



Cyborg Botany: Integración de un sistema híbrido de adquisición de datos basado en plantas y electrónica

Cyborg Botany: integration of a hybrid data acquisition system based on plants and electronics

Merino-Treviño, Marco Antonio (Corresponding author)

Tecnológico de Nacional de México
Instituto Tecnológico de Ciudad Madero
E-mail: mmerino@ipn.mx
<https://orcid.org/0000-0001-8901-5054>

Morales-Cepeda, Ana Beatriz
Tecnológico de Nacional de México
Instituto Tecnológico de Ciudad Madero
E-mail: ana.mc@cdmadero.tecnm.mx
<https://orcid.org/0000-0002-2376-5511>

Peraza-Vázquez, Hernán

Instituto Politécnico Nacional
Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada,
Unidad Altamira
E-mail: hperaza@ipn.mx
<https://orcid.org/0000-0002-7119-3108>

Onofre-Bustamente, Edgar

Instituto Politécnico Nacional
Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada,
Unidad Altamira
E-mail: eonofre@ipn.mx
<https://orcid.org/0000-0002-5706-887X>

Resumen

El presente trabajo describe el desarrollo de un sistema híbrido que combina plantas y tecnología electrónica avanzada para monitorear y analizar las señales bioeléctricas generadas por las plantas en respuesta a estímulos externos. Este sistema innovador utiliza un convertidor analógico-digital (ADC) ADS1256, controlado por un microcontrolador AVR Mega2560, lo que permite adquirir datos eléctricos de alta precisión desde las plantas, siendo la especie *Epipremnum aureum* (*potus*) la principal sujeta de estudio. Una característica destacada del sistema es la incorporación de nanopartículas de plata para mejorar la conductividad eléctrica de las plantas, lo que resulta en una mayor eficiencia en la captura de señales bioeléctricas. Los datos obtenidos se procesan en tiempo real mediante software desarrollado en Python, lo que facilita el análisis continuo de variables ambientales como la temperatura y la luz. Este avance tiene amplias aplicaciones potenciales en áreas como la agricultura inteligente, el monitoreo ambiental y el desarrollo de biosensores basados en plantas. A diferencia de los métodos convencionales de sensado, el uso de plantas como biosensores ofrece una solución más sostenible y con menor impacto ambiental. Además, el sistema abre nuevas posibilidades para la investigación de las interacciones bioelectrónicas en plantas y su adaptación a diferentes condiciones ambientales. El trabajo presenta un enfoque novedoso dentro del campo emergente de la Cyborg Botany, lo que sugiere que en el futuro estas tecnologías podrían integrarse en redes de monitoreo a gran escala para ofrecer soluciones más ecológicas en la gestión del medio ambiente.

Descriptor: Cyborg Botany, adquisición de datos, señales bioeléctricas, *Epipremnum aureum*, nanopartículas de plata, biosensores, tecnología vegetal.

Abstract

This paper describes the development of a hybrid system that combines plants and advanced electronic technology to monitor and analyze the bioelectrical signals generated by plants in response to external stimuli. This innovative system utilizes an ADS1256 analog-to-digital converter (ADC) controlled by an AVR Mega2560 microcontroller, allowing for the acquisition of high-precision electrical data from plants, with *Epipremnum aureum* being the primary species under study. A key feature of the system is the incorporation of silver nanoparticles to enhance the electrical conductivity of the plants, resulting in increased efficiency in capturing bioelectrical signals. The acquired data is processed in real time using software developed in Python, facilitating continuous analysis of environmental variables such as temperature and light. This advancement has wide potential applications in areas such as smart agriculture, environmental monitoring, and the development of plant-based biosensors. Unlike conventional sensing methods, the use of plants as biosensors offers a more sustainable solution with a lower environmental impact. Additionally, the system opens new possibilities for research into bioelectronic interactions in plants and their adaptation to different environmental conditions. This work presents a novel approach within the emerging field of Cyborg Botany, suggesting that in the future, these technologies could be integrated into large-scale monitoring networks to provide more eco-friendly solutions for environmental management.

Keywords: Cyborg Botany, data acquisition, bioelectrical signals, *Epipremnum aureum*, silver nanoparticles, biosensors, plant technology.

INTRODUCCIÓN

Los trabajos de Charles Darwin fueron cruciales con sus contribuciones a la botánica, ya que permitieron la comprensión del comportamiento, la adaptación y evolución de las plantas. Darwin exploró diversos aspectos de la biología vegetal, incluyendo el movimiento y las interacciones que las plantas tienen con su entorno. Su investigación sentó las bases para comprender cómo las plantas responden a estímulos externos (Darwin., 1875) y Burson (1873) quien fue el primero en descubrir los potenciales de acción (PA) en las plantas *Dionea muscipula*. Por tanto, las señales eléctricas no pertenecen exclusivamente al reino animal.

