



Metrostat: desarrollo de potenciómetro asequible con Arduino para experimentos electroquímicos

Resumen

Este artículo explica el proceso de diseño, construcción y evaluación del Metrostat, un potenciómetro de bajo costo con Arduino para estudios electroquímicos. Para evaluar la relación costo-eficiencia, el Metrostat se comparó con un dispositivo comercial y con los dispositivos elaborados en otras investigaciones. También se realizaron experimentos de voltametría de barrido lineal, voltametría cíclica, polarización y cronoamperometría para evaluar el rendimiento del potenciómetro. El equipo mostró una resolución en el potencial de 0,152 mV y en la corriente de 1,52 µA, comparables a los de un dispositivo comercial. La separación de las ramas en voltametría cíclica aumentó con la velocidad de barrido, en concordancia con la bibliografía consultada. Se obtuvieron voltamogramas cílicos para la oxidación de ácido ascórbico a las concentraciones 2, 4 y 6 mM y curvas de polarización para la corrosión de acero al carbono similares a las reportadas en la bibliografía consultada. En cronoamperometría, se observó una relación lineal entre la corriente y la concentración de glucosa. Los resultados demuestran que el Metrostat tiene un rendimiento y sensibilidad comparables a los equipos comerciales a un precio considerablemente menor, esto lo convierte en una herramienta viable y eficiente para estudios electroquímicos en diversos campos como la química analítica, la ciencia de materiales y la bioquímica.

Palabras clave: estudios electroquímicos; potenciómetro; Arduino; voltametría; química analítica; ciencia de materiales.

Metrostat: Development of an affordable potentiostat with Arduino for electrochemical experiments

Abstract

This paper explains the process of designing, building and evaluating the Metrostat, a low-cost Arduino-based potentiostat for electrochemical studies. To evaluate the cost-effectiveness, the Metrostat was compared with a commercial device and with devices developed in other researches. Linear sweep voltammetry, cyclic voltammetry, polarization and chronoamperometry experiments were also performed to evaluate the performance of the potentiostat. The equipment showed a potential resolution of 0.152 mV and current resolution of 1.52 µA, comparable to those of a commercial device. The separation of the branches in cyclic voltammetry increased with the scanning speed, in agreement with the literature consulted. Cyclic voltammograms were obtained for ascorbic acid oxidation at 2, 4, and 6 mM concentrations and polarization curves for carbon steel corrosion similar to those reported in the literature. In chronoamperometry, a linear relationship between current and glucose concentration was observed. The results demonstrate that the Metrostat has a performance and sensitivity comparable to commercial equipment at a considerably lower price, making it a viable and efficient tool for electrochemical studies in various fields such as analytical chemistry, materials science, and biochemistry.

Keywords: electrochemical studies; potentiostat; Arduino; voltammetry; analytical chemistry; materials science.

Metrostat: desenvolvimento de potenciómetro acessível com Arduino para experimentos eletroquímicos

Resumo

Este trabalho explica o processo de projeto, construção e avaliação do Metrostat, um potenciómetro de baixo custo baseado em Arduino para estudos eletroquímicos. Para avaliar a relação custo-benefício, o Metrostat foi comparado com um dispositivo comercial e com dispositivos desenvolvidos em outras pesquisas. Também foram realizados experimentos de voltametria de varredura linear, voltametria cíclica, polarização e cronoamperometria para avaliar o desempenho do potenciómetro. O dispositivo apresentou uma resolução de potencial de 0,152 mV e uma resolução de corrente de 1,52 µA, comparável a um dispositivo comercial. A separação das ramificações na voltametria cíclica aumentou com a velocidade de varredura, de acordo com a literatura consultada. Foram obtidos voltamogramas cílicos para a oxidação de ácido ascórbico em concentrações de 2, 4 e 6 mM e curvas de polarização para corrosão de aço carbono semelhantes às relatadas na literatura. Na cronoamperometria, foi observada uma relação linear entre a corrente e a concentração de glicose. Os resultados demonstram que o Metrostat tem desempenho e sensibilidade comparáveis aos dos equipamentos comerciais a um preço consideravelmente menor, o que o torna uma ferramenta viável e eficiente para estudos eletroquímicos em vários campos, como química analítica, ciência dos materiais e bioquímica.

Palavras-chave: estudos eletroquímicos; potencímetro; Arduino; voltametria; química analítica; ciência de materiais.



Introducción

El potenciómetro es una herramienta clave para la investigación electroquímica, es un dispositivo indispensable para el desarrollo y evaluación de inhibidores de corrosión, para la caracterización de materiales, el diseño de sensores, los estudios de baterías y la química ambiental. Estas aplicaciones son esenciales para avanzar en múltiples áreas científicas y tecnológicas. Sin embargo, el alto costo de los potenciómetros comerciales puede representar una barrera significativa para el avance de las investigaciones, especialmente para instituciones o proyectos con presupuestos limitados. Como respuesta a este desafío, muchos investigadores han optado por desarrollar y construir potenciómetros de bajo costo, como informan diversos estudios [1-4].

Este artículo aborda la construcción del Metrostat: un potenciómetro-galvanostato de bajo costo, como una solución práctica y accesible que responda a las necesidades de las líneas de investigación de la Universidad Metropolitana (Venezuela). La implementación de este dispositivo no solo ampliará las posibilidades de investigación en el ámbito electroquímico, sino que también facilitará el acceso a esta tecnología tanto para estudiantes como para investigadores. Con esto se busca promover herramientas tecnológicas accesibles, que mejoren la calidad y el alcance de la investigación científica, y fortalecer las capacidades de la institución en áreas estratégicas.

A partir del segundo trimestre del año 2024, este potenciómetro se integrará a la práctica “Determinación de glucosa por método cromatográfico” del curso Laboratorio de Destrezas Instrumentales del plan de estudios de Ingeniería Química. Esta incorporación significará una mejora del programa de estudios de pregrado y establecerá un precedente para la construcción de dispositivos similares en el futuro, alineándose con el noveno Objetivo de Desarrollo Sostenible del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

Materiales y métodos

El potenciómetro es un dispositivo que permite seguir el curso de las reacciones electroquímicas, ya que permite monitorear la diferencia de potencial entre el electrodo de trabajo (WE) y el electrodo de referencia (RE), mediante la respuesta en intensidad de corriente entre el WE y el contra electrodo (CE) [5-6].

En la figura 1 se muestra el circuito eléctrico elemental de control y medición de un potenciómetro.

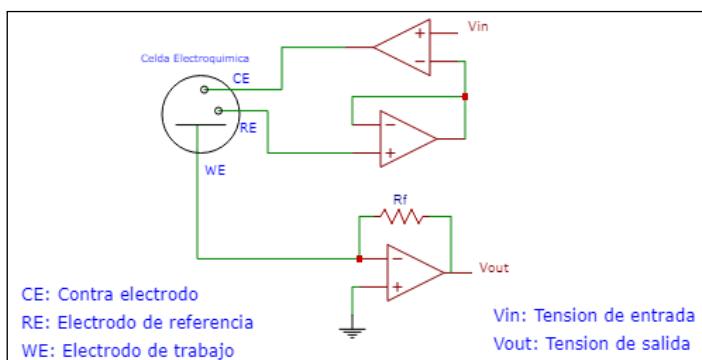


Figura 1. Circuito básico de un potenciómetro simplificado. Tomado de [14].

El uso de un CE activa una celda electroquímica y genera una señal de control. Esta señal se resta de la señal del RE, con lo cual se obtiene la medición del WE. Estas mediciones, junto con la corriente y la diferencia de potencial con respecto al RE, son esenciales para los experimentos electroquímicos con potenciómetros. En el presente estudio, y con la finalidad de realizar estas mediciones, se utiliza un Arduino [7], que es una plataforma de prototipado electrónico de código abierto que combina hardware y software de manera flexible y accesible. A nivel científico, se presenta como un sistema integrado de desarrollo que facilita la creación y programación de dispositi-

tivos electrónicos interactivos y autónomos. La plataforma consta de una placa de circuito impreso equipada con un microcontrolador, una interfaz de programación y un entorno de desarrollo que simplifica la escritura de código y la interacción con periféricos.

