Instrumentación didáctica de bajo costo basada en ESP32: Una aproximación IoT para la determinación y la enseñanza de la constante de Planck

EDVCATIO PHYSICORVM
SIC ITVR AD ASTRA
QVO NON ASCENDAM?

ISSN 1870-9095

Alma Antonia Perez-Mondragón[1], **Jovani Ortega-Ventura**[1], **Luis Humberto Mendoza-Huizar**[2]

[1]*Dirección de Laboratorios, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo Kilómetro 4.5, Mineral de la Reforma 42184, Hidalgo, México.*

[2]*Area Académica de Química, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca–Tulancingo Kilómetro 4.5, Mineral de la Reforma 42184, Hidalgo, México.*

E-mail: hhuizar@uaeh.edu.mx

(Recibido el 4 de junio de 2026, aceptado el 15 de junio de 2026)

Abstract

This work presents the design and development of an embedded electronic system, named LabLED, based on the ESP32 microcontroller. The device is designed for the experimental determination of Planck's constant *h* through the analysis of the current–voltage *I*/*V* characteristics of light-emitting diodes (LEDs) operating at different wavelengths. The integration of Internet of Things (IoT) technology enables the automated acquisition, digitization, and transmission of electro-optical data to a remote server. This approach improves statistical reliability while reducing the systematic errors commonly associated with manual data collection. Experimental results demonstrate that the proposed system can achieve an accuracy comparable to that of considerably more expensive laboratory instruments, while maintaining a total cost below USD $20. From an educational perspective, the implementation of the system in laboratory environments has shown that students perceive the platform as intuitive and user-friendly. Its use simplifies the measurement process, reduces data acquisition time, and promotes more active engagement with the experimental procedure.

Keywords: Planck's constant, LEDs, ESP32, PACS: 01.40.–d, 01.50.Pa, 06.20.-f

Resumen

En este trabajo se describe el diseño y la implementación de un sistema electrónico embebido, denominado LabLED, basado en el microcontrolador ESP32. Este dispositivo está destinado a la determinación experimental de la constante de Planck *h* mediante el análisis de las características de corriente-voltaje *I*/*V* en diodos emisores de luz (LEDs) de diversas longitudes de onda. La integración de tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) permite la digitalización y transmisión de parámetros electro-ópticos a un servidor remoto, optimizando la precisión estadística y reduciendo las incertidumbres sistemáticas asociadas a la toma manual de datos. Los resultados demuestran que es posible alcanzar una precisión comparable a equipos de alta gama con un costo inferior a los $20 USD. Desde el punto de vista educativo, la implementación del sistema en el laboratorio ha mostrado que los estudiantes perciben su uso como intuitivo y accesible, lo que facilita la realización de mediciones en tiempos reducidos y promueve una interacción más activa con el experimento.

Palabras clave: Constante de Planck, LEDS, ESP32, PACS: 01.40.–d, 01.50.Pa, 06.20.-f

I. INTRODUCCIÓN

La constante de Planck *h* constituye uno de los pilares fundamentales de la física moderna, pues define la escala de los fenómenos cuánticos y establece la relación de proporcionalidad entre la energía y la frecuencia de la radiación electromagnética [1, 2]. En el ámbito académico, la determinación experimental de esta constante es importante en la formación de estudiantes de ciencias e ingeniería. No obstante, la implementación de este experimento enfrenta frecuentemente barreras económicas significativas debido al elevado costo del equipamiento especializado.

Históricamente, la determinación de *h* en los laboratorios de enseñanza se ha realizado mediante el efecto fotoeléctrico o el uso de tubos de difracción de electrones [3]. Equipos comerciales diseñados para estos fines basados en el efecto fotoeléctrico [4], pueden alcanzar costos que oscilan entre los $2,000 y $5,000 USD. Estas cifras resultan prohibitivas para muchas instituciones educativas, especialmente en centros de educación pública básica o secundaria, lo que confina el