Bose (1926) empleó haces vasculares aislados de un helecho para demostrar que la excitación se propagaba como una perturbación eléctrica, aparentemente regulada por procesos fisiológicos comparables a los observados en los nervios animales. En 1929, se lograron registrar potenciales de acción PA mediante microelectrodos insertados en células de *Nitella* (Umrat, 1929) incluso antes del primer registro intracelular de un PA en células animales (Nastuk & Hodgkin, 1950). Posteriormente, durante la década de 1950, (Takao, 1962) demostró que la propagación de señales eléctricas en *Mimosa pudica* presentaba características similares a los PA observados en los sistemas nerviosos. Este conocimiento acumulado durante décadas sobre las señales eléctricas en las plantas ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías que nos permitan estudiar esos fenómenos con precisión y en tiempo real. El concepto de Cyborg Botany surge como una fusión entre plantas y tecnología de alta precisión para desarrollar un sistema mixto de monitoreo y recopilación de información. Estos avances nos permiten no solo estudiar las reacciones fisiológicas de las plantas frente estímulos externos; también abren nuevas posibilidades de interacción entre las plantas y la tecnología electrónica.

DESARROLLO

MÉTODOS Y PRUEBAS REALIZADAS

El propósito de este proyecto consistió en crear y ensamblar una tarjeta de adquisición de datos que se basa en el convertidor analógico-digital (ADC) ADS1256, un componente fundamental para registrar y convertir en formato digital las señales eléctricas generadas por las plantas como resultado de la respuesta ante fenómenos fisiológicos en el sistema vascular. El ADS1256 es un convertidor altamente preciso que se emplea extensamente en entornos industriales debido a su capacidad para procesar señales analógicas manteniendo un bajo nivel de ruido.

Este sistema innovador está creado para examinar las señales bioeléctricas que emiten las plantas en respuesta a estímulos externos como variaciones en la iluminación y temperatura. Esto facilita un análisis minucioso de los fenómenos eléctricos que tienen lugar en los tejidos vegetales. Para llevar a cabo esta tarea compleja y precisa el sistema se vale de un microcontrolador encargado de dirigir sus componentes periféricos y recopilar la información necesaria para su procesamiento en tiempo real mediante un software especializado.

Este avance representa un paso importante en la interacción entre las plantas y los sistemas electrónicos, ofreciendo una herramienta útil para investigar el potencial de las plantas como sensores bioelectrónicos. Al integrar seres vivos en redes de sensores, se abren nuevas oportunidades en el ámbito de la vigilancia ambiental y el desarrollo de tecnologías basadas en la Cyborg Botany.

En el desarrollo de este proyecto se emplearon varias herramientas informáticas distintas. Arduino IDE en su versión 2.3.3, una plataforma de desarrollo de código fuente abierto y gratuito muy popular en la programación de microcontroladores. También fue empleado el Python 3.12 a (64bits), un lenguaje de programación abierto conocido por su flexibilidad y capacidad para manejar grandes cantidades de información, así como por su integración en diferentes plataformas y herramientas. En el desarrollo del hardware se empleó un microcontrolador AVR Mega2560 y una pantalla OLED de 0.96 pulgadas junto al ADS1256 (ADC). Estos elementos fueron escogidos por su fiabilidad y disponibilidad en el mercado. La especie vegetal seleccionada fue *Epipremnum aureum* o "potos", reconocida por su vigoroso crecimiento y su capacidad de prosperar tanto en tierra firme como en entornos acuosos, además de su fácil propagación y resistencia a enfermedades (Figura 1a). Se llevó a cabo un procedimiento deliberado para añadir nanopartículas de plata a 10 % en peso (NP Ag 10 % wt), (Merino *et al.*, 2024) (Figura 1b), incorporadas en una estructura de α nanocelulosa, las cuales se prepararon siguiendo el método explicado por Macclesh del Pino *et al.* (2021), (Figura 2).

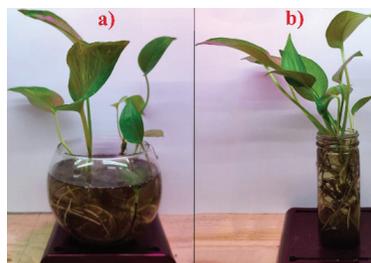


Figura 1. a) *Epipremnum aureum* sin nanopartículas, b) con nanopartículas de plata

