimenio.morales.l@uatx.mx

^d Universidad Politécnica del Estado de Morelos | Programa de Ingeniería en Computación | Cuernavaca-Morelos | México, <https://orcid.org/0000-0002-9609-3031>, Email: crisalod@gmail.com

^e Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma de Tlaxcala | Facultad de Ciencias Básicas Ingeniería y Tecnología | Apizaco-Tlaxcala | México, <https://orcid.org/0000-0001-7021-8804>, Email: dymedinav@uatx.mx

Este trabajo demuestra la viabilidad de utilizar instrumentación de bajo costo para investigación electroquímica y sugiere el potencial del material compuesto $\text{La}_2\text{O}_3:\text{Er}$ /Grafeno para aplicaciones de almacenamiento de energía.

Palabras Clave:

Grafeno, $\text{La}_2\text{O}_3:\text{Er}$, potencióstato, supercapacitor, voltametría cíclica.

Introducción

El almacenamiento eficiente de energía se ha convertido en uno de los desafíos tecnológicos más críticos del siglo XXI. La transición hacia fuentes de energía renovable, como la solar y la eólica, junto con la creciente adopción de vehículos eléctricos y dispositivos electrónicos portátiles, ha generado una demanda sin precedentes de sistemas de almacenamiento que puedan entregar energía de manera rápida, confiable y sostenible [1]. En este contexto, los supercapacitores, también conocidos como capacitores electroquímicos, han emergido como una tecnología clave que complementa a las baterías convencionales. A diferencia de estas últimas, que almacenan energía mediante reacciones químicas en todo el volumen del material activo, los supercapacitores lo hacen mediante mecanismos predominantemente superficiales (doble capa eléctrica y pseudocapacitancia), lo que les confiere características únicas como: tiempos de carga y descarga en segundos o incluso fracciones de segundo, ciclos de vida que superan el millón de operaciones, y una seguridad operativa superior al evitar reacciones químicas violentas [2].

Para comprender el funcionamiento de un supercapacitor, es necesario analizar los fenómenos que ocurren a nivel microscópico durante los procesos de carga y descarga. Cuando se aplica un voltaje entre los dos electrodos del dispositivo, los electrones se desplazan desde el electrodo negativo hacia el electrodo positivo a través del circuito externo [2]. Simultáneamente, en el electrolito que impregna el separador y los poros de los electrodos, los iones positivos (cationes) migran hacia el electrodo negativo, mientras que los iones negativos (aniones) lo hacen hacia el electrodo positivo [2]. Esta acumulación de iones en la interfaz electrodo-electrolito da lugar a la formación de una doble capa eléctrica, una estructura en la que las cargas se separan a distancias moleculares [2]. La energía queda almacenada en forma de campo eléctrico a través de esta capa, sin que ocurran reacciones químicas en el material del electrodo, lo que se conoce como mecanismo de doble capa eléctrica (EDLC) [11].

Sin embargo, en ciertos materiales, además de la acumulación electrostática de iones, ocurren reacciones redox rápidas y reversibles en la superficie del electrodo cuando se aplica un potencial. Estas reacciones implican transferencia de carga (procesos faradaicos), pero a

diferencia de lo que ocurre en las baterías, se limitan estrictamente a la superficie o a las capas más externas del material, lo que permite mantener altas velocidades de carga y descarga [3]. Este fenómeno, denominado pseudocapacitancia, puede incrementar significativamente la capacitancia total del dispositivo, ya que cada reacción redox aporta una cantidad adicional de carga almacenada [3,11]. La combinación de ambos mecanismos —doble capa eléctrica y pseudocapacitancia— es la base para el desarrollo de supercapacitores de alto rendimiento.

El grafeno, una forma bidimensional del carbono en la que los átomos se disponen en una estructura hexagonal [4], ha sido ampliamente estudiado como material para electrodos de supercapacitores debido a su excepcional conductividad eléctrica, su alta superficie específica teórica y su estabilidad química y mecánica [4]. Sin embargo, la capacitancia del grafeno puro está limitada por el mecanismo de doble capa. Para superar esta limitación, se han explorado diversas estrategias, entre las que destaca la incorporación de materiales pseudocapacitivos, como óxidos metálicos, que pueden aportar un término adicional de capacitancia a través de reacciones redox superficiales [5].

Los óxidos metálicos presentan capacitancias teóricas muy elevadas gracias a su comportamiento pseudocapacitivo. Por ejemplo, el óxido de rutenio (RuO_2) puede alcanzar valores superiores a 1000 F/g, lo que lo convierte en uno de los materiales más prometedores para esta aplicación [5]. Sin embargo, su alto costo y toxicidad limitan su uso a aplicaciones militares o aeroespaciales. En contraste, el óxido de lantano (La_2O_3) es un material de bajo costo, abundante en la corteza terrestre y con propiedades dieléctricas interesantes [6]. El dopaje con erbio (Er) introduce defectos en la estructura cristalina del La_2O_3 , generando vacantes de oxígeno y sitios activos que pueden participar en reacciones redox con los iones del electrolito, potenciando así su comportamiento pseudocapacitivo [6,7].

Para evaluar el rendimiento de estos nuevos materiales, es fundamental disponer de técnicas electroquímicas que permitan estudiar su respuesta bajo condiciones controladas de potencial y tiempo. La voltametría cíclica (VC) es una de las técnicas más utilizadas en este ámbito. Consiste en variar linealmente el potencial del electrodo de trabajo entre dos límites establecidos (barrido) y

registrar la corriente resultante [8,12]. La curva obtenida, que representa la corriente en función del potencial, proporciona información valiosa sobre los mecanismos de almacenamiento de carga: en un capacitor ideal de doble capa, la curva presenta una forma rectangular; la presencia de pseudocapacitancia genera desviaciones de esta forma, manifestándose como picos o zonas de corriente no constante [8]. Por otro lado, la cronoamperometría (CA) consiste en aplicar un escalón de potencial (un cambio brusco) y registrar la corriente en función del tiempo [8,12]. La respuesta inicial, en particular el pico de corriente está relacionada con la velocidad de formación de la doble capa eléctrica y la rapidez de las reacciones superficiales, lo que permite evaluar la velocidad de respuesta del dispositivo [8].