aprendizaje de la física cuántica a un plano meramente teórico y abstracto. Ante este panorama, el diseño de instrumentación científica de bajo costo, basada en hardware de código abierto y componentes comerciales como los diodos emisores de luz (LEDs), representa una estrategia pedagógica de alto valor. A pesar de que el método de determinación de h mediante el uso de LEDs ha sido ampliamente documentado [5–8]; su implementación en entornos educativos sigue siendo especialmente relevante por su simplicidad conceptual y su accesibilidad experimental. En este método, la determinación de h mediante LEDs se basa en el fenómeno de la electroluminiscencia. Al aplicar un potencial externo, los portadores de carga superan la barrera de energía del semiconductor E_g. Cuando un electrón atraviesa una diferencia de potencial V_u, adquiere una energía dada por [5–8]:

$$E = e \cdot V_u \tag{1}$$

Este término representa la energía eléctrica suministrada, la cual se relaciona con la energía de banda prohibida del semiconductor E_g. Dicha energía corresponde a la necesaria para que un electrón transite de la banda de valencia a la banda de conducción. En dispositivos como los LEDs se cumple que:

$$E_g \approx e \cdot V_u \tag{2}$$

Por otra parte, la energía del fotón emitido está relacionada al voltaje umbral o de encendido del LED mediante la relación:

$$E_g \approx \frac{h \cdot c}{\lambda} \tag{3}$$

Esto se debe a que el voltaje aplicado está directamente relacionado con la energía necesaria para producir la recombinación electrón-hueco. El uso del símbolo "≈" (aproximadamente) se justifica por la presencia de pérdidas en el sistema, tales como disipación de energía en forma de calor y recombinaciones no radiativas. Por ello, no toda la energía eléctrica suministrada se transforma en energía luminosa. Combinando las ecuaciones (1) a la (3), se tiene:

$$h \approx \frac{\lambda \cdot e \cdot V_u}{c} \tag{4}$$

Lo que permitiría evaluar la constante de Planck de forma aproximada empleando la longitud de onda del fotón generado λ y el potencial aplicado. Es importante señalar que, de manera convencional, la mayoría de las implementaciones pedagógicas actuales dependen de mediciones manuales con multímetros analógicos o digitales, lo que introduce errores sistemáticos y limita la cantidad de datos procesables para un análisis estadístico riguroso. Adicionalmente, los valores de V_u se determinan a partir de la observación visual del encendido del LED, lo que introduce errores subjetivos asociados al "ojo humano", que pueden alcanzar hasta un 20%. En este contexto, la transición hacia el concepto de "Laboratorio 4.0" [9], y el uso de Arduino y la tarjeta de desarrollo ESP32 [10], con una resolución ADC de 12 bits, permiten digitalizar la curva característica descrita por la ecuación de Shockley [11], y obtener V_u mediante extrapolación lineal. De este modo, se eliminan tanto el error de paralaje como la subjetividad inherente a la observación visual. En concordancia con la filosofía de construcción de equipo científico de bajo costo; en este trabajo se propone integrar la capacidad de cómputo del Arduino ESP32 con una arquitectura basada en Internet de las Cosas (IoT). Esta integración permite no solo la captura precisa de una curva característica corriente-voltaje I/V, sino también la visualización remota de los datos, transformando el experimento convencional en una herramienta de laboratorio 4.0 accesible. El presente artículo describe el desarrollo de este sistema automatizado, demostrando que la sofisticación científica y la precisión experimental pueden alcanzarse sin depender de presupuestos elevados.

II. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

LabLED es un dispositivo diseñado para medir el voltaje y la corriente en diodos emisores de luz (LED) de hasta cuatro colores distintos eligiendo uno de ellos mediante un cable selector.

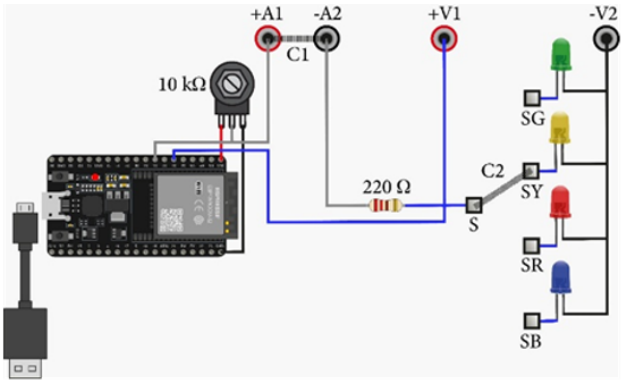

FIGURA 1. Circuito de polarización variable manual.