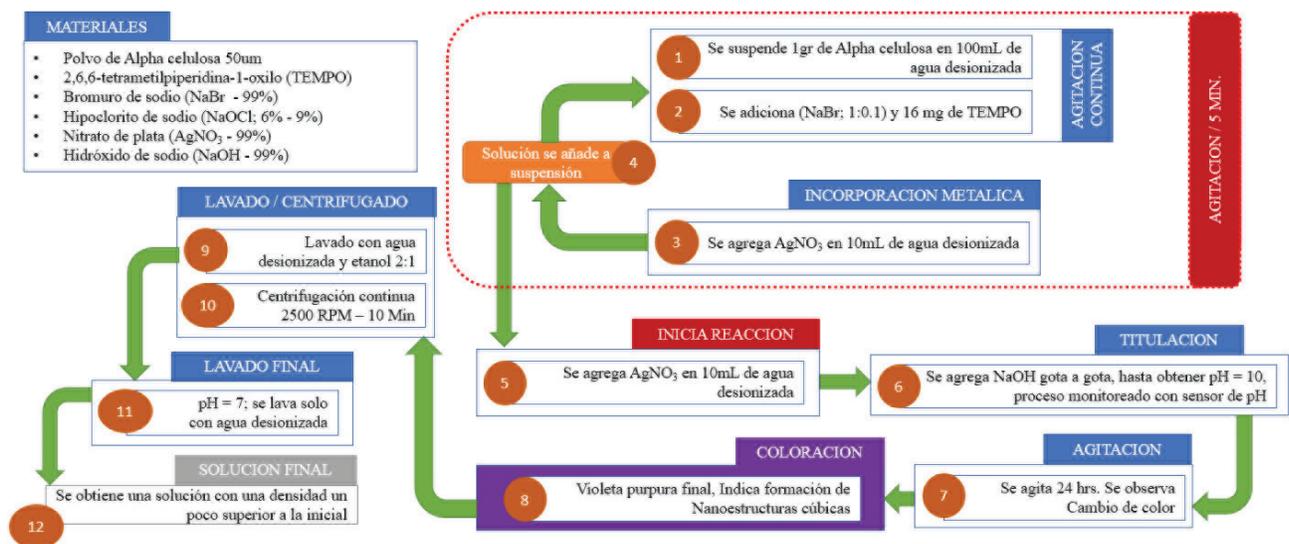


Figura 2. Diagrama de flujo para la síntesis de nanopartículas de plata (NP's Ag) insitu, metodología obtenida de (Macclesh del Pino et al., 2021)

ARQUITECTURA DEL SISTEMA

El diseño de la tarjeta se basa en una estructura modular. El microcontrolador AVR Mega 2560 actúa como el núcleo del sistema, encargado de controlar la comunicación con el convertidor analógico-digital ADS1256 a través del protocolo SPI (Interfaz Periférica Serial, por sus siglas en inglés). Por otro lado, la pantalla OLED, también conectada al microcontrolador, utiliza el protocolo I2C (Circuito Inter integrado) para optimizar el

uso de los pines disponibles (Figura 3). La comunicación con la computadora se lleva a cabo mediante un puerto serie, lo que facilita el envío de los datos adquiridos para su posterior análisis. El ADS1256 puede configurarse para muestrear hasta sus 8 canales disponibles, proporcionando datos con una resolución de hasta 24 bits, lo que lo hace ideal para aplicaciones que requieren alta precisión en la adquisición de señales (Ecuación 1).

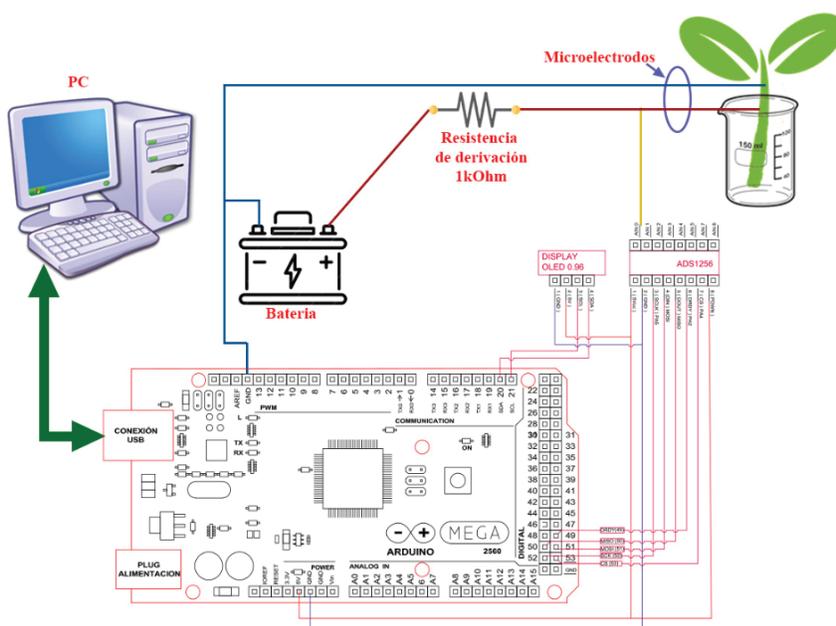


Figura 3. Esquemático de conexión microcontrolador y periféricos

La Ecuación 1 corresponde al cálculo de la resolución teórica del convertidor analógico-digital (ADC) ADS1256, un componente de alta precisión ampliamente utilizado en aplicaciones científicas. La resolución de un ADC define el cambio mínimo de voltaje que puede detectar entre dos niveles digitales sucesivos y se expresa mediante la relación:

$$\text{Resolución} = \frac{V_{\text{Ref}}}{2^n}$$

Ecuación 1. Cálculo de resolución de un ADS1256

Donde V_{Ref} es el voltaje de referencia del convertidor y n representa la cantidad de bits de resolución del ADC. En el caso específico del ADS1256, este dispositivo opera con una resolución de 24 bits, lo que significa que puede discriminar $2^{24} = 16,777,216$ niveles discretos.