La realización de estas técnicas requiere el uso de un potenciostato, un instrumento electrónico especializado que mantiene el potencial del electrodo de trabajo en un valor determinado mientras mide la corriente que fluye a través de él [13,14,15]. Los potenciostatos comerciales ofrecen alta precisión y versatilidad, pero su costo es elevado (desde 5 000 € $\approx$ 110 000 MXN). Este costo representa una barrera significativa para estudiantes e investigadores en instituciones académicas con recursos limitados, así como para laboratorios en países en desarrollo. Estas iniciativas, basadas en microcontroladores como Arduino, han demostrado que es posible construir potenciostatos funcionales con una fracción del costo de los equipos comerciales, manteniendo una precisión suficiente para aplicaciones de investigación básica y educativa [9,10, 13,14,15].

Si bien existen reportes de potenciostatos de bajo costo basados en Arduino [5,9], la mayoría se enfoca en el diseño electrónico sin una validación cuantitativa exhaustiva con materiales electroquímicos reales, y pocos reportan parámetros como capacitancia específica o constante de tiempo. Esta falta de validación completa constituye la brecha que el presente trabajo busca atender.

El presente trabajo tiene como objetivos: (i) implementar un potenciostato de bajo costo basado en la plataforma Arduino; (ii) fabricar un supercapacitor utilizando un material compuesto de $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$ y grafeno; (iii) caracterizar el comportamiento electroquímico del dispositivo mediante voltametría cíclica y cronoamperometría; y (iv) demostrar la viabilidad de utilizar instrumentación de bajo costo para investigación electroquímica en entornos académicos.

Metodología

El estudio es de tipo experimental, descriptivo, transversal, con enfoque cuantitativo. A continuación, se describe el procedimiento de fabricación del

supercapacitor, el diseño y construcción del potenciostato, las condiciones experimentales y el método de análisis de datos.

Fabricación del supercapacitor

Para la fabricación del dispositivo se emplearon láminas de aluminio de 2 cm $\times$ 3 cm como colectores de corriente. Los materiales activos fueron polvo de grafeno (depositado en el cátodo) y óxido de lantano dopado con erbio ($\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$, depositado en el ánodo), logrando una configuración asimétrica que permite evaluar la contribución específica del óxido. Como electrolito se utilizó ácido fosfórico (H_3PO_4), y como separador se empleó papel poroso. Se fabricaron 3 supercapacitores para evaluar la reproducibilidad, y cada uno se sometió a 5 ciclos de medición por técnica electroquímica.

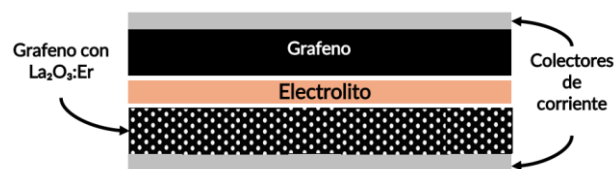


Figura 1. Esquema del supercapacitor ensamblado. Se indican los colectores de aluminio (gris), las capas de grafeno (negro), la capa de $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$ (puntos blancos) solo en un electrodo, el separador con electrolito (naranja).

Paso 1: Limpieza de los colectores. Las láminas de aluminio se limpiaron con alcohol para eliminar cualquier residuo superficial que pudiera afectar la adhesión del material activo. Se dejó un extremo de 0.5 cm sin recubrir en cada lámina para conectar posteriormente las terminales.

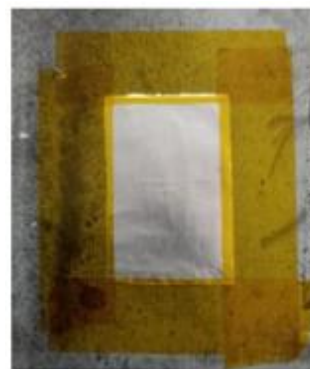


Figura 2. Limpieza de los colectores de aluminio con alcohol.

Paso 2: Preparación de la solución de grafeno. Se pesaron aproximadamente 150 mg de polvo de grafeno y se dispersaron en 7 mL de acetona. La mezcla se sometió a un baño ultrasónico durante 15 minutos para romper los agregados de partículas y lograr una dispersión uniforme. De esta suspensión se utilizó una cantidad equivalente a $\approx$ 10 mg de grafeno por electrodo aproximadamente. La

deposición se realizó por goteo dentro del área activa delimitada.



Figura 3. Dispersión de grafeno en acetona mediante baño ultrasónico.

Paso 3: Depósito del $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$ en el ánodo. Sobre una de las láminas de aluminio se depositó primero el $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$ en polvo, formando una capa delgada y uniforme sobre la superficie. La masa depositada fue de aproximadamente 10 mg. El $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$ se colocó únicamente en un electrodo para permitir evaluar su contribución específica a la pseudocapacitancia.



Figura 4. Depósito de $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$ sobre un colector.

Paso 4: Delimitación del área activa y depósito del grafeno. Se utilizó cinta adhesiva para formar un perímetro de 0.2 cm en los bordes de cada lámina, delimitando el área activa. Las dimensiones finales del área activa son: $(2 - 0.4) \times (3 - 0.4) = 1.6 \times 2.6 = 4.16 \text{ cm}^2$. Dentro de este perímetro se colocó la solución de grafeno mediante la técnica de goteo, dejando secar a temperatura ambiente. Este proceso se repitió varias veces para obtener un recubrimiento homogéneo de aproximadamente 3 a 5 capas de grafeno.