El equipo se puede energizar a través de un cable micro USB que se conecta a una tarjeta ESP32, un microcontrolador de bajo costo y alto rendimiento diseñado para diferentes aplicaciones electrónicas. Además, cuenta con capacidades de conectividad Wi-Fi local y Bluetooth. La figura 1 muestra el diagrama representativo de las conexiones y elementos principales del dispositivo. Asimismo, el dispositivo fabricado y listo para ser utilizado se presenta en la figura 2. La lista de materiales empleada para su construcción se reporta en la tabla 1.

Como material suplementario a este artículo, se agrega el código del programa empleado para obtener los resultados reportados en este trabajo.

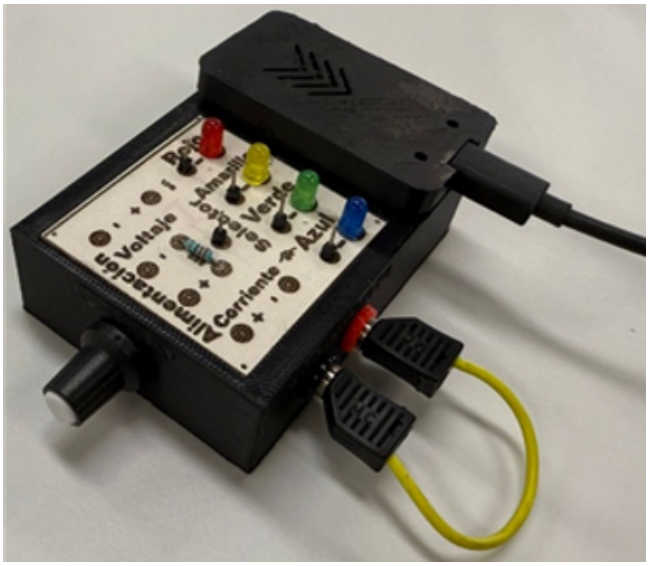

FIGURA 2. Dispositivo LabLED.

TABLA 1. Lista de materiales usados para construir el dispositivo LabLED.

Cantidad	Descripción
1	ESP-32 Wroom
1	Potenciómetro de 10 k Ω
1	Resistencia 220 Ω
2	Terminal hembra tipo Banana (Rojo)
2	Terminal hembra tipo Banana (Negro)
5	Pin de cabecera macho
1	Cable tipo Dupont H-H
1	Led color rojo
1	Led color verde
	Led color ámbar
1	Led color azul
1	Case o chasis para dispositivo de PLA
1	Cable de conexión calibre 24 AWG (2 m).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El dispositivo LabLED permite realizar mediciones de dos maneras. La primera consiste en utilizar una interfaz digital a la que se puede acceder desde dispositivos móviles, como teléfonos inteligentes y tabletas, o desde una computadora, facilitando la visualización y el registro de los datos obtenidos. La segunda opción contempla el uso de instrumentos de medición convencionales, conectados a las terminales de voltaje y corriente del equipo, como multímetros digitales. De esta forma, el sistema puede emplearse tanto con herramientas de adquisición de datos modernas como con equipos de laboratorio de uso habitual, adaptándose a diferentes necesidades y dinámicas de trabajo.

En ambos casos, el objetivo de LabLED es permitir al usuario llevar un registro para analizar las variaciones de voltaje y corriente en función del color y del umbral de encendido de cada LED.