Se utilizaron amplificadores operacionales (OPAMP) para desacoplar circuitos, amplificar y atenuar señales, y configurar un amplificador diferencial, como se muestra en la figura 2. Los OPAMP son componentes clave en la electrónica debido a su capacidad para amplificar señales débiles, su versatilidad en el diseño de circuitos, su alta impedancia de entrada, su comportamiento lineal, y su capacidad para aislar señales. Estas características hacen que los OPAMP sean fundamentales en una amplia gama de aplicaciones electrónicas y sistemas [8].

Un OPAMP típico consta de un circuito con entradas, una etapa de amplificación y una salida. La etapa de amplificación permite una ganancia de voltaje muy alta, lo que permite amplificar pequeñas señales de entrada a niveles mucho más altos. Además, los amplificadores operacionales suelen tener propiedades de entrada y salida bien definidas y características de funcionamiento estables [9].

En el caso del potenciómetro que se ha desarrollado, se utilizó un amplificador de tipo diferencial que sirve para las aplicaciones en las que hay necesidad de amplificar la diferencia entre las señales de entrada; en otras palabras, este dispositivo amplifica la diferencia entre dos entradas, pero rechaza toda señal común a las dos entradas [10].

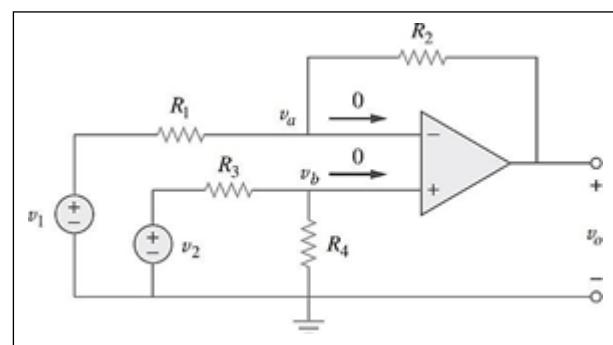


Figura 2. Amplificador operacional en configuración diferencial. Tomado de [10].

La Ec. (1) está asociada con la configuración del amplificador:

$$v_0 = \frac{R_2 (1 + R_1/R_2)}{R_1 (1 + R_3/R_4)} v_2 - \frac{R_2}{R_1} v_1 \quad (1)$$

Donde R_1, R_2, R_3 y R_4 son resistencias, v_1 y v_2 son tensiones de entrada y v_0 es la tensión de salida [10].

Una señal representada por modulación por ancho de pulso (PWM, Pulse Width Modulation), como se muestra en la figura 3, es una señal digital que se utiliza para representar una señal analógica. La señal PWM consta de pulsos de ancho variable y amplitud constante, el ancho de los pulsos varía para representar el valor de la señal analógica. Un filtro es un dispositivo que permite pasar o bloquear ciertas frecuencias de una señal. En el presente trabajo, el filtro está diseñado para permitir el paso de las frecuencias bajas de la señal PWM y para bloquear las frecuencias altas. Esto se debe a que las frecuencias bajas de la señal PWM representan el valor de la señal analógica, mientras que las frecuencias altas son ruido. Al pasar la señal PWM a través del filtro, se eliminan las frecuencias altas y se obtiene solo la señal analógica. Esto significa que la señal de salida del filtro es una señal continua que representa el valor de la señal analógica original.

En el caso del Arduino, la señal PWM se genera utilizando un pin digital de la plataforma. El ancho de los pulsos de la señal PWM se puede controlar utilizando la función `analogWrite()`. El filtro se puede implementar utilizando un circuito electrónico o un software.

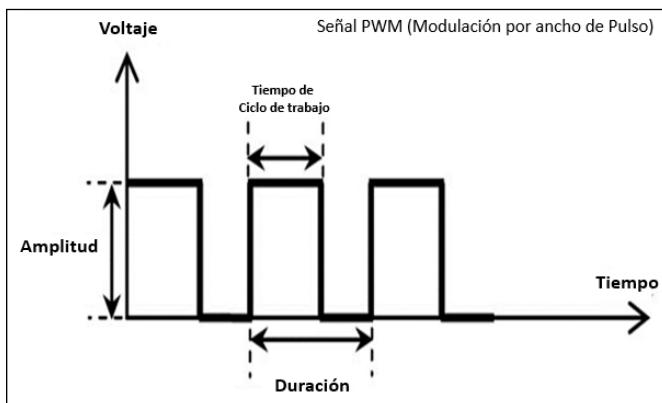


Figura 3. Señal PWM con sus dos períodos de tiempo básicos (pulso 0 y 1). Tomado de [11].

Un ejemplo de circuito electrónico que puede emplearse para filtrar una señal PWM es un filtro pasa-bajos compuesto por una resistencia (R) y un condensador (C). Un ejemplo de un software que se puede utilizar para filtrar una señal PWM es la función `lowpassfilter()` de la biblioteca Arduino.

Aunque en el caso de estudio se trata de un dispositivo de elaboración propia y de bajo costo, es importante comparar su eficiencia con la de los potencióstatos comerciales, para alcanzar los objetivos planteados en el presente trabajo. Para ello se establecieron dos métodos de comparación: uno a través de un potenciómetro comercial y otro con resultados de otras investigaciones en las que se utilizaron potencióstatos en procesos similares.

Entre los antecedentes se pueden citar, en orden cronológico, los siguientes dispositivos utilizados en otras investigaciones: el prototípico de Barrero *et al.* [12] es obsoleto para propósitos analíticos y educativos debido a su antigüedad y limitada resolución; Meloni [13] desarrolla un potenciómetro de bajo costo para enseñanza de la electroquímica, pero carece de un sistema de medición para detectar y reportar la diferencia de potencial entre los electrodos;

y Crespo *et al.* [14] presenta un diseño completo y mejorado de un potenciómetro que soluciona debilidades de diseños anteriores, como la falta de protección para el prototipado electrónico de código abierto y filtros para excluir frecuencias indeseadas, y que cuenta con sistemas para evaluar la sensibilidad de forma independiente a la corriente que pasa por el WE y la diferencia de potencial entre los WE y RE. Adicionalmente, para el desarrollo de la presente investigación, se estudiaron y consideraron distintos diseños y experiencias de otros autores en esta área como Krorakai *et al.* [15], Alfaro y Alfaro [16], Ramos y Hernández [17], Rathnayaka *et al.* [18], y Colburn *et al.* [19].

Diseño del dispositivo

El Arduino es una herramienta útil para controlar y monitorear los valores de corriente y potencial en celdas electroquímicas; sin embargo, Arduino no registra señales negativas, por lo que se necesitan OPAMP para desplazarlas. Los OPAMP también replican potenciales de celdas sin interferencia y son vitales en un potenciómetro para amplificar señales de tensión de microamperios y milivoltios. La **figura 4** muestra el circuito de un potenciómetro con Arduino y OPAMP.

Fuente de alimentación de los amplificadores operacionales (OPAMP)

Se mejoró el montaje del prototipo con una fuente regulada usando integrados 7805, condensadores y diodos para alimentar los OPAMP. Esto hace que el potenciómetro sea portátil y pueda ser alimentado por baterías de 9 V para obtener las tensiones ideales para los OPAMP de $\pm 6,2$ V [20-21]. Así se eliminan ruidos eléctricos y se garantiza una señal clara desde la celda, a través del Arduino y la corriente directa.