Para este experimento se ha considerado un voltaje de referencia de 3.3 V, valor común en sistemas de adquisición de datos alimentados por fuentes estándar de bajo voltaje. Sustituyendo estos valores en la ecuación, se obtiene:

$$\text{Resolución} = \frac{V_{\text{Ref}}}{2^{24}} = \frac{3.3\text{V}}{16,777,216} \approx 0.000000197\text{V} = 0.197\mu\text{V} \quad (2)$$

Este resultado indica que el sistema es capaz de detectar variaciones de voltaje tan pequeñas como 0.197 microvoltios, lo cual es especialmente relevante en la adquisición de señales bioeléctricas de baja amplitud generadas por plantas. Esta precisión permite capturar respuestas fisiológicas sutiles que serían imperceptibles con sistemas de menor resolución. Además, el ADS1256 cuenta con amplificadores de ganancia programable (PGA), lo que extiende aún más su aplicabilidad en contextos de sensado altamente sensibles como los estudiados en la presente investigación.

El microcontrolador se encarga de recibir los datos adquiridos por el convertidor analógico-digital y procesarlos tanto para su visualización local en una pantalla OLED como para su envío a una aplicación desarrollada en Python, donde se realiza un análisis y visualización más detallada. Para lograr esta funcionalidad, en el diseño del sistema de adquisición de datos se implementaron dos protocolos de comunicación serie distintos: SPI (Serial Peripheral Interface) e I²C (Inter-Integrated Circuit).

El protocolo SPI fue empleado para establecer la comunicación entre el microcontrolador y el ADS1256, ya que este convertidor de 24 bits opera con tasas de muestreo elevadas y requiere un canal de transmisión rápido, síncrono y de baja latencia. Gracias a su naturaleza full-duplex, SPI permite una transferencia eficiente

y continua de grandes volúmenes de datos, lo cual es esencial para la adquisición de señales bioeléctricas de alta precisión.

En paralelo, la pantalla OLED se comunica mediante el protocolo I²C, adecuado para dispositivos que no demandan un gran ancho de banda. Esta elección permite optimizar el uso de los pines del microcontrolador, ya que I²C utiliza únicamente dos líneas (SDA y SCL) para controlar múltiples dispositivos esclavos, facilitando así la expansión del sistema sin comprometer su simplicidad.

El uso simultáneo de ambos protocolos en una misma tarjeta representa una estrategia eficiente y habitual en el diseño de sistemas electrónicos embebidos, ya que permite asignar a cada periférico el tipo de comunicación más apropiado de acuerdo con sus necesidades operativas.

Una vez adquiridas, las señales bioeléctricas son amplificadas internamente por el ADS1256 y convertidas en datos digitales mediante su resolución de 24 bits. Estos datos se transmiten al microcontrolador AVR Mega2560 utilizando el protocolo SPI, el cual asegura una transferencia de alta velocidad y baja latencia. Posteriormente, el microcontrolador envía la información a una computadora a través de la interfaz de comunicación serial. En este punto, un script desarrollado en Python se encarga de recibir los datos, almacenarlos con marcas temporales y procesarlos para su análisis. Este flujo de datos permite el monitoreo en tiempo real de la actividad eléctrica de la planta, facilitando la observación de variaciones relacionadas con estímulos ambientales.

INTERFAZ CON PYTHON

Una parte fundamental del proyecto es la integración entre la tarjeta de adquisición de datos y una aplicación desarrollada en Python. Para lograr esto, se creó un script en Python que recibe los datos transmitidos a través de la interfaz serie del microcontrolador. El script no solo registra los datos de voltaje adquiridos por el ADS1256, sino también toma la hora, minutos, segundos y la fecha para generar automáticamente un archivo de texto con un nombre único. Esta estrategia permite organizar eficientemente los datos capturados para un posterior análisis. Una vez completada la adquisición, los datos se grafican y se someten a un análisis detallado para interpretar la información de manera efectiva.