Figura 5. Delimitación del área activa con cinta adhesiva y depósito de la solución de grafeno por goteo.

Paso 5: Secado y planchado. Una vez que la solución se secó completamente, se realizó una técnica de planchado para favorecer la adherencia del grafeno a la superficie del aluminio. Se aplicó presión uniforme sobre la lámina durante unos segundos a una temperatura de 120°C .

Paso 6: Ensamble de la celda. Una vez secos y planchados los electrodos, se colocó el separador de papel poroso entre ellos. Sobre el separador se añadieron 5 mL de electrolito H_3PO_4 hasta saturarlo completamente, asegurando que los iones pudieran migrar entre los electrodos.



Figura 6. Colocación del separador impregnado con electrolito entre los electrodos.

Paso 7: Sellado y colocación de terminales. Los bordes del dispositivo se sellaron con silicona para evitar fugas de electrolito y proteger el conjunto de la humedad ambiental. Para las conexiones eléctricas se utilizó cinta de cobre adherida a los extremos libres de las láminas de aluminio, sirviendo como terminales.



Figura 7. Fotografía del supercapacitor terminado.

Diseño y construcción del potencióstato

Un potencióstato es un instrumento electrónico que mantiene el potencial de un electrodo de trabajo respecto a un electrodo de referencia en un valor determinado, mientras mide la corriente que fluye entre el electrodo de trabajo y un electrodo auxiliar [9]. En nuestro caso, al trabajar con un supercapacitor de dos electrodos, se utilizó una configuración donde el terminal negativo (cátodo de grafeno) se conectó al electrodo de trabajo (WE) y el terminal positivo (ánodo de $\text{La}_2\text{O}_3:\text{Er}$) se conectó a la combinación de contra-electrodo y referencia (CE/RE).

El sistema se basa en un microcontrolador Arduino Uno, que actúa como unidad central de control y adquisición de datos. A continuación, se describen las etapas del circuito.

Etapas 1: Generación del potencial de referencia. El potencial deseado se genera mediante un convertidor digital-analógico (DAC) MCP4725 de 12 bits. Este integrado recibe un valor digital desde el microcontrolador a través de comunicación I²C (Inter-Integrated Circuit, un protocolo de comunicación serie síncrono) y lo convierte en un voltaje analógico con una resolución aproximada de 0.5 mV. Este voltaje sirve como señal de referencia para el sistema.

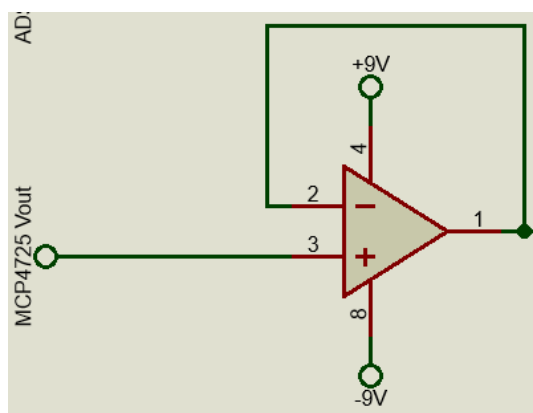


Figura 8. Diagrama de la etapa de generación de potencial de referencia.

Etapas 2: Control de potencial mediante amplificador operacional. Un amplificador operacional LM324 configura el lazo de realimentación que mantiene el potencial en el electrodo de trabajo. El amplificador compara el potencial generado por el DAC con el potencial real medido en el electrodo de trabajo (WE). Si existe una diferencia, el amplificador ajusta la corriente de salida para que el potencial en WE se iguale al valor deseado. Este lazo de control de realimentación negativa es el corazón del potencióstato.

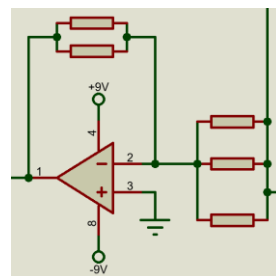


Figura 9. Diagrama de la etapa de control de potencial con amplificador operacional.

Etapas 3: Medición de corriente. La corriente que fluye a través del dispositivo se mide mediante un resistor de precisión de 120 Ω (tolerancia 5%, potencia 1/4 W) colocado en serie con el electrodo de trabajo. Cuando la corriente pasa por este resistor, se produce una caída de voltaje proporcional (Ley de Ohm: $V = I \times R$). Esta caída de voltaje es muy pequeña (del orden de milivoltios), por lo que se requiere amplificarla.

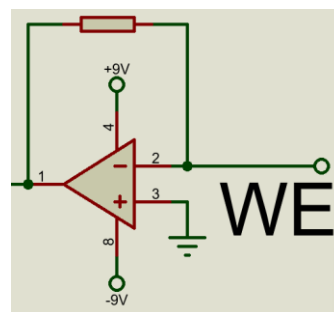


Figura 10. Diagrama de la etapa de medición de corriente usando un resistor de precisión.

Etapas 4: Amplificación de la señal de corriente. Para amplificar la caída de voltaje en el resistor de medición sin introducir ruido, se utilizó un amplificador de instrumentación construido con tres amplificadores operacionales LM324. Esta configuración tiene la ventaja de amplificar la diferencia de potencial entre los extremos del resistor mientras rechaza las señales de ruido comunes entre ambos puntos (modo común), lo que permite obtener una señal limpia y amplificada.

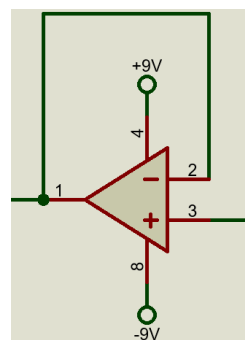


Figura 11. Diagrama de la etapa de amplificación con amplificador de instrumentación.