En el caso del método basado en la interfaz digital, LabLED cuenta con un programa (cargado en la ESP32) que se encarga de crear una red local llamada “ESP32_1”. El usuario se conecta a esta red desde su dispositivo portátil o equipo de cómputo mediante una contraseña (para este caso es: password123). Este programa se proporciona como anexo. Desde el navegador web, al ingresar la dirección IP 192.168.4.1, se despliega una interfaz gráfica (creada por el programa previamente ejecutado) que permite visualizar en tiempo real los valores de V e I registrados por LabLED. También, se genera una gráfica voltaje-corriente que cuenta con botones de pausa y reinicio para mayor facilidad de análisis de los datos. Cabe mencionar que, previamente debe utilizarse el cable selector (C2) para seleccionar el LED con el que se desea trabajar. En la Figura 3 se observa el uso del cable selector para activar el LED rojo.

FIGURA 3. Dispositivo LabLED, indicando la selección del LED rojo.

Mediante el potenciómetro, es posible incrementar gradualmente el voltaje de alimentación mientras se observan los valores en el servidor web. La gráfica de la curva generada se reporta en la figura 4, y representa a la interfaz programada, que aparece en la pantalla del teléfono inteligente o tableta.

Posteriormente, si el usuario lo requiere, los datos pueden registrarse simultáneamente en una hoja de cálculo de Excel. Este procedimiento puede repetirse de manera secuencial para cada color de LED, reiniciando la medición con el potenciómetro en cero y empleando la función de reinicio de la interfaz antes de iniciar un nuevo registro de datos. Con el cable C2 selector se selecciona el nuevo LED para hacer las mediciones. Es importante señalar que, en esta configuración, las terminales de corriente deben estar unidas mediante el cable C1 (dado que no se conectará un dispositivo de medición externo) para cerrar el circuito y obtener lecturas adecuadas.

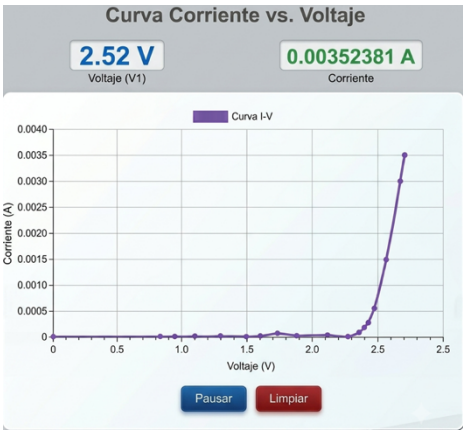

FIGURA 4. Gráfica voltaje-corriente que se visualiza en el teléfono inteligente, tableta o computadora.

En el segundo método de medición, el analógico, se emplean dos multímetros digitales conectados directamente a LabLED. Uno de ellos se coloca en las terminales de corriente (+A1 y -A2) y el otro a las terminales de voltaje (+V1 y -V2), lo que permite la lectura directa de ambas magnitudes (figura 5). Para evitar errores de conexión, se colocaron terminales con un código de color habitual en el área de la Electrónica (Rojo para terminal positiva y negro para la negativa). El procedimiento experimental es análogo al descrito previamente: se aumenta el voltaje con el potenciómetro y se registran los valores de voltaje y corriente hasta alcanzar el encendido del LED, obteniendo alrededor de doce mediciones por color de LED. Las variaciones registradas se grafican en la hoja de cálculo de Excel para visualizar la relación entre la corriente y el voltaje, permitiendo comparar los resultados obtenidos mediante los dos métodos.

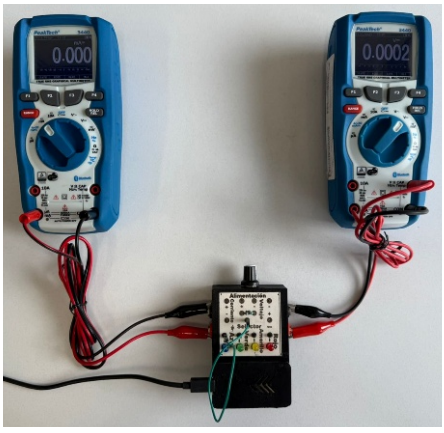

FIGURA 5. Configuración de LabLED empleando el método de medición con multímetros.