CONSTRUCCIÓN DE MICROELECTRODOS

Para el desarrollo de las sondas, se utilizó alambre de acero inoxidable de grado quirúrgico, comúnmente empleado en odontología para la fabricación de Brackets, debido a su alta resistencia a la corrosión y biocompatibilidad. La sonda fue diseñada con electrodos espaciados a intervalos que van desde 1 mm hasta 1 cm, lo que permite una amplia gama de mediciones precisas.

Cada electrodo tiene una longitud de 5 cm, garantizando una superficie de contacto suficiente para la captación de señales eléctricas. Además, para asegurar la durabilidad y protección de las sondas, se empleó una resina foto curable activada por luz ultravioleta (UV), la cual proporciona un sellado firme y resistente a las condiciones de operación.

Este diseño garantiza la fiabilidad de las sondas en la adquisición de datos, asegurando que los electrodos mantengan su integridad estructural durante el uso prolongado (Figura 4).

El sistema de adquisición de datos desarrollado no solo depende del hardware, sino también de un entorno de software cuidadosamente diseñado para procesar, almacenar y visualizar la información recolectada. Para ello, se elaboró un script en Python que permite una comunicación fluida con el microcontrolador a través del puerto serial. Este script emplea bibliotecas especializadas como **pyserial**, que facilita la lectura de los datos enviados en tiempo real; **datetime**, para registrar automáticamente la hora y fecha de cada medición; y **matplotlib**, que genera gráficas que representan el comportamiento eléctrico de la planta.

Adicionalmente, se integra la biblioteca **pandas**, ampliamente utilizada en ciencia de datos, que organiza la información en estructuras tipo tabla, permitiendo un análisis más ordenado y flexible. El script está

diseñado con una estructura modular, lo que significa que puede modificarse fácilmente para agregar nuevos sensores, aplicar algoritmos de filtrado o exportar los datos en distintos formatos.

Esta integración entre hardware y software convierte al sistema en una plataforma robusta para monitorear procesos fisiológicos en plantas, permitiendo observar en tiempo real cómo las señales eléctricas varían frente a cambios ambientales, y conservar los datos para análisis posteriores más profundos.

BIOINTERACCIÓN CON LA ESPECIE *EPIPREMNUM AUREUM*

Para el desarrollo de biointeracción se utilizó un montaje entre el sistema electrónico, la tarjeta de adquisición de datos y la planta *Epipremnum aureum*. En este caso, la planta está siendo conectada a diferentes partes: raíz, tallo y hojas a un circuito electrónico. Este circuito está diseñado para monitorear la generación de corriente eléctrica (Figura 5), producidos por la planta y su interacción con el entorno (Figura 6).

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los gráficos presentados muestran las variaciones de voltaje en función del tiempo para la planta *Epipremnum aureum*, con y sin la presencia de nanopartículas (NP), bajo diferentes resistencias de derivación: 1 Ohm, 10 Ohm, 100 Ohm y 1 Kohm (Figuras 7, 8,9,10).

VOLTAJE CON RESISTENCIA DE 1 OHM

El primer gráfico muestra una diferencia notable entre las mediciones con y sin NP. Se observa que la curva de voltaje con NP tiene mayores fluctuaciones en comparación con la medición sin NP. Esto sugiere que la incorporación de nanopartículas está afectando el

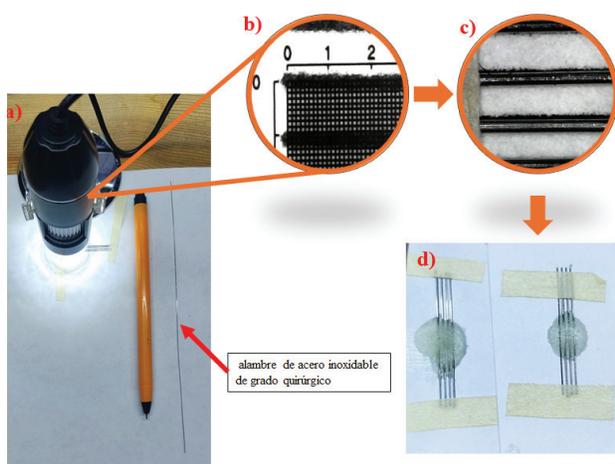


Figura 4. La imagen presenta el proceso de desarrollo y ensamblaje de las sondas construidas con alambre de acero inoxidable de grado quirúrgico para la medición de señales bioeléctricas en plantas. a) Se muestra una vista general del equipo utilizado, incluyendo un microscopio digital que inspecciona el alambre de acero quirúrgico, el cual se encuentra junto a un bolígrafo como referencia de escala. Este alambre fue seleccionado por su alta resistencia a la corrosión y durabilidad, características cruciales para su uso en entornos experimentales. b) Muestra un acercamiento del alambre, donde se observa la separación entre los electrodos, la cual es de 1 mm, permitiendo una distribución precisa y uniforme para la captación de señales. c) Se puede apreciar un detalle de los electrodos paralelos ya alineados, listos para ser encapsulados. Estos electrodos están dispuestos con precisión para garantizar que la distancia entre ellos sea constante, lo que facilita la captura de señales eléctricas sin interferencias. d) Se observa el montaje final de las sondas, donde los alambres han sido encapsulados en una resina foto curable para asegurar su estabilidad y aislamiento. Este encapsulado fue realizado mediante luz ultravioleta (UV), protegiendo las conexiones y asegurando su durabilidad en condiciones experimentales