Entrada de la señal

El Arduino envía señal PWM a través de un filtro para convertirla en señal continua. Esta señal es una rampa ascendente de 0 hasta 5

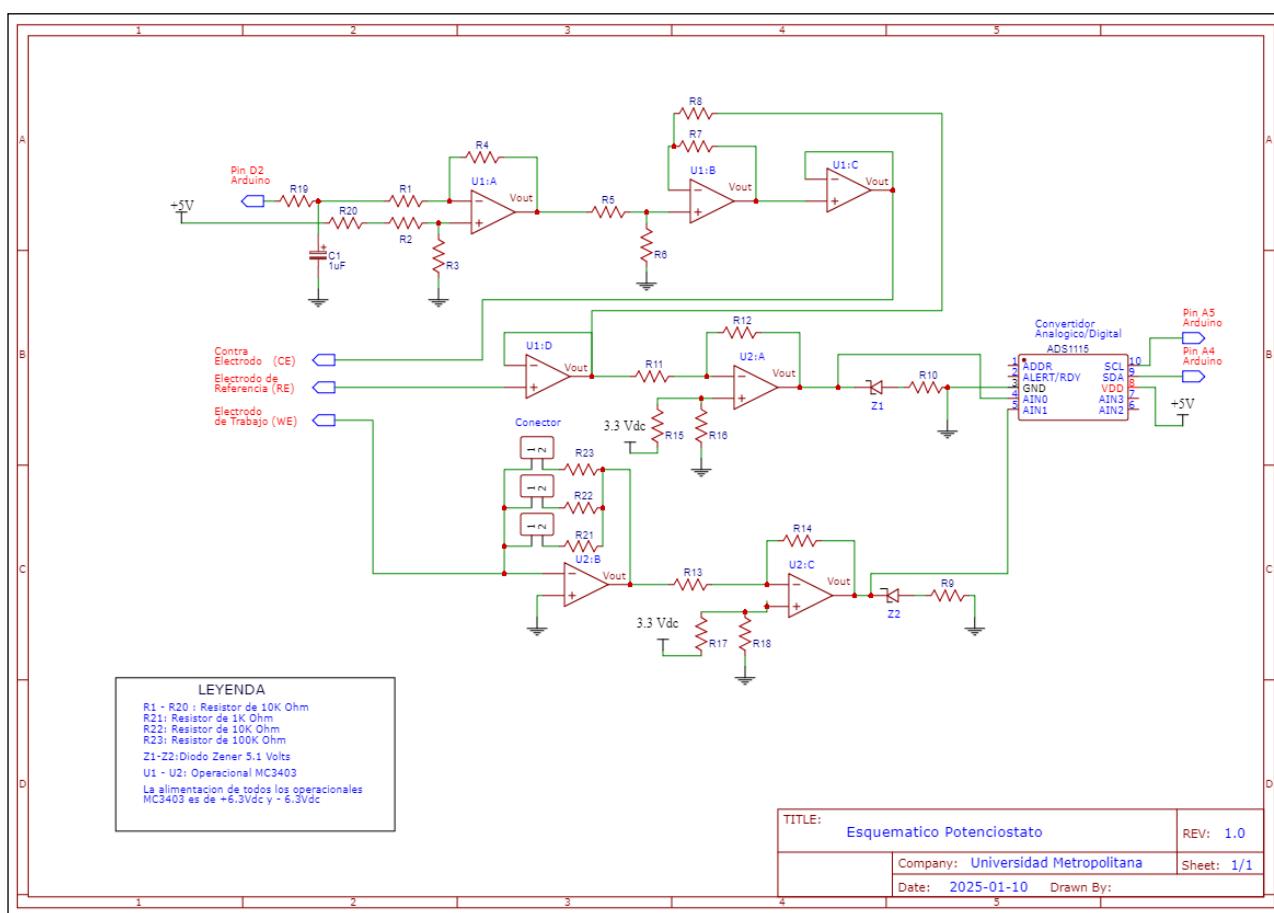


Figura 4. Circuito de un potenciómetro construido con amplificadores operacionales y Arduino.

V que luego desciende con la misma pendiente y se desplaza 2,5 V hacia el sentido negativo para obtener una señal triangular de -2,5 a +2,5 V. La señal de excitación se obtiene restando la señal triangular al potencial del RE y se introduce en la celda electroquímica a través del CE.

Lectura de los datos

Para interpretar los potenciales y corrientes negativas obtenidas en la celda, se usa un OPAMP en configuración seguidor, para tomar una muestra de los potenciales, y se desplaza 3,3 V con un amplificador diferencial. Además, se usa un convertidor analógico-digital de 16 bits, denominado como ADS1115, para maximizar la precisión de la lectura, la cual se comunica con el Arduino mediante el protocolo I2C. Para la lectura de la intensidad de la corriente se emplea un convertidor de tensión a corriente con resistencias de transimpedancia de valores distintos, que afectan la ganancia del amplificador y varían el tamaño de la señal resultante. Estas resistencias se pueden intercambiar mediante un jumper para seleccionar la ganancia del amplificador adecuada según la magnitud esperada de las corrientes.

Interpretación de datos

El Arduino se configura con un software que monitorea, almacena e imprime datos automáticamente en tiempo real durante el escaneo. Estos datos se pueden exportar a Excel® u otros programas para generar gráficos y facilitar su análisis.

Ensayos del dispositivo

La mejor manera de comprobar el correcto funcionamiento de un potenciómetro de bajo costo, antes de hacer experimentos electroquímicos reales o para identificar un problema en caso de falla, es realizar una serie de mediciones electroquímicas con soluciones conocidas. A continuación se citan algunas medidas electroquímicas específicas que se usaron para probar el potenciómetro: voltametría de barrido lineal, voltametría cíclica y cronoamperometría.

Voltametría de barrido lineal

La voltametría de barrido lineal es una técnica para medir la respuesta de corriente-voltaje de una reacción electroquímica a medida que el potencial se escanea linealmente desde un potencial inicial hasta un potencial final. En este caso, se utilizó un circuito de prueba llamado celda ficticia (*dummy cell*) que emula un comportamiento electroquímico de histéresis, donde se coloca una resistencia eléctrica conocida, tal como se indica en la figura 5. Se utilizaron dos resistencias eléctricas (R1) de valores nominales 10 y 50 kohm.

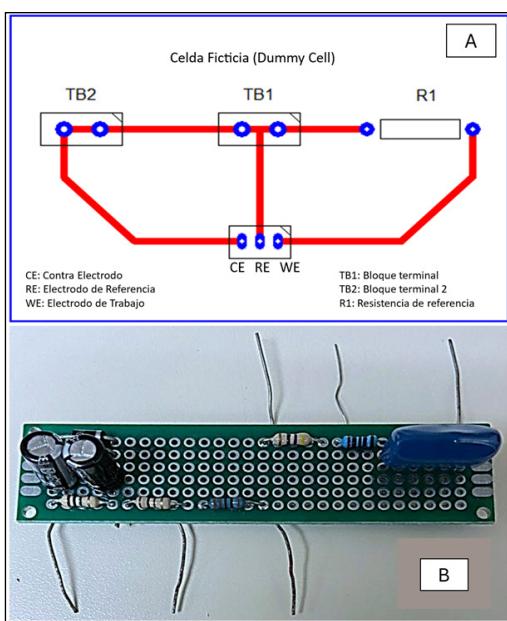


Figura 5. A: representación de la celda ficticia (*dummy cell*) para medir el valor de la resistencia R1, TB1. B: *Dummy cell* (electrónica) construida.

El esquema presentado es un arreglo de resistencias y capacitores (270 μ F) y TB2 es un arreglo de resistencias y diodos (SR 106). En SIL1 se hacen las conexiones al potenciómetro equivalentes al CE, al RE y al WE.