Etapa 5: Adquisición de datos. Un convertidor analógico-digital (ADC) ADS1115 de 16 bits convierte la señal amplificada a valores digitales. La alta resolución (16 bits) permite distinguir cambios de corriente muy pequeños, del orden de décimas de microamperio. El ADC se comunica con el microcontrolador a través de I²C, entregando los valores digitales que representan la corriente medida.

Etapa 6: Software de control. Se desarrolló un programa en Python que se comunica con el microcontrolador a través de USB. El programa permite configurar los parámetros del experimento (rango de potencial, velocidad de barrido, tiempo de medición), visualizar los datos en tiempo real y almacenarlos en archivos de texto para su posterior análisis.

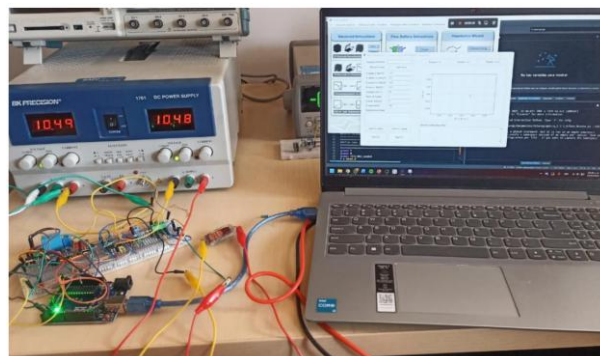


Figura 14. fotografía del sistema de medición del arreglo electrónico completo.

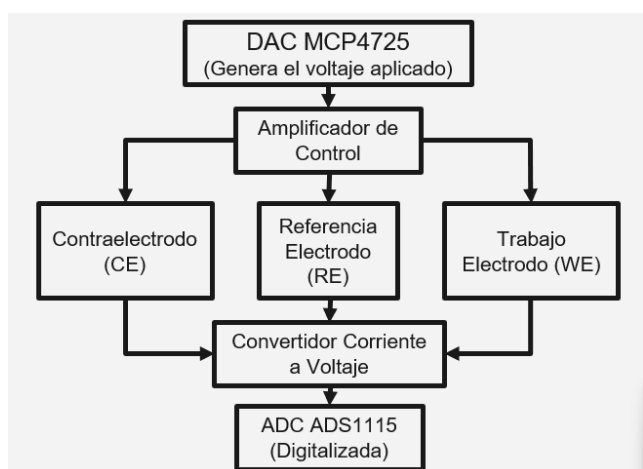


Figura 12. Diagrama de bloques completo del potencióstato.

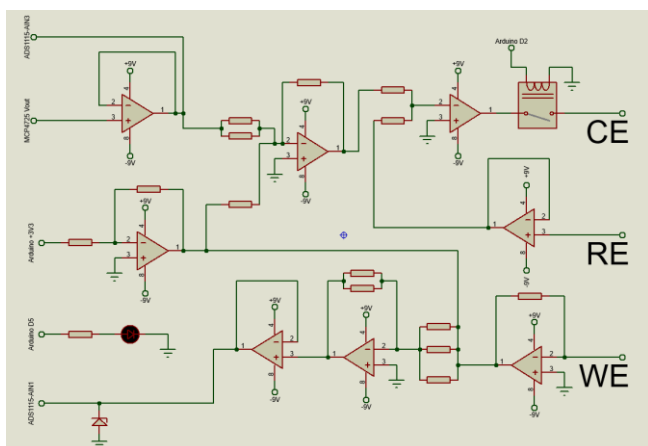


Figura 13. Diagrama de arreglo electrónico detallado del potencióstato.

Validación del potencióstato (celda dummy)

Para verificar el correcto funcionamiento del potencióstato antes de caracterizar el supercapacitor, se realizó una validación utilizando una resistencia de precisión de 1 k Ω (tolerancia 1%) como celda dummy. Se conectó la resistencia entre el electrodo de trabajo (WE) y la combinación contraelectrodo/referencia (CE/RE). Se realizaron dos pruebas:

1. **Voltametría cíclica:** Barrido de potencial de -0.5 V a $+0.5\text{ V}$ a una velocidad de 20 mV/s . La corriente medida debe seguir la ley de Ohm: $I = V / 1000\ \Omega$, lo que implica una relación lineal con pendiente 1 mA/V .
2. **Cronoamperometría:** Escalón de potencial de -0.5 V a $+0.5\text{ V}$, midiendo la corriente durante 10 s . La respuesta esperada es un escalón casi instantáneo de -0.5 mA a $+0.5\text{ mA}$.

Resultados de la validación: La Figura 15 muestra la curva de VC obtenida con la resistencia de $1\text{ k}\Omega$. La relación es perfectamente lineal con una pendiente de 0.98 mA/V (error del 2 % respecto al valor teórico de 1.00 mA/V). El coeficiente de correlación lineal fue $R^2 = 0.9997$, demostrando una excelente linealidad. La Figura 16 muestra la respuesta cronoamperométrica: la corriente pasa de -0.5 mA a $+0.49\text{ mA}$ en menos de 10 ms y se mantiene constante. La pequeña discrepancia se atribuye a la tolerancia de la resistencia y a las capacitancias parásitas del cableado. Se realizaron 10 mediciones consecutivas a $+0.5\text{ V}$, obteniendo una corriente promedio de 0.493 mA (error -1.4%) con una desviación estándar de 0.0015 mA , lo que confirma una excelente repetibilidad. Estos resultados validan que el potencióstato está listo para la caracterización del supercapacitor.