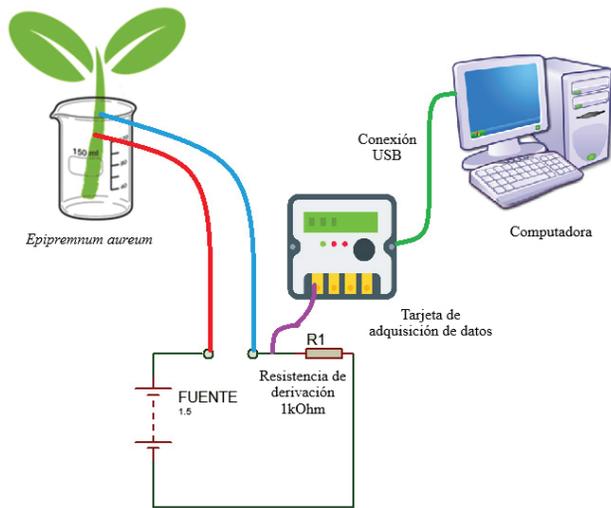


Figura 5. Conexión tarjeta de adquisición de datos a planta *Epipremnum aureum*

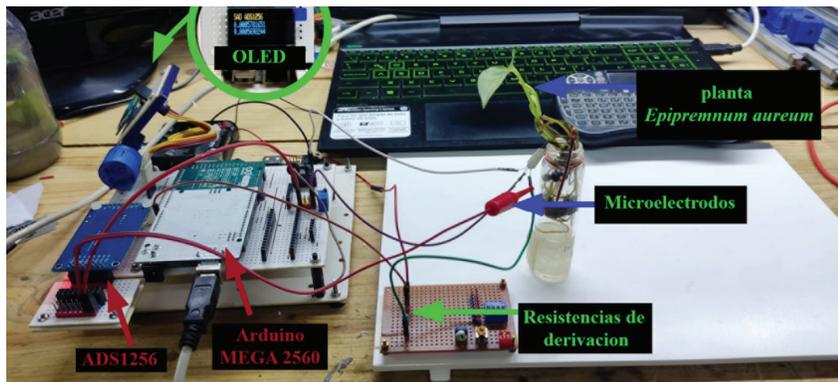


Figura 6. Montaje experimental que muestra la biointeracción entre una planta *Epipremnum aureum* y un sistema de adquisición de datos

comportamiento eléctrico de la planta, aumentando la conductividad, facilitando la transferencia de electrones a través de la interfase planta-sistema (Figura 7).

eléctricas generadas en la planta, lo que se debe a un mayor número de caminos para la transferencia eléctrica a través de las NP (Figura 8).

VOLTAJE CON RESISTENCIA DE 10 OHM

A medida que incrementa la resistencia de derivación, se observa una tendencia similar: Las mediciones con NP muestran mayores fluctuaciones y amplitudes en el voltaje. Las nanopartículas amplifican las señales

VOLTAJE CON RESISTENCIA DE 100 OHM

En el gráfico con una resistencia de 100 Ohm, las diferencias entre las mediciones con y sin NP son me

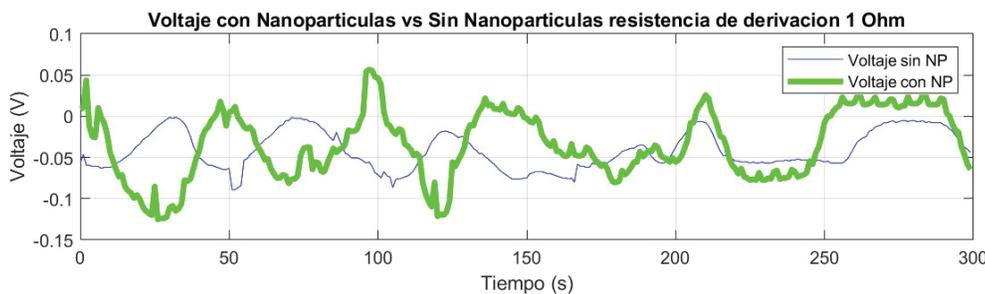


Figura 7. Gráfico del voltaje medido en función del tiempo con una resistencia de derivación de 1 Ohm. Se comparan las mediciones realizadas con nanopartículas (NP) y sin nanopartículas (sin NP) en la planta *Epipremnum aureum*