En la figura 6 se presenta la gráfica I vs V correspondiente al LED azul utilizando el sistema LabLED; en la región de conducción, donde la corriente aumenta rápidamente con el voltaje, el comportamiento del LED puede aproximarse mediante un ajuste lineal (línea punteada en la figura 6). Al extrapolar esta recta hasta su intersección con el eje de voltaje, se obtiene el voltaje umbral o potencial de encendido experimental del LED. Para el caso del LED azul, este valor fue de 2.58 V y. Considerando una longitud de onda $\lambda = 470$ nm para el color azul y empleando la ecuación (4), se obtuvo un valor de la constante de Planck de $6.47\times10^{-34}\ J\,s$, con un error del 2% respecto al valor aceptado de $6.626\times10^{-34}\ J\,s$. Este bajo porcentaje de error sugiere que el método experimental es adecuado para estimar dicha constante a partir de dispositivos optoelectrónicos. Para los LEDs rojo, amarillo y verde se determinaron potenciales de encendido de 1.90 V, 2.55 V y 2.58 V, respectivamente. A partir de estos valores, se calculó el valor de la constante de Planck de 6.07×10^{-34}, 5.98×10^{-34} y $7.21\times10^{-34}\ J\,s$, con errores relativos de 8%, 10% y 9% en comparación con el valor aceptado. Las discrepancias mayores en estos casos pueden atribuirse a factores como incertidumbres en la medición del voltaje umbral, variaciones en la longitud de onda nominal de los LEDs o variaciones en el comportamiento eléctrico de los componentes utilizados en la fabricación del dispositivo LabLED.

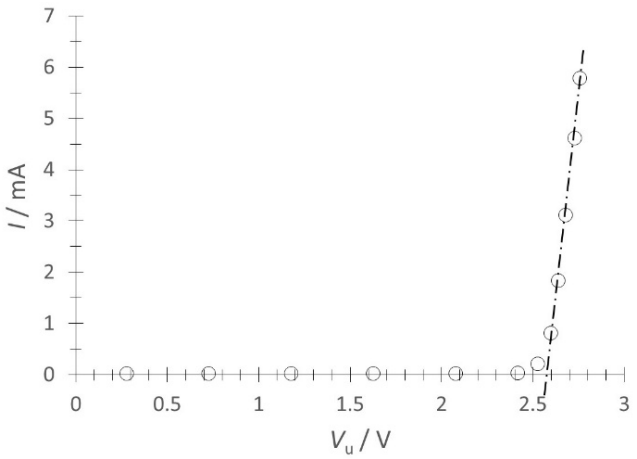

FIGURA 6. Curva I vs V obtenida con el equipo LabLED para determinar el potencial de encendido del LED azul.

IV. CONCLUSIONES

La implementación de LabLED se llevó a cabo dentro de la asignatura de Química Cuántica a lo largo de tres semestres consecutivos. Durante este periodo, los estudiantes reportaron que el uso del equipo resulta intuitivo y accesible, lo que les permitió realizar mediciones completas para los cuatro LEDs, en intervalos de 15 a 20 minutos. Esta eficiencia no solo optimiza el tiempo de laboratorio, sino que también favorece la repetición de experimentos y la comparación de resultados, aspectos clave para la comprensión del método científico. Estos resultados respaldan la eficacia del microcontrolador ESP32 como una herramienta didáctica de alta resolución en física experimental. Además, el dispositivo desarrollado representa