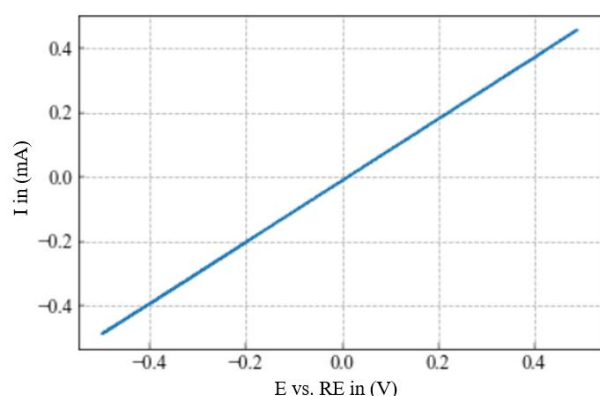


Figura 15. Voltametría cíclica con resistencia de 1 kΩ para validación del potencioestado (rango -0.5 V a $+0.5$ V, 20 mV/s).

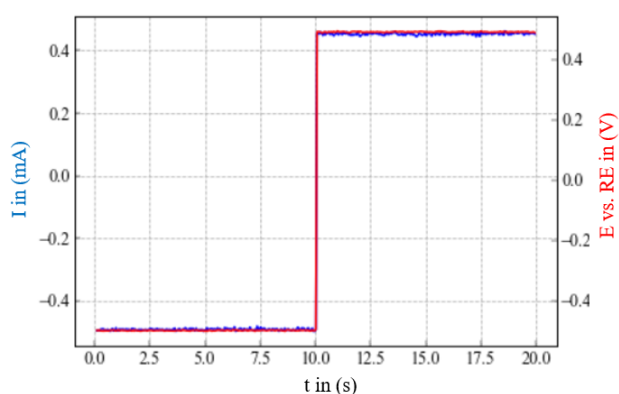


Figura 16. Cronoamperometría con resistencia de 1 kΩ (escalón de -0.5 V a $+0.5$ V).

Condiciones experimentales

Voltametría cíclica (VC): Se realizaron barridos de potencial entre -0.5 V y $+0.5$ V a una velocidad de 20 mV/s, utilizando una configuración de dos electrodos (WE en el negativo, CE/RE en el positivo). Se registraron 5 ciclos completos, analizando el último ciclo para asegurar la estabilización.

Cronoamperometría (CA): Se aplicó una señal de escalón de potencial que alternó entre -0.5 V y $+0.5$ V, con una duración de 10 segundos en cada nivel de potencial. Se registró la corriente en función del tiempo durante 100 segundos, lo que corresponde a 5 ciclos completos (5 intervalos a -0.5 V y 5 intervalos a $+0.5$ V). La frecuencia de muestreo fue de aproximadamente 50 muestras por segundo. En la Figura 18 se presenta un ciclo representativo de esta medición.

Análisis de datos electroquímicos

Los datos almacenados (potencial vs corriente en VC; tiempo vs corriente en CA) se procesaron con scripts en Python. Para la VC, se extrajo la corriente a potencial

cero (promedio de los valores en ambos barridos) y se calculó la capacitancia del dispositivo mediante la relación $C = I/v$, donde $v = 0.020$ V/s. La capacitancia específica por masa se obtuvo como $C_{esp} = C/m$, siendo $m = 0.020$ g (10 mg de grafeno + 10 mg de $La_2O_3:Er$). Para la CA, se determinó el pico de corriente inicial y la constante de tiempo del decaimiento exponencial ajustando la curva a $I(t) = I_0 e^{-t/\tau}$. No se realizó un análisis estadístico avanzado (como desviaciones estándar entre dispositivos) debido al reducido número de muestras, pero se verificó cualitativamente la repetibilidad entre los 3 supercapacitores.

Resultados y Discusión

Validación del potencioestado

Como se describió en la metodología, el potencioestado fue validado con una resistencia de 1 kΩ. Los resultados se muestran en las Figuras 15 y 16. La excelente linealidad ($R^2 = 0.9997$) y la baja desviación estándar (0.0015 mA) confirman que el sistema es capaz de generar potenciales y medir corrientes con la precisión necesaria para caracterizar supercapacitores. Este paso es fundamental para asegurar que las mediciones posteriores reflejan el comportamiento del material y no artefactos del instrumento.

Voltametría cíclica (VC)

La Figura 17 muestra la curva de voltametría cíclica del supercapacitor de $La_2O_3:Er$ /Grafeno. La curva obtenida presenta una forma que se desvía notablemente del rectángulo ideal. En el barrido ascendente (de -0.5 V a $+0.5$ V), la corriente comienza en un valor bajo y aumenta gradualmente, pero no de manera lineal. Se aprecian dos regiones donde la pendiente de la curva cambia: alrededor de -0.2 V y alrededor de $+0.1$ V. Estos cambios de pendiente indican que la respuesta del material no es puramente capacitiva, sino que existen procesos faradaicos adicionales.

La región alrededor de -0.2 V muestra una "joroba" en la curva, que puede atribuirse a la reducción superficial del $La_2O_3:Er$ (ganancia de electrones). Similarmente, alrededor de $+0.1$ V se observa una región de mayor corriente que podría corresponder a la oxidación (pérdida de electrones). Este tipo de reacción es típica de óxidos metálicos con comportamiento pseudocapacitivo [6,7]. La simetría de la curva entre el barrido ascendente y el descendente indica que los procesos electroquímicos involucrados son reversibles, lo que es fundamental para garantizar la estabilidad del dispositivo durante ciclos repetidos de carga y descarga.

Cálculo de la capacitancia específica:

A partir de los datos numéricos de la VC, se extrajeron los valores de corriente cerca de 0 V:

- Barrido ascendente (potencial $\approx +0.00042$ V): corriente = +529.86 μ A.
- Barrido descendente (potencial ≈ -0.00129 V): corriente = -560.08 μ A.