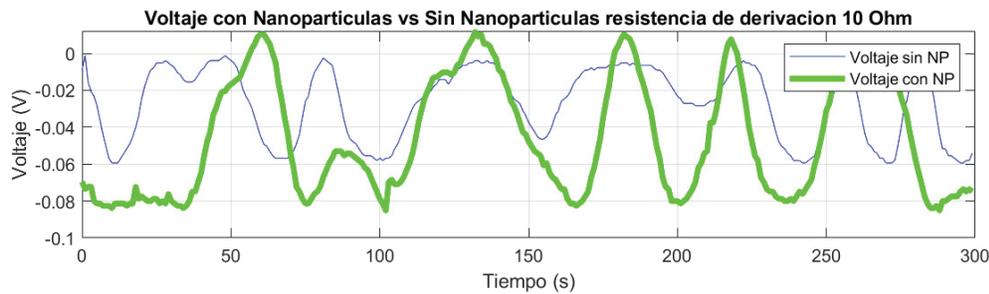


Figura 8. Gráfico del voltaje medido en función del tiempo con una resistencia de derivación de 10 Ohm. Se presentan las mediciones con nanopartículas (NP) y sin nanopartículas (sin NP) en la planta *Epipremnum aureum*

nos pronunciadas. Sin embargo, todavía se aprecia que las mediciones con NP presentan una amplitud levemente superior en ciertas partes del gráfico. Esto puede estar relacionado con la resistencia interna de la planta y cómo interactúa con la resistencia externa de 100 Ohm (Figura 9).

VOLTAJE CON RESISTENCIA DE 1 kOHM

Finalmente, en el gráfico con 1 kOhm de resistencia de derivación, las mediciones con NP muestran una tendencia más estable y menos fluctuante en comparación con las mediciones de menor resistencia. Aunque las fluctuaciones con NP siguen siendo mayores que sin NP, las diferencias se suavizan, lo que sugiere que, a resistencias más altas, la influencia de las NP se estabiliza (Figura 10).

ANÁLISIS

Los resultados indican que la adición de nanopartículas a la planta tiene un efecto significativo en el com-

portamiento eléctrico de la misma. La presencia de NP parece facilitar la transferencia de electrones o modificar las propiedades electroquímicas de la planta, como la capacitancia o la conductividad. Este comportamiento es más evidente a menores valores de resistencia de derivación, lo que podría estar relacionado con el impacto que las NP tienen sobre la interfaz de la planta.

A medida que se incrementa la resistencia de derivación, el efecto de las nanopartículas parece disminuir, sugiriendo que, a resistencias más altas, las propiedades internas de la planta dominan sobre los efectos de las NP. Esta observación es relevante para el diseño de futuros experimentos, ya que indica que las condiciones eléctricas externas (como la resistencia de derivación) juegan un papel importante en la amplificación o atenuación de los efectos de las nanopartículas en sistemas bioelectroquímicos.

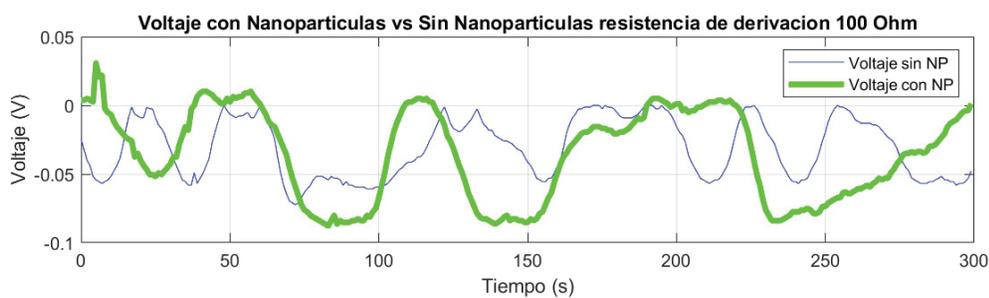


Figura 9. Gráfico del voltaje medido en función del tiempo con una resistencia de derivación de 100 Ohm. Se presentan las mediciones con nanopartículas (NP) y sin nanopartículas (sin NP) en la planta *Epipremnum aureum*

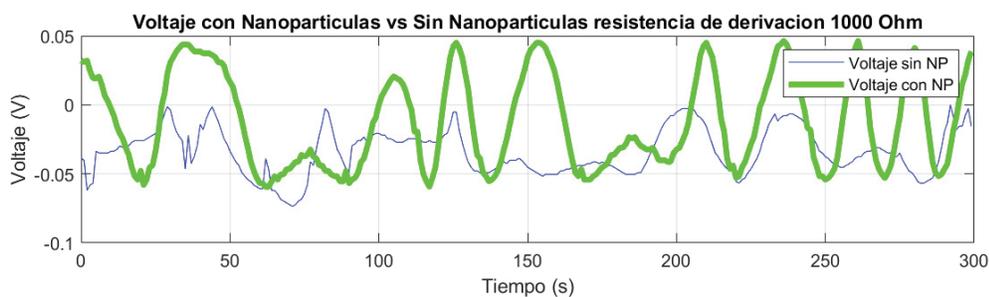


Figura 10. Gráfico del voltaje medido en función del tiempo con una resistencia de derivación de 1 kOhm. Se presentan las mediciones con nanopartículas (NP) y sin nanopartículas (sin NP) en la planta *Epipremnum aureum*