Voltametría cíclica

Esta técnica permite medir la respuesta de corriente a un voltaje en una reacción electroquímica mientras se escanea linealmente el potencial. Para probar la sensibilidad del potenciómetro con referencia a la velocidad de barrido, se realizó un ensayo utilizando la misma celda ficticia mencionada anteriormente y se generó el gráfico respectivo.

Por otra parte, se estudió una solución de ferro/ferri cianuro de potasio 1 mM (P.A. (ACS), Biopack) en KCl 1 M (BioUltra, Merck), con una velocidad de barrido de 500 mV/s, utilizando un WE de grafito (20 mm² de superficie), un alambre de platino como CE (0,4 mm de diámetro) y un RE de Ag/AgCl.

Para visualizar el efecto que tiene la concentración de ácido ascórbico en los voltamogramas cílicos se elaboraron 3 soluciones a distintas concentraciones: 2, 4 y 6 mM. Previo a esto se preparó un buffer de fosfatos ($\text{Na}_2\text{PO}_4/\text{Na}_2\text{HPO}_4$) 0,5 M y pH 7,4. En esta experiencia se utilizó un RE Cu/CuSO₄ de elaboración propia, un alambre de platino de 2,4 cm de longitud y 0,4 mm de grosor como WE y una barra de grafito como electrodo auxiliar.

Se utilizó un WE de acero al carbono en un medio de ácido sulfúrico 0,5 M (H_2SO_4), un CE de platino y un RE Ag/AgCl a través de un puente salino de agar con KCl como electrolito. La concentración del inhibidor es 0,01 M y se elaboró una curva de polarización para cada caso. El estudio se basó en investigaciones anteriores realizadas por Ortega et al. [22] y Ashassi et al. [23]. La velocidad de barrido fue de 19 mV/s y el recorrido lineal fue de 0 a 1,5 V vs. Ag/AgCl (barrido ascendente).

Cronoamperometría

Teniendo en cuenta que el dispositivo desarrollado está previsto para su utilización durante el último trimestre del año 2024 en el Laboratorio de Destrezas, el cual forma parte del plan de estudios de la carrera de Ingeniería Química en la Universidad Metropolitana, se llevó a cabo un experimento para medir los niveles de glucosa en las bebidas refrescantes comerciales.

Los medidores de glucosa comerciales utilizan la técnica de la cronoamperometría, en la que se aplica un potencial constante entre un WE y un CE, mientras se mide la corriente en función del tiempo.

Para medir la glucosa, se utilizaron tiras reactivas de glucosa marca FreeStyle Optium, Abbott, USA. Para conectar los tres electrodos exteriores de las tiras al dispositivo se utilizó un adaptador casero, similar al utilizado en los electrodos serigrafiados.

Las muestras de glucosa se prepararon con una solución madre de glucosa en polvo (Glucose 30DE) 100 mM (1,80 g en 100 mL) y con una solución buffer de fosfato (Scharlau) de 0,05 M con pH 7,2 en agua destilada. A partir de la solución patrón se prepararon por dilución con agua destilada cuatro soluciones de prueba con diferentes concentraciones (0,4; 0,8; 1,5; y 2,0 mg/mL). Las soluciones de glucosa se prepararon el día anterior a la realización de los experimentos para permitir el equilibrio de mutarrotación entre las formas α y β [24].

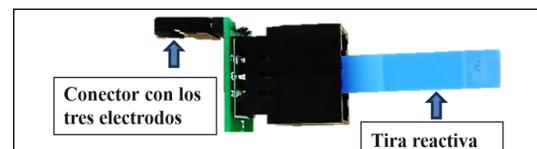


Figura 6. Adaptador casero y tira reactiva utilizada en el experimento de cronoamperometría.

En la **figura 6** se muestra un esquema de la conexión de las tiras reactivas al dispositivo.

El ensayo cronoamperométrico consistió en dos partes:

- Período inicial donde el potencial permaneció a 0 mV por 1 s.
- Período de ensayo donde el potencial fue escalonado a 0,5 V y permaneció constante durante 30 s, con una corriente de 35 μ A a una frecuencia de 4 Hz.

Para cuantificar la cantidad de glucosa se tomó la corriente promedio a los 20 s, una vez que el valor se mantuviese estable [25–26]. Para medir la glucosa, los electrodos en la tira reactiva están recubiertos con la enzima glucosa oxidasa, que convierte la glucosa en ácido glucónico con la producción de peróxido de hidrógeno [27], el cual se oxida en la superficie del WE [28]. La corriente en un momento dado es directamente proporcional a la concentración de glucosa, como lo muestra la ecuación de Cottrell [29].

Software

En el Metrostat, el software secuencial comienza con el barrido de tensión a la celda. Los usuarios pueden definir parámetros como el potencial de inicio, el máximo del barrido y la velocidad del escalón. Una vez definido el rango de barrido, el software toma los datos requeridos en cada paso y los almacena en una base de datos para su análisis posterior.

Análisis económico y comparación de costos

Se llevó a cabo un análisis económico del último prototipo desarrollado.

Resultados y discusión

Se llevaron a cabo pruebas electroquímicas en las versiones desarrolladas del potenciómetro, utilizando los resultados de otras investigaciones consultadas como referencia.

Voltametría de barrido lineal

Los valores de las resistencias utilizadas se midieron utilizando un multímetro digital marca UNI-T, modelo UT890D+. Los datos resultantes del potenciómetro se graficaron en la **figura 7**.

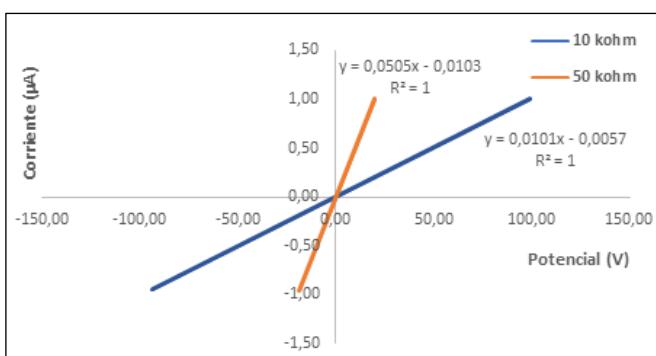


Figura 7. Barrido lineal utilizando la celda ficticia, corriente (μ A) vs potencial (V).

Como se muestra en la **figura 7**, las pendientes obtenidas de las rectas para cada una de las resistencias ensayadas representan los valores de dichas resistencias. La precisión de la corriente medida (PCM) utilizando el potenciómetro fue de 99,98% para el caso de la resistencia de 50 kohm y del 99,66% para el caso de la resistencia de valor 10 kohm.

El valor de la precisión en la corriente registrada (PCM) se obtuvo utilizando la Ec. (2).

$$\text{PCM} = \frac{V/R - I}{V/R} \times 100\% \quad (2)$$

Donde V es el potencial registrado por el potenciómetro, R el valor referencial de la resistencia e I el valor de la corriente reportada por el potenciómetro.

Durante el diseño y desarrollo del equipo, se elaboraron cuatro versiones de potenciómetros, dos de 10 bits (1.0 y 2.0) y dos de 16 bits (3.0 y 4.0). La versión 4.0, la última, la más compacta y versátil, incluye la fuente de alimentación de los OPAMP en el circuito y una caja de acrílico para su transporte y uso. Esta última versión ofrece la mayor resolución y precisión según los resultados y la bibliografía consultada [7]. Su resolución de 16 bits se divide en 1 bit para el signo y 15 bits para el rango de medición, lo cual permite mediciones precisas de hasta 152 μ V (Ec. (3)) en un amplio rango de medidas.

$$\text{Resolución potencial} = 5\text{V}/2^{15} = 0,152 \text{ mV} = 152 \text{ } \mu\text{V} \quad (3)$$

Donde V es el potencial registrado por el potenciómetro.