Promediando los valores absolutos:

$$I_{\text{prom}} = \frac{529.86 + 560.08}{2} = 544.97 \mu\text{A} = 0.000545 \text{ A.}$$

La velocidad de barrido es $v = 20 \text{ mV/s} = 0.020 \text{ V/s}$. Por lo tanto, la capacitancia del dispositivo es:

$$C = \frac{I}{v} = \frac{0.000545}{0.020} = 0.02725 \text{ F} = 27.25 \text{ mF.}$$

La masa total de material activo (grafeno + $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$) es de aproximadamente 20 mg = 0.020 g. Así, la capacitancia específica por masa resulta:

$$C_{\text{esp}} = \frac{C}{m} = \frac{0.02725}{0.020} = 1.3625 \text{ F/g} \approx 1.36 \text{ F/g.}$$

Este valor es significativamente superior al reportado para óxidos de lantano no dopados (típicamente 0.5-0.8 F/g) [6] y confirma el efecto beneficioso del dopaje con erbio y la sinergia con el grafeno. La capacitancia por área activa (4.16 cm^2) es de aproximadamente 6.55 mF/cm^2 , valor razonable para electrodos de carbono con pseudocapacitancia.

En la Tabla 1 se resumen los puntos característicos de la curva de VC y su interpretación.

Tabla 1. Análisis de puntos característicos de la curva de voltametría cíclica.

Potencial (V)	Corriente (μ A)	Interpretación
-0.50	-2471	Inicio del barrido; corriente inicial de doble capa
-0.20	-1850	Reducción del $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$; inicio de pseudocapacitancia
0.00	-350 / +530	Paso por potencial cero; corriente mínima (promedio 545 μ A)
+0.20	+750	Oxidación del material; pseudocapacitancia activa
+0.50	+1600	Máxima corriente en barrido ascendente

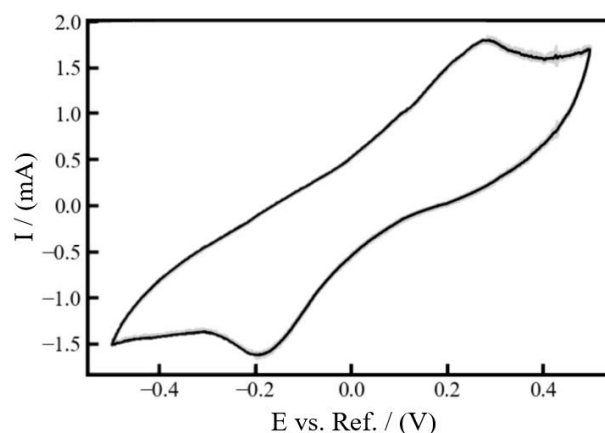


Figura 17. Curva de voltametría cíclica del supercapacitor de $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$ /Grafeno (20 mV/s , -0.5 V a $+0.5 \text{ V}$). La desviación del rectángulo ideal indica pseudocapacitancia [4,6,12].

Cronoamperometría (CA)

La Figura 18 muestra la curva de cronoamperometría correspondiente a un ciclo representativo de la señal de escalón. La medición completa duró 100 segundos y consistió en 5 ciclos, cada uno con 10 segundos en -0.5 V seguidos de 10 segundos en $+0.5 \text{ V}$. En el instante inicial del escalón ($t \approx 10.1 \text{ s}$, momento del cambio de -0.5 V a $+0.5 \text{ V}$), la corriente alcanza un pico máximo de aproximadamente $14,000 \mu\text{A}$ (valor redondeado; el valor máximo puntual registrado experimentalmente fue de $15,492 \mu\text{A}$ en $t = 10.201 \text{ s}$).

Después del pico, la corriente disminuye exponencialmente con el tiempo. En los primeros 0.2 s , la corriente cae a aproximadamente $12,900 \mu\text{A}$; después de 1 s , se reduce a $8,645 \mu\text{A}$; y después de aproximadamente 3 s , se estabiliza cerca de $1,885 \mu\text{A}$, alcanzando el equilibrio ($\approx 0 \mu\text{A}$) alrededor de 20 s . Este decaimiento exponencial se puede modelar como $I(t) = I_0 e^{-t/\tau}$, donde I_0 es la corriente inicial y τ es la constante de tiempo característica. Ajustando los datos experimentales, se obtiene una constante de tiempo $\tau \approx 0.4 \text{ s}$, lo que confirma la alta velocidad de respuesta.

La rápida caída inicial corresponde a la formación completa de la doble capa eléctrica y a las reacciones superficiales rápidas. Una vez que los iones han alcanzado el equilibrio en la superficie, la corriente disminuye porque ya no hay más iones disponibles para migrar (se alcanza la saturación). La corriente residual que se observa después de varios segundos puede atribuirse a procesos de fuga o a reacciones secundarias lentas.

En la Tabla 2 se resumen los puntos característicos de la curva de CA y su interpretación.

Tabla 2. Análisis de puntos característicos de la curva de cronoamperometría.

Tiempo (s)	Corriente (μA)	Interpretación
10.093	+13 276	Inicio del escalón; pico inicial por formación de doble capa
10.147	+14 003	Máximo de corriente (respuesta casi instantánea)
10.201	+15 492	Overshoot por capacitancias parásitas
10.30	+12 902	Inicio del decaimiento exponencial; saturación de la superficie
11.0	+8 645	Decaimiento rápido
15.0	+1 885	Cercano al equilibrio
20.0	~ 0	Equilibrio alcanzado

La tabla muestra un ciclo representativo de la señal de escalón. El tiempo total de registro fue de 100 segundos (5 ciclos). El escalón de potencial cambió de -0.5 V a $+0.5\text{ V}$ cada 10 segundos.