menos del 1% del costo de los dispositivos comerciales tradicionales, lo que posibilita su escalabilidad, por ejemplo, un dispositivo por cada grupo de 3 a 4 estudiantes, y fomenta una participación más activa en el laboratorio. A pesar de su bajo costo (inferior a 20 USD), se alcanzan márgenes de error menores al 10%, lo cual puede llegar a ser suficiente para fines educativos. Desde una perspectiva pedagógica, LabLED no solo facilita la adquisición de datos experimentales, sino que también fortalece competencias transversales. Los estudiantes se involucran en procesos de programación, instrumentación y análisis de datos, desarrollando habilidades que difícilmente se promueven con equipos comerciales cerrados. Este enfoque favorece un aprendizaje más profundo, al permitir que los alumnos comprendan tanto los principios físicos como el funcionamiento interno de la herramienta de medición. En términos educativos, la incorporación de tecnologías basadas en IoT en el laboratorio de física moderna introduce un cambio significativo: transforma al estudiante de un usuario pasivo a un participante activo en la construcción del conocimiento. Al reemplazar equipos de "caja negra" por soluciones de hardware abierto, transparentes y replicables, se promueve la comprensión crítica, la creatividad y la autonomía experimental. En conclusión, la integración de LabLED no solo moderniza la enseñanza de la física y la química cuántica, sino que también democratiza el acceso a la experimentación científica. Al reducir costos sin sacrificar precisión y al fomentar habilidades técnicas y analíticas, este tipo de desarrollos contribuye a una educación más inclusiva, práctica y alineada con las demandas tecnológicas actuales.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo y los valiosos comentarios del Dr. Oscar Rodolfo Suárez Castillo en la realización de este proyecto.

REFERENCIAS

[1]. Levine, I., *Química Cuántica*, 223–231 (Prentice Hall, 5th edition, 2001).
[2] Griffiths, D. *Introduction to Quantum Mechanics*, *Solutions Manual. Quantum*, 303 (2005).
[3] Tipler, P. A., Llewellyn, R. A., *Modern physics*, (W. H. Freeman, 5th edition, 2008).
[4] Leybold, *Photoelectric effect - Fundamentals - Atomic and nuclear physics - Physics Equipment - Physics*, (2026), <https://www.leybold-shop.com/physics/physics-equipment/atomic-and-nuclear-physics/fundamentals/photoelectric-effect.html>, Accessed May 2, 2026
[5] Venkatreddy, H., Nambhihalli, S., *Five decades of determining Planck's constant using light emitting diodes in Undergraduate Laboratories - A Review. Mapana –* , J. Sci. **21**, 75–91 (2022).
[6] Física E. De. *Custo para o ensino da quantização da energia : determinando a constante de planck com arduino e led a low-cost experimental approach to teaching energy quantization : determining the planck constant with*, Ver. do Profr. Física **8**, 118–128 (2024).
[7] Schools, N. I., Macedonia N., Schools, N. I., Macedonia, N., *Measuring Planck's Constant Using Light Emitting Diodes*, J. Phys. Astron. **8**, 1–14 (2020).
[8] Mosiori, C. O., Oeba, D. A., *Shikambe, R. Determination of Planck's Constant using Light Emitting Diodes*, Path. Sci. **3**, 2007–2012 (2017).
[9] Geronymo, G. M., *Smart Lab: An application of Industry 4.0 design principles to calibration laboratories*, J. Phys. Conf. Ser. **1826**, 0–6 (2021).
[10] Hercog, D., Lerher, T., Truntič, M., Težak, O., *Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices*, Sensors **23**, (2023).
[11] Shockley, W., *The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors*, Bell Syst. Tech. J. **28**, 435–489 (1949).