El potenciómetro tiene una alta precisión y exactitud para medir corrientes con resistencias de transimpedancia entre 100 ohm y 100 kohm, con una resolución de 1,52 μ A (Ec. (4)) y 0,00152 μ A (Ec. (5)), respectivamente.

$$\text{Resolución corriente} = 152 \text{ } \mu\text{V}/100 \text{ ohm} = 1,52 \text{ } \mu\text{A} \quad (4)$$

$$\text{Resolución corriente} = 152 \text{ } \mu\text{V}/100 \text{ kohm} = 0,00152 \text{ } \mu\text{A} \quad (5)$$

La adición del convertidor analógico-digital de 16 bits ADS1115 aumenta la precisión de los datos de 10 bits del Arduino a 16 bits, lo que es útil para estudios de corrosión electroquímica con valores de corriente muy bajos, del orden de pocos microamperios. Esto se traduce en resultados más confiables para la investigación. El potenciómetro mide un intervalo de -3,3 a 1,7 V y la lectura de intensidad de corriente se ajusta según la resistencia de transimpedancia seleccionada. Si la resistencia es inferior a 100 ohm, es posible obtener lecturas mucho más altas. En la **figura 8** se muestra una fotografía del potenciómetro desarrollado.



Figura 8. Potenciómetro versión 4.0 (16 bits).

Voltametría cíclica

La **figura 9** presenta la respuesta de la celda ficticia a una voltametría cíclica con la última versión del potenciómetro (16 bits), representando el potencial (eje x) del WE en V vs. la corriente (eje y) del WE en μ A. El gráfico de la **figura 9** se construyó a partir de los parámetros mostrados en la **tabla 1**, en la cual se comenzó la prueba con un valor inicial de potencial.

Tabla 1. Parámetros fijados en el potenciómetro para trazar las curvas de voltametría cíclica.

Potencial inicial (mV)	Potencial final (mV)	Velocidad de barrido (V/s)	Intervalo de corriente (μ A)
-600	+600	Variable: 0,2 - 0,4 - 0,8	100

Utilizando la última versión del potenciómetro se realizó un ensayo de voltametría cíclica, cuyo resultado se indica en la figura 10. Puede observarse en esta figura que la respuesta del equipo es la esperada para este tipo de ensayos de voltametría. El fenómeno de la separación de las ramas de las curvas al aumentar la velocidad de barrido es bien conocido [30] y la celda ficticia utilizada está

simulando esta situación, en las celdas reales este comportamiento está relacionado con los procesos electroquímicos.

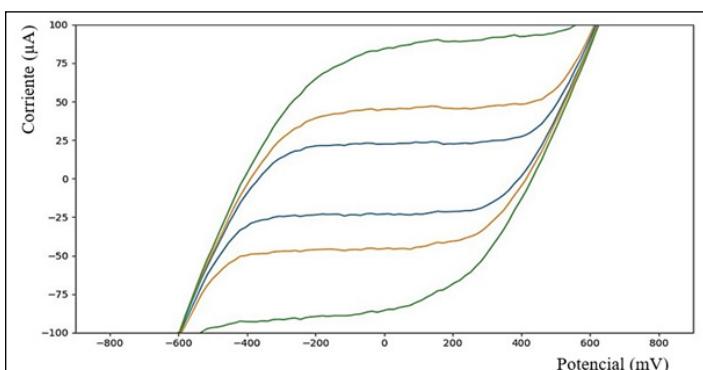


Figura 9. Ensayo de voltametría cíclica sobre celda ficticia a diferentes velocidades de barrido (VB).

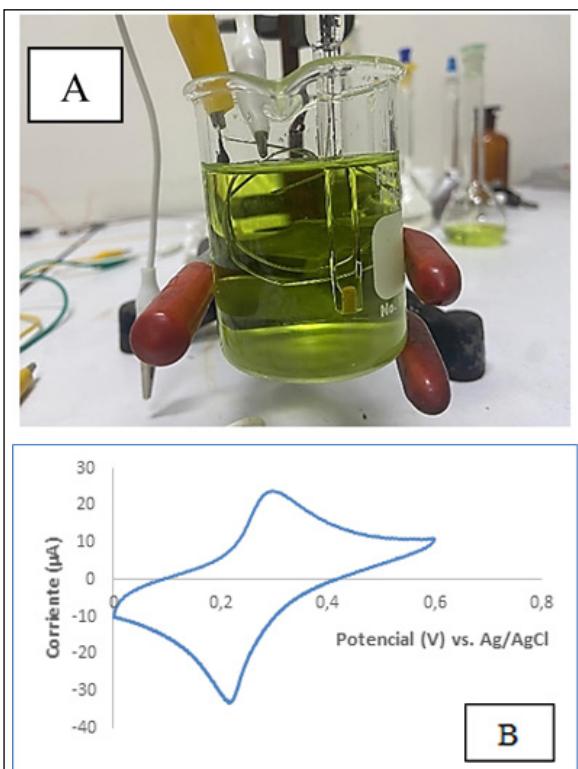


Figura 10. A: voltamograma de solución de ferro/ferri cianuro de potasio 1 mM en KCl 1 M. B: celda de ferricianuro de potasio 4,8 mM con electrodo de referencia Ag/AgCl, electrodo de trabajo de platino y electrodo auxiliar de platino.

En la figura 11 se muestran los voltamogramas cíclicos, con un solo pico, realizados con el potenciómetro de 16 bits. Puede observarse en esta figura que la respuesta del equipo es la esperada para este tipo de ensayos electroquímicos [31].

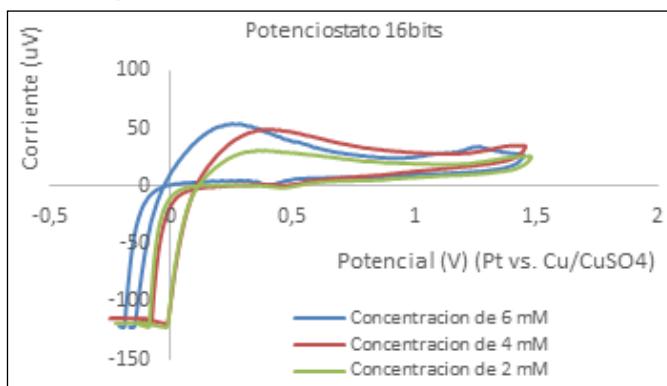


Figura 11. Voltamogramas cíclicos para ácido ascórbico (AA) a 2, 4 y 6 mM realizados con el potenciómetro de 16 bits.

La reacción estudiada es la de oxidación de ácido ascórbico. El pico observado en la figura 11 es atribuido a la oxidación del ácido. La ausencia de un pico de reducción confirma, como puede esperarse,

que se trata de un proceso irreversible [32]. Al aumentar la concentración, la intensidad de corriente del pico de oxidación en los voltamogramas cíclicos aumenta, lo cual resulta en una mayor área bajo la curva, tal como lo muestran Motahary *et al.* [33], Caretto y Braslavsky [34], y Suliborska *et al.* [35]. Por lo anterior, se puede concluir que el instrumento muestra una respuesta correcta al detectar menores valores de potencial para concentraciones más bajas.

Curvas de polarización y corrosión de acero al carbono

En la figura 12 se presentan las curvas de polarización obtenidas al graficar V vs. $\log(i)$ para analizar el comportamiento electroquímico del acero al carbono (SAE 1010) con y sin difenilamina como inhibidor de la corrosión.