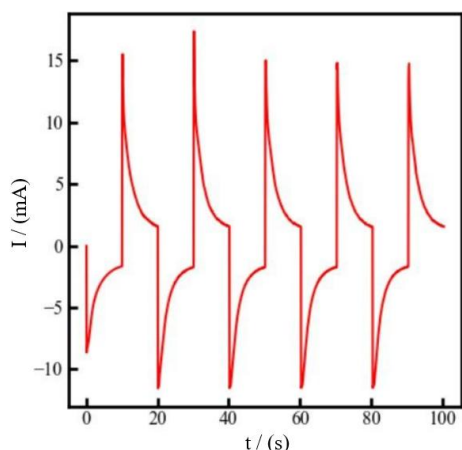


Figura 18. Curva de cronoamperometría del supercapacitor correspondiente a un ciclo representativo de la señal de escalón (10 s en -0.5 V seguidos de 10 s en $+0.5\text{ V}$). El decaimiento exponencial es característico de supercapacitores de alta velocidad [3,9,11].

Discusión general

Los resultados experimentales confirman que el material compuesto $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$ /Grafeno presenta un comportamiento pseudocapacitivo. En la voltametría cíclica, esto se evidencia por la desviación de la forma rectangular ideal, con zonas de corriente no constante que indican la participación del $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$ en reacciones redox superficiales [3,5]. Las regiones de cambio de pendiente alrededor de -0.2 V y $+0.1\text{ V}$ corresponden respectivamente a la reducción y oxidación del óxido metálico. La capacitancia específica calculada (1.36 F/g) es competitiva con otros óxidos de tierras raras reportados [6,7] y valida el dopaje con erbio como una estrategia efectiva.

En la cronoamperometría, la respuesta ultrarrápida se manifiesta en el pico de corriente inicial de

aproximadamente $14\,000\text{ }\mu\text{A}$, que ocurre en fracciones de segundo. La constante de tiempo estimada ($\approx 0.4\text{ s}$) es consistente con lo reportado en la literatura para supercapacitores basados en materiales compuestos [4,6] y confirma la alta velocidad de respuesta del dispositivo, adecuada para aplicaciones de alta potencia (arranque de motores, frenado regenerativo, etc.).

La simetría de la curva de voltametría cíclica indica que los procesos electroquímicos involucrados son reversibles, lo que sugiere que el dispositivo podría soportar muchos ciclos de carga y descarga sin degradación significativa [2]. Aunque no se realizaron pruebas de ciclabilidad en este trabajo, este es un indicador cualitativo positivo.

Comparando con otros materiales reportados, la combinación de grafeno con $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$ ofrece una alternativa de bajo costo y materiales abundantes, en contraste con óxidos de metales preciosos como el RuO_2 [5]. Además, el dopaje con erbio introduce defectos en la estructura del La_2O_3 que potencian su actividad electroquímica, mejorando su comportamiento pseudocapacitivo [6,7].

El potenciostato construido demostró ser capaz de realizar mediciones electroquímicas con la resolución y precisión necesarias para caracterizar el comportamiento del material. La capacidad de generar potenciales con resolución de 0.5 mV y medir corrientes con resolución de $0.1\text{ }\mu\text{A}$ permitió detectar los fenómenos pseudocapacitivos y la respuesta rápida del dispositivo, validando el enfoque de instrumentación de bajo costo [9,10].

Conclusiones

En el presente trabajo se logró implementar exitosamente un sistema de bajo costo para la caracterización electroquímica de nuevos materiales de almacenamiento de energía, utilizando como caso de estudio un supercapacitor fabricado con un material compuesto de óxido de lantano dopado con erbio ($\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$) y grafeno. Este sistema se basó en la plataforma de hardware libre Arduino Uno, complementada con componentes electrónicos de fácil adquisición (DAC MCP4725, ADC ADS1115, amplificadores LM324, resistencias de precisión) y un software de control desarrollado en Python, lo que permitió construir un potenciostato funcional con una inversión de aproximadamente 830 MXN , significativamente menor a la de los equipos comerciales equivalentes (que superan los $110\,000\text{ MX}$). En cuanto a la fabricación del supercapacitor, se desarrolló un proceso reproducible que comenzó con la limpieza de colectores de aluminio de $2\times 3\text{ cm}$, seguido de la dispersión de grafeno en acetona mediante baño ultrasónico ($\approx 10\text{ mg}$ de grafeno en el cátodo) y la

deposición de $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$ (≈ 10 mg en el ánodo) sobre un área activa delimitada de 4.16 cm^2 . Los electrodos fueron sometidos a planchado a 120°C . El ensamble final incluyó un separador de papel poroso impregnado con 5 mL de H_3PO_4 1 M, sellado con silicona y terminales de cinta de cobre. Se fabricaron 3 supercapacitores y se realizaron 5 ciclos de medición por técnica.

El potenciostato implementado demostró ser capaz de generar potenciales con una resolución de 0.5 mV, controlar el potencial mediante un amplificador LM324 en lazo de realimentación negativa, y medir corrientes con una resolución de $0.1 \mu\text{A}$ gracias al ADC ADS1115 de 16 bits. La validación con una resistencia de precisión de $1 \text{ k}\Omega$ arrojó una linealidad excepcional ($R^2 = 0.9997$, error del 2 % en la pendiente) y una repetibilidad con desviación estándar de 0.0015 mA , demostrando que es posible construir instrumentación electroquímica de calidad con componentes de bajo costo y herramientas de código abierto.