ANEXO

Código cargado en ESP32 para el registro de datos.

```
#include <WiFi.h>
#include <ESPAsyncWebServer.h>
#include <AsyncTCP.h>

const char* ssid = "ESP32MonitorAP";
const char* password = "password123";
const int pinVoltaje_V1 = 34;
const int pinVoltaje_V2 = 35;

AsyncWebServer server(80);

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  Serial.println("Configurando el punto de acceso...");
  WiFi.softAP(ssid, password, 1, false, 8);
  IPAddress myIP = WiFi.softAPIP();
  Serial.print("AP IP address: ");
  Serial.println(myIP);
  Serial.println("Servidor web iniciado.");

  server.on("/", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest
*request){
    request->send_P(200, "text/html", R"html(
      <!DOCTYPE html>
      <html>
      <head>
        <title>ESP32 Curva I-V</title>
        <meta name="viewport" content="width=device-
width, initial-scale=1">
        <script
src="https://cdn.jsdelivr.net/npm/chart.js"></script>
        <style>
          body { font-family: Arial, sans-serif; background-
color: #f4f4f4; text-align: center; }
```

```
        .container { max-width: 800px; margin: 15px auto;
padding: 20px; background-color: #fff; border-radius: 10px;
box-shadow: 0 0 10px rgba(0,0,0,0.1); }
        h2 { color: #333; }
        .readings { display: flex; justify-content: space-
around; margin-bottom: 20px; }
        .reading-box { font-size: 1.5em; font-weight: bold; }
        .reading-box span { display: block; font-size: 0.6em;
font-weight: normal; color: #666; }
        #voltage { color: #007BFF; }
        #current { color: #28a745; }
        .buttons { margin-top: 15px; }
        button { border: none; padding: 10px 20px; border-
radius: 5px; cursor: pointer; font-size: 1em; margin: 0 5px; }
        #clearButton { background-color: #dc3545; color:
white; }
        #clearButton:hover { background-color: #c82333; }
        #holdButton { background-color: #007bff; color:
white; }
        #holdButton.hold-active { background-color: #ffc107;
color: black; }
      </style>
    </head>
    <body>
      <div class="container">
        <h2>Curva Corriente vs. Voltaje</h2>
        <div class="readings">
          <div id="voltage" class="reading-box">--
V<span>Voltaje (V1)</span></div>
          <div id="current" class="reading-box">--
A<span>Corriente</span></div>
        </div>
        <canvas id="ivChart"></canvas>
        <div class="buttons">
          <button id="holdButton">Pausar</button>
          <button id="clearButton">Limpiar </button>
        </div>
      </div>
      <script>
        const MAX_DATA_COUNT = 200;
        const ctx =
document.getElementById('ivChart').getContext('2d');


        let isHoldActive = false;

        const ivChart = new Chart(ctx, {
          type: 'line',
          data: {
            datasets: [{
              label: 'Curva I-V',
              data: [],
              borderColor: '#6f42c1',
              backgroundColor: '#6f42c1',
              showLine: true,
              tension: 0.1
            }]
          },
          options: { scales: { x: { type: 'linear', position:
'bottom', title: { display: true, text: 'Voltaje (V)' }}, y: { title:
{ display: true, text: 'Corriente (A)' }}}}
        });

        const holdButton =
document.getElementById('holdButton');
        const clearButton =
document.getElementById('clearButton');

        holdButton.addEventListener('click', function() {
          isHoldActive = !isHoldActive; // Invierte el estado
(true/false)
          if (isHoldActive) {
            holdButton.textContent = 'Reanudar';
            holdButton.classList.add('hold-active');
          } else {
            holdButton.textContent = 'Pausar';
            holdButton.classList.remove('hold-active');
          }
        });

        clearButton.addEventListener('click', function() {
          ivChart.data.datasets[0].data = [];
          ivChart.update();
        });

          setInterval(function() {
          var xhttp = new XMLHttpRequest();
          xhttp.onreadystatechange = function() {
            if (this.readyState == 4 && this.status == 200) {

              // --- LA CLAVE DE LA FUNCIÓN "HOLD"
ESTÁ AQUÍ ---
              // Solo si el modo Pausa NO está activo,
actualizamos la pantalla.
              if (!isHoldActive) {
                const data = JSON.parse(this.responseText);


document.getElementById("voltage").innerHTML =
data.voltage.toFixed(1) + " V<span>Voltaje (V1)</span>";

document.getElementById("current").innerHTML =
data.current.toFixed(8) + " A<span>Corriente</span>";

                const dataArray = ivChart.data.datasets[0].data;
                dataArray.push({ x: data.voltage, y: data.current
});

                if(dataArray.length > MAX_DATA_COUNT) {
                  dataArray.shift();
                }

                ivChart.update();
              }
            }
          };
          xhttp.open("GET", "/data", true);
          xhttp.send();
```

```
        }, 2000);
      </script>
    </body>
    </html>
  )html");
 });

 server.on("/data", HTTP_GET,
[](AsyncWebServerRequest *request){
   int adc_V1 = analogRead(pinVoltaje_V1);
   float voltaje_V1 = (adc