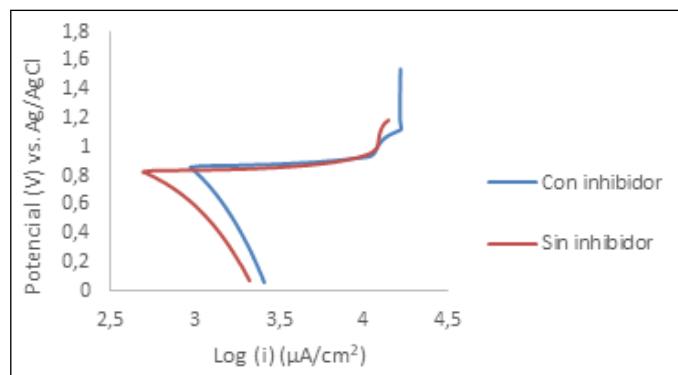


Figura 12. Curvas de polarización para la corrosión de acero al carbono en ácido sulfúrico 0,5 M con inhibidor (azul) y sin inhibidor (naranja). Potencial en V vs. Ag/AgCl (eje y) y logaritmo de la densidad de corriente (i) en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (eje x).

Se observa un desplazamiento del potencial de corrosión hacia valores más positivos, de 0,81 a 0,83 V, en presencia del inhibidor, coincidiendo con lo reportado por Lefrou *et al.* [36] y Revie y Uhlig [37]. La mayor diferencia entre ambas curvas es la densidad de corriente catódica, la cual es menor en presencia del inhibidor, como se esperaba. Este resultado indica la alta sensibilidad y especificidad del potenciómetro para estudios de corrosión electroquímica.

Cronoamperometría

La cronoamperometría es una técnica para medir la corriente que fluye a través de una celda electroquímica en función del tiempo. La figura 13 muestra las curvas de intensidad de corriente-tiempo.

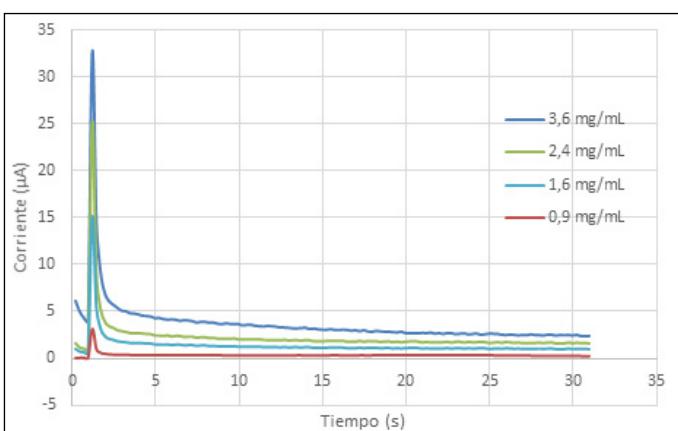


Figura 13. Gráfico de intensidad de corriente-tiempo para experimentos cronoamperométricos de mediciones de glucosa en una muestra de una bebida de cola comercial.

Para calcular la cantidad de glucosa en la solución, se elaboró una curva de calibración. En el presente estudio se utilizaron tres tiras para cada muestra de glucosa. Los valores de corriente se midieron a los 20 s y se representó el promedio de dichos valores frente a la concentración de glucosa, tal como se indica en la figura 14.

El potenciómetro desarrollado mostró una relación lineal de $0,87 \mu\text{A}$ decorriente por cada mg/mL aumento en la concentración de la glucosa en solución, con un coeficiente de determinación R^2 de 0,9813.

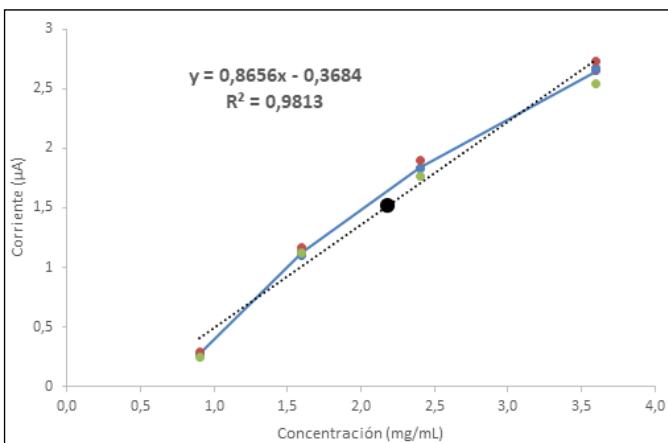


Figura 14. Curva de calibración. El punto negro representa los valores del refresco de cola.

Para corroborar los resultados obtenidos en este ensayo cronoamperométrico se tomó una muestra de una bebida de cola comercial, se diluyó 20 veces y se sometió al mismo ensayo que las soluciones de glucosa. El valor promedio de intensidad de la corriente medida a los 20 s, para el caso de la cola, fue de 1,52 μA, lo que representa, utilizando la curva de calibración de la figura 14, un valor de glucosa de 2,18 mg/mL, como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Valores obtenidos a partir del gráfico de la figura 14. Valor de referencia tomado de [38].

	Corriente (μA)	Glucosa (mg/mL)	Glucosa real (g/L)	Glucosa de referencia (g/L)	% de error (glucosa de referencia/glucosa real)
Cola	1,52	2,18	43,56	39	12

La comparación arrojó un error del 12%, el cual es menor al error máximo (15%) establecido para medidores de glucosa aprobados por la FDA [39]. Estos errores posiblemente se deben a la variación de la temperatura o la humedad relativa, a las diferencias propias de las tiras reactivas (enzimáticas) y a la resolución del potenciómetro [40].

Software

La figura 15 muestra el diagrama del software de los potenciómetros construidos.

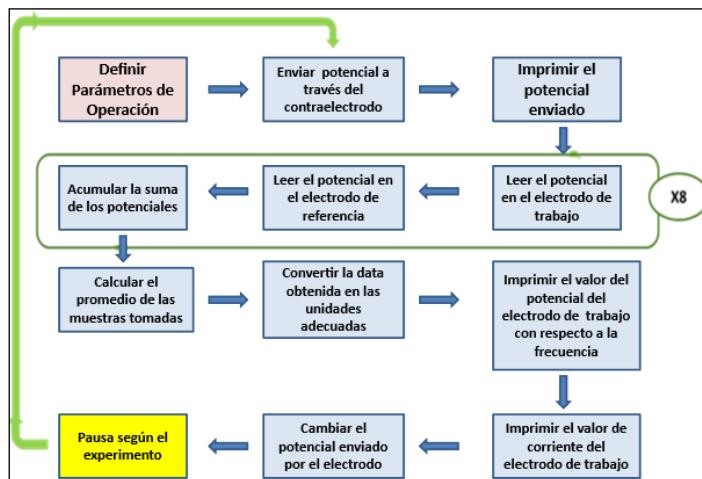


Figura 15. Esquema de funcionamiento del software de los potenciómetros construidos.

El programa envía tensión al CE con un potencial inicial, que es registrado por el terminal de comunicaciones del entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino. Un bucle se encarga de obtener el promedio de ocho muestras de tensión de los RE y WE. Después se leen los valores de potencial y corriente en ambos electrodos y se acumulan y guardan en un contador para ser divididos entre ocho. Una vez finalizado el bucle, se transforman matemáticamente am-

bos promedios a las unidades adecuadas y se guardan en el terminal en formato CSV. Para evitar deformar la señal de salida del CE, se recomienda agregar un *delay* si el barrido es demasiado lento o la resolución de la señal PWM no es suficiente. Luego se inicia un nuevo ciclo, ajustando el potencial según la fase del barrido. El programa de voltametría cíclica se desarrolló con el IDE de Arduino.

Análisis económico y comparación de costos

Para hacer un análisis económico y establecer una comparación de costos, se llevó a cabo un inventario de los componentes involucrados en el desarrollo del equipo. La evaluación se realizó únicamente con el último prototipo (versión 4.0) con el objeto de tener una idea clara de la inversión máxima requerida para un solo dispositivo, y considerando que en este modelo están integrados todos los componentes necesarios para su correcto funcionamiento. Los detalles del inventario necesario para la construcción del último prototipo de potenciómetro se encuentran detallados en la tabla 3.