Los resultados experimentales obtenidos mediante VC mostraron una curva que se desvía significativamente del rectángulo ideal, con zonas de corriente no constante alrededor de -0.2 V y $+0.2 \text{ V}$, evidenciando un comportamiento pseudocapacitivo atribuible al $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$. A partir de la corriente a potencial cero (promedio de $545 \mu\text{A}$) y la velocidad de barrido (20 mV/s), se calculó una capacitancia específica de 1.36 F/g (27.25 mF para el dispositivo completo). Este valor es competitivo con otros óxidos de tierras raras y valida el dopaje con erbio. Las mediciones de CA revelaron una respuesta ultrarrápida del dispositivo, con un pico de corriente inicial de aproximadamente $14\,000 \mu\text{A}$ que ocurre en fracciones de segundo, seguido de un decaimiento exponencial con una constante de tiempo de aproximadamente 0.4 s . Este comportamiento confirma que el material compuesto $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$ /Grafeno es capaz de formar la doble capa eléctrica de manera casi instantánea, característica esencial para aplicaciones que requieren altas densidades de potencia.

Como trabajo futuro se plantea: (i) realizar pruebas de ciclabilidad (miles de ciclos) para evaluar la vida útil; (ii) calcular la capacitancia específica por integración del área de la VC y obtener la densidad de energía y potencia; (iii) optimizar la relación grafeno/ $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$ y el número de capas; (iv) fabricar una placa de circuito impreso (PCB) para reducir el ruido; (v) implementar técnicas adicionales de caracterización electroquímica, como carga/descarga galvanostática (GCD) y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS); (vi) comparar el potenciostato desarrollado con un equipo comercial para cuantificar su precisión absoluta; (vii) explorar otros electrolitos más estables y menos corrosivos.

En conclusión, este trabajo ha demostrado que es posible realizar investigación electroquímica de alto nivel con recursos accesibles, utilizando plataformas de hardware y software de código abierto. El potenciostato de bajo costo implementado resultó ser una herramienta viable y confiable para la caracterización de nuevos materiales, mientras que el supercapacitor de $\text{La}_2\text{O}_3\text{:Er}$ /Grafeno mostró un comportamiento pseudocapacitivo prometedor y una excelente velocidad de respuesta (1.36 F/g y pico de $14\,000 \mu\text{A}$). Estos hallazgos abren nuevas posibilidades para la investigación en almacenamiento de energía en entornos con recursos limitados y para la formación de estudiantes en técnicas electroquímicas avanzadas, contribuyendo a la democratización del acceso a la ciencia y la tecnología.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma de Tlaxcala y a la Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología por el apoyo institucional y las facilidades otorgadas para el desarrollo de este proyecto. Este proyecto fue financiado por el proyecto de Ciencia de Frontera de SECIHTI CBF-2025-I-2172, el estudiante Jorge Ordoñez agradece el apoyo para actividades científicas otorgado en el marco de este proyecto.

Referencias

- [1] Kumar, R., Sahoo, S., Joanni, E., Singh, R. K., Tan, W. K., Moshkalev, S. A., & Matsuda, A. (2024). Graphene-based materials for supercapacitors: A review of recent advances. *Journal of Energy Storage*, 72, 108125. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108125>
- [2] González, A., Goikolea, E., Barrena, J. A., & Mysyk, R. (2016). Review on supercapacitors: Technologies and materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1189-1206. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.249>
- [3] Wang, Y., Zhang, L., & Li, H. (2025). Recent progress in transition metal oxides for high-performance supercapacitors. *Advanced Energy Materials*, 15(2), 2401567. <https://doi.org/10.1002/aenm.202401567>
- [4] Sagar, P., Hamdani, I. R., Levato, T., Giannini, V., & Das, G. (2026). Graphene and its derivatives in supercapacitors: a comparative review. *Materials Advances*, 7, 83-108. <https://doi.org/10.1039/D5MA01017A>
- [5] Tichter, T., Gernhard, M., & Vesborg, P. C. K. (2023). PolArStat: An Arduino Based Potentiostat for Low-Power Electrochemical Applications. *Electrochimica Acta*, 456, 142910. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.142910>
- [6] Liu, C., Chen, X., & Wang, Z. (2024). Lanthanum-based oxides for energy storage applications: A critical review. *Journal of Materials Chemistry A*, 12(15), 8923-8945. <https://doi.org/10.1039/D3TA07892K>
- [7] Zhang, Y., Li, J., & Wu, H. (2025). Recent advances in rare-earth metal oxides for supercapacitors. *Chemical Engineering Journal*, 485, 149167. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149167>

- [8] Elgrishi, N., Rountree, K. J., McCarthy, B. D., Rountree, E. S., Eisenhart, T. T., & Dempsey, J. L. (2018). A Practical Beginner's Guide to Cyclic Voltammetry. *Journal of Chemical Education*, 95(2), 197-206. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.7b00361>
- [9] Patel, R., Sharma, A., & Kumar, S. (2024). Low-cost potentiostats for electrochemical education and research: A comprehensive review. *IEEE Transactions on Education*, 67(3), 412-425. <https://doi.org/10.1109/TE.2024.3356789>
- [10] Martinez, E., Garcia, L., & Rodriguez, M. (2025). Open-source hardware for electrochemical characterization of energy storage materials. *HardwareX*, 17, e00523. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2024.e00523>
- [11] Conway, B. E. (1999). *Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications*. Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- [12] Bard, A. J., & Faulkner, L. R. (2001). *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications* (2nd ed.). Wiley.
- [13] Rowe, A. A., Bonham, A. J., White, R. J., Zimmer, M. P., Yadgar, R. J., Hobza, T. M., Honea, J. W., Ben-Yaacov, I., & Plaxco, K. W. (2011). CheapStat: An open-source, "do-it-yourself" potentiostat for analytical and educational applications. *PLoS ONE*, 6(9), e23783. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023783>
- [14] Dryden, M. D. M., & Wheeler, A. R. (2015). DStat: A versatile, open-source potentiostat for electroanalysis and integration. *PLoS ONE*, 10(10), e0140349. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140349>
- [15] Meloni, G. N. (2016). Building a microcontroller based potentiostat: A inexpensive and versatile platform for teaching electrochemistry and instrumentations. *Journal of Chemical Education*, 93(7), 1320-1322. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00655>