CONCLUSIONES

La investigación realizada en torno a la biointeracción con la especie *Epipremnum aureum* y su integración en sistemas híbridos de adquisición de datos ha demostrado que la incorporación de nanopartículas de plata (NP) tiene un impacto significativo en las propiedades bioelectroquímicas de la planta. Los resultados obtenidos destacan varias contribuciones e innovaciones clave:

- *Incremento en la generación de señales bioeléctricas:* La adición de nanopartículas de plata resultó en un aumento en las fluctuaciones de voltaje generadas por la planta. Esto sugiere que las NP facilitan una transferencia más eficiente de electrones, lo que amplifica las señales eléctricas registradas, especialmente en resistencias más bajas como 1 y 10 Ohm.
- *Modulación de la señal según la resistencia de derivación:* Se observó que a medida que aumenta la resistencia de derivación, la influencia de las nanopartículas se estabiliza, con diferencias más moderadas a 100 Ohm y 1 kOhm. Este comportamiento sugiere que las propiedades electroquímicas internas de la planta y la interfase con las NP dependen directamente de las condiciones eléctricas externas.
- *Aplicaciones tecnológicas avanzadas:* El sistema desarrollado abre nuevas posibilidades en el campo de los biosensores y la vigilancia ambiental basada en plantas. El uso de plantas como *Epipremnum aureum* en combinación con tecnologías de adquisición de datos puede ser una herramienta poderosa para el monitoreo de cambios ambientales en tiempo real, con un enfoque sustentable y adaptable.
- *Innovación en sistemas bioelectrónicos:* Este trabajo representa un avance significativo en la integración de sistemas biológicos y tecnológicos, demostrando que las plantas, cuando se combinan con nanomateriales y tecnologías de adquisición de datos precisas, pueden actuar como sensores bioelectrónicos capaces de generar información valiosa para aplicaciones en el ámbito científico y tecnológico.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por CONAHCyT (Consejo Mexicano de Humanidades, Ciencia y Tecnología) a través de la subvención Núm. CF-2023-I-342. El Instituto Politécnico Nacional proporcionó financiación adicional. (IPN) a través de la subvención SIP-Núm. 20231424. Contribuciones de los autores: Conceptuali-

zación: HP-V, Metodología: MM-T, ABM-C y EO-B, Investigación: MM-T, HP-V, ABM-C y EO-B, Visualización: MM-T y HP-V, Supervisión: HP-V y EO-B, Escritura-borrador original: MM-T, Escritura: Revisión y edición: HP-V, EO-B y MM-T. Intereses en competencia: Todos los demás autores declaran que no tienen intereses en competencia. Disponibilidad de datos y materiales: Todos los datos están disponibles en el texto principal.

REFERENCIAS

- Bose, J. (1926). *The Nervous Mechanism of Plants*. London, New York: Longmans, Green and Co, LTD.
- Burson, S. (1873). Electrical phenomena in the leaf of *Dionea muscipula*. *Proc roy Soc* 21, 495-496.
- Darwin, C. (1875). *Insectivorous Plants* By Charles Darwin. Theological Seminary, 492.
- Macclesh del Pino, L. A., Morales-Cepeda, A. B., Castro-Guerrero, C. F. & León-Silva, U. (2021). One step in situ synthesis of Ag/AgCl nanoparticles in a cellulose nanofiber matrix for the development of energy storage paper. *Cellulose*, 28(15), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03922-7>
- Merino-Treviño, M. A., Morales-Cepeda, A. B., Peraza-Vazquez, H., & Onofre-Bustamante, E. (2024). Plants with silver nanoparticles to improve electrical conductivity: an innovative approach in biology. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(7):1-12. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05837-9>
- Nastuk, W. L., & Hodgkin, A. L. (1950). The electrical activity of single muscle fibers. *Journal of Cellular and Comparative Physiology*, 35, 39-73. <https://doi.org/10.1002/JCP.1030350105>
- Takao S. (1962). Excitable Cells in *Mimosa*. *Science*, 1037(3525), 226. <https://doi.org/10.1126/science.137.3525.226>

How to cite:

Merino-Treviño, M. A., Morales-Cepeda, A. B., Peraza-Vázquez, H., & Onofre-Bustamante, E. (2025). Cyborg Botany: Integración de un sistema híbrido de adquisición de datos basado en plantas y electrónica. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 26(03), 1-8. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2025.26.3.023>