Tabla 3. Costos de producción del último prototipo de potenciómetro.

Componente	Cantidad	Observación	Precio unitario (\$)	Costo total (\$)
Resistencia 10 kohm	1	Circuito RC PWM	0,2	0,2
Resistencia 100 kohm	4	OPAMP Offset SP	0,2	0,8
Resistencia 1 kohm	12	Demás OPAMP diferenciadores	0,2	2,4
Resistencia 100 ohm	1	Amplificación 1	0,2	0,2
Resistencia 50 kohm	1	Amplificación 2	0,2	0,2
Resistencia 10 kohm	1	Amplificación 3	0,2	0,2
Diodo Zener 5,1 V	2	Protección Arduino	2,0	4,0
OPAMP cuádruple LM324	2	OPAMP del circuito	2,6	5,2
Capacitor de 33 μF (PWM)	1	Circuito RC PWM	1,5	1,5
Arduino UNO	1	Controlador	10,0	10,0
Regulador de voltaje	2	Alimentación OPAMP	0,5	1,0
Resistencias de fuente	2	Alimentación OPAMP	0,2	0,4
Capacitor de fuente	2	Alimentación OPAMP	1,5	3,0
Cable jumper Arduino	6	Conexión de Arduino a circuito	0,2	1,0
Placa de cobre e impresión PCB	1	Imprimir en PCB	10,0	10,0
Caja de acrílico	1	Protección	2,0	2,0
Total				42,0

Adicionalmente se comparan, en la tabla 4, las diferentes variables que caracterizan a los potenciómetros con funciones similares encontradas en la bibliografía, incluyendo sus costos [2, 41-42] con

relación al Metrostat. La resolución ADC es la resolución del convertidor analógico a digital.

Tabla 4. Comparación de diferentes potencióstatos.

Nombre	Costo (\$)	Rango de voltaje (V)	Rango de corriente (mA)	Resolución ADC (bits)	Microcontrolador
PassStat 2.2	70	± 2,4	n/d	n/d	Teensy 3.6
PSoC-Stat	30(*)	± 2,0	0,10	12	(PSoC®) by Cypress Semiconductor
uMed **	25(**)	± 2,0	0,16	16	Atmega328 (Atmel)
DStat	120	± 1,5	10,00	24	ESP 32
CheapStat	80 - 135	± 1,0	0,05	12	XMEGA (Atmel)
Metrostat	< 50	± 2,5	1,52 µA ***	16	Arduino Uno

*Sólo el microprocesador.

** Asistido por un teléfono celular.

*** Para resistencias de transimpedancia de 100 ohm.

Resolución ADC: resolución del convertidor analógico a digital.

n/d: no disponible.

Conclusiones

Es posible construir potencióstatos de bajo costo y avanzados para investigación y docencia en el área electroquímica en la Universidad Metropolitana. Los resultados obtenidos de las pruebas con equipos y la comparación de los resultados con referencias bibliográficas, indican que se pueden comparar las versiones de 10 y 16 bits con dispositivos comerciales para garantizar la confiabilidad y fiabilidad del potencióstato construido.

El dispositivo es altamente sensible y específico para la realización de estudios de corrosión electroquímica. La resolución de 16 bits garantiza una alta precisión en las medidas. En los experimentos de corrosión se obtuvieron resultados que confirman la efectividad del inhibidor y la especificidad del potencióstato. En los estudios de oxidación de glucosa, se obtuvo un error dentro del límite aceptable según la FDA, lo que demuestra su utilidad para aplicaciones biomédicas, con margen de mejora en futuras optimizaciones.

La investigación de la tecnología existente permite conocer los diseños y componentes utilizados en la industria y seleccionar los más adecuados para construir un potencióstato de bajo costo. Por último, la selección de un prototipo de potencióstato basado en componentes de Arduino garantiza un bajo costo de producción y un mayor acceso a esta tecnología en Latinoamérica.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Decanato de Investigación y Desarrollo Académico por el financiamiento otorgado y al Departamento de Química de la Facultad de Ciencias y al Departamento de Energía y Automatización de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Metropolitana en Caracas, Venezuela, por proporcionar las instalaciones necesarias.

Referencias

- [1] M. Larios López, J. A. Gutierrez-Gnechi, J. L. Ramírez Reyes, A. C. Téllez Anguiano y J. C. González-Hernández, "Voltage Controlled Current Source for Atmospheric Corrosion Measurements", *ECS Transactions*, vol. 36, nro. 1, pp. 159–167, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1149/1.3660609>

- [2] J. Somoza, R. Bistel, S. Pavoni y J. Eirez Izquierdo, "Diseño y construcción de un sistema de medición potenciométrico", presentado en el VI Simposio Internacional de Electrónica: Diseño, Aplicaciones, Técnicas Avanzadas y Retos Actuales, La Habana, Cuba, 2018.
- [3] M. D. M. Dryden y A. R. Wheeler, "DStat: A Versatile, Open-Source Potentiostat for Electroanalysis and Integration", *PLoS ONE*, vol. 10, nro. 10, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140349>
- [4] B. Segura, F. N. Jiménez y L. Giraldo, "Prototipo de potencióstato con aplicaciones en procesos electroquímicos", *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 10, nro. 19, pp. 61–69, 2016. Disponible en: <https://revistas.ucp.edu.co/index.php/entrecienciaeingenieria/article/view/476>
- [5] J. O'M. Bockris, A. K. N. Reddy y M. Gamboa-Aldeco, *Modern Electrochemistry: Fundamentals of Electrodes*, vol. 2A, 2.a ed., New York, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [6] A. J. Bard, L. R. Faulkner y H. S. White, *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*, 3.^a ed. NJ, John Wiley & Sons Ltd, 2022.
- [7] Arduino, "Basics of PWM (Pulse Width Modulation)", 2022. [En línea]. Disponible en: <https://docs.arduino.cc/learn/microcontrollers/analog-output>
- [8] R. L. Boylestad y L. Nashelsky, *Operational Amplifiers*, NJ, Pearson Education, 2008.
- [9] S. Franco, *Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits*, 4.^a ed., McGraw-Hill Education, 2014.
- [10] M. Sadiku y Ch. Alexander, *Fundamentos de Circuitos Eléctricos*, 5.^a ed. McGraw-Hill/Interamericana Editores, 2013.
- [11] M. A. A. Mohamed, A. M. Elmahalawy y H. M. Harb, "Developing the pulse width modulation tool (PWMT) for two timer mechanism technique in microcontrollers", en 2013 Second International Japan-Egypt Conference on Electronics, Communications and Computers (JEC-ECC), pp. 148–153, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/JEC-ECC.2013.6766403>
- [12] J. Barrero, J. Amaya, A. Acevedo, J. Acevedo, G. Gonzalez y L. Morales, "Diseño y construcción de un prototipo de potencióstato galvanostato para el laboratorio de corrosión de la escuela de ingeniería metalúrgica", *Revista UIS Ingenierías*, vol. 3, nro. 1, pp. 29–40, 2004. Disponible en: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/2273>
- [13] G. N. Meloni, "Building a Microcontroller Based Potentiostat: A Inexpensive and Versatile Platform for Teaching Electrochemistry and Instrumentation", *Journal of Chemical Education*, vol. 93, nro. 7, pp. 1320. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00961>
- [14] J. Crespo, S. Elliot, T. Hutter y H. Águas, "Development of a low-cost Arduino-based potentiostat", *The University of Texas at Austin*, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.26153/tsw/11698>
- [15] K. Krorakai, S. Klangphukhiew, S. Kulchat y R. Patramanon, "Smartphone-Based NFC Potentiostat for Wireless Electrochemical Sensing", *Applied Sciences*, vol. 11, p. 392, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11010392>
- [16] M. Alfaro y I. Alfaro, "Construcción de un potencióstato de bajo costo para estudios de inhibición de corrosión de acero: determinación del potencial de corrosión y mediciones cronoamperométricas", *Educación Química*, vol. 28, nro. 4, pp. 269–274, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eq.2017.05.006>
- [17] A. Ramos y A. Hernández, "Un equipo de electroanálisis base Arduino y su uso en laboratorios de bajo costo", *Educación Química*, vol. 33, nro. 4, pp. 14–26, 2022. DOI: <https://doi.org/10.22201/10.22201/fq.18708404e.2022.4.0>
- [18] R. M. D. P. K. Rathnayaka, D. D. C. Wanniarachchi, C. H. Manathunga, R. A. D. D. Dharmasiri y W. K. I. L. Wanniarachchi, "Edu-PotStat: Construction and testing of a low cost potentiostat", *Journal Of Applied Physics (IOSR-JAP)*, vol. 12, nro. 5, pp. 10–18, 2020. Disponible en: <https://repositories.lib.utexas.edu/items/e1539eb4-de9c-4ff0-a643-91a1160bd9da>

- [19] A. W. Colburn, K. J. Levey, D. O'Hare y J. V. Macpherson, "Lifting the lid on the potentiostat: a beginner's guide to understanding electrochemical circuitry and practical operation", *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 23, nro. 14, pp. 8100–8117, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1039/D1CP00661D>
- [20] S. Eberlein y O. Vázquez, "Amplificador Operacional IDEAL (Edición 2017.1)", en A-15 - Dispositivos y Circuitos Electrónicos II, Rosario, Escuela de Ingeniería Electrónica, Universidad Nacional de Rosario Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, 2017. Disponible en: [https://www.fceia.unr.edu.ar/dce2/Files/Apuntes/AO%20IDEAL%20-%20Notas%20de%20Clase%20\(v-2017-1\).pdf](https://www.fceia.unr.edu.ar/dce2/Files/Apuntes/AO%20IDEAL%20-%20Notas%20de%20Clase%20(v-2017-1).pdf)
- [21] J. M. Drake Moyano, "Modelo del amplificador operacional real", en *Instrumentación Electrónica de Comunicaciones (5º Curso Ingeniería de Telecomunicación)*, Tema II, Santander, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, Universidad de Cantabria, 2005. Disponible en: https://www.ctr.unican.es/asignaturas/instrumentacion_5_it/iec_2.pdf
- [22] A. T. Ortega, L. Barrantes, B. D. Casallas y N. Cortés, "Aplicación de inhibidores verdes para el control de la corrosión en metales. revisión", *DYNA*, vol. 88, nro. 217, pp. 160–168, 2021. DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v88n217.93871>
- [23] H. Ashassi-Sorkhabi, B. Shaabani y D. Seifzadeh, "Corrosion inhibition of mild steel by some Schiff base compounds in hydrochloric acid", *Applied Surface Science*, vol. 239, nro. 2, pp. 154–164, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apusc.2004.05.143>
- [24] N. Barc'h, J. M. Grossel, P. Looten y M. Mathlouthi, "Kinetic study of the mutarotation of D-glucose in concentrated aqueous solution by gas-liquid chromatography", *Food Chemistry*, vol. 74, pp. 119–124, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(01\)00139-X](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(01)00139-X)
- [25] J. Gonzalo-Ruiz, M. A. Alonso-Lomilloy F. J. Muñoz, "Screen-printed biosensors for glucose determination in grape juice", *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 22, nro. 7, pp. 1517–1521, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2006.07.020>
- [26] T. Soranzo et al., "Electrochemical biosensing of glucose based on the enzymatic reduction of glucose", *Sensors*, vol. 22, nro. 19, p. 7105, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22197105>
- [27] J. M. Hobbs, N. N. Patel, D. W. Kim, J. K. Rugutt y A. K. Wanekaya, "Glucose determination in beverages using carbon nanotube modified biosensor: An experiment for the undergraduate laboratory", *Journal of Chemical Education*, vol. 90, nro. 9, pp. 1222–1226, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1021/ed300429a>
- [28] J. J. Gooding, W. Yang y M. Situmorang, "Bioanalytical experiments for the undergraduate laboratory: Monitoring glucose in sports drinks", *Journal of Chemical Education*, vol. 78, nro. 8, p. 788, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1021/ed078p788>
- [29] O. Amor-Gutiérrez, E. Costa-Rama y M. T. Fernández Abedul, "Determination of glucose with an enzymatic paper-based sensor", in *Laboratory Methods in Dynamic Electroanalysis*, Ed. Elsevier, 2020, pp. 257-265. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815932-3.00025-5>
- [30] R. G. Compton y C. E. Banks, *Understanding Voltammetry*, 3.^a ed., World Scientific Publishing Company, 2018.
- [31] C. H. Hamann, A. Hamnett y W. Vielstich, *Electrochemistry*, Wiley, 2007.
- [32] A. M. Pisoschi, A. F. Danet y S. Kalinowski, "Ascorbic Acid Determination in Commercial Fruit Juice Samples by Cyclic Voltammetry", *Journal of Automated Methods and Management in Chemistry*, pp. 1–8, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1155/2008/937651>
- [33] M. Motahary, S. M. Ghoreishi, M. Behpour y M. Salavati-Niasari, "Electrochemical determination of ascorbic acid at the surface of a graphite electrode modified with multi-walled carbon nanotubes/tetracycltrimethylammonium bromide", *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 40, nro. 4, pp. 841–847, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10800-009-0067-0>
- [34] M. A. Caretto y S. A. Braslavsky, *Theoretical and Applied Aspects of Bioinorganic Chemistry*, Springer, 1986.
- [35] K. Suliborska, M. Baranowska, A. Bartoszek, W. Chrzanowski y J. Namieśnik, "Determination of Antioxidant Activity of Vitamin C by Voltammetric Methods", *Proceedings*, vol. 11, nro. 1, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/proceedings2019011023>
- [36] C. Lefrou, R. P. Nogueira, F. Huet y H. Takenouti, "Electrochemistry", *Shreir's Corrosion*, vol. 1, pp. 13–51, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-044452787-5.00003-2>
- [37] R. W. Revie y H. H. Uhlig, *Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering*, John Wiley & Sons, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470277270>
- [38] E. E. Ventura, J. N. Davis y M. I. Goran, "Sugar content of popular sweetened beverages based on objective laboratory analysis: focus on fructose content", *Obesity*, vol. 19, nro. 4, pp. 868–874, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1038/oby.2010.255>
- [39] Food and Drug Administration, "Self-Monitoring Blood Glucose Test Systems for Over-the-Counter Use; Guidance for Industry and Food and Drug Administration Staff", 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.fda.gov/downloads/medicaldevices/deviceregulationandguidance/guidancedocuments/ucm380327.pdf>
- [40] A. M. Silva, E. C. da Silva y C. O. da Silva, "A theoretical study of glucose mutarotation in aqueous solution", *Carbohydrate Research*, vol. 341, nro. 8, pp. 1029–1040, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carres.2006.02.035>
- [41] P. Lopin y K. V. Lopin, "PSoC-Stat: A single chip open source potentiostat based on a Programmable System on a Chip", *PLoS ONE*, vol. 13, nro. 7, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201353>
- [42] I. Anshori et al., "ESPotensio: A Low-Cost and Portable Potentiostat With Multi-Channel and Multi-Analysis Electrochemical Measurements". *IEEE Access*, vol. 10, pp. 112578–112593, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3213725>

Citación del artículo:

J. C. Calderon Araujo, J. M. Barriola Damborenea, N. Confortti de Pérez, R. M. Rodriguez Bengoechea, R. Réquiz Cordero y M. M. Pérez Hernández, "Metrostat: desarrollo de potenciómetro asequible con Arduino para experimentos electroquímicos", *Rev. Colomb. Quim.*, vol. 53, nro. 1, pp. 37–44, 2024. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v53n1.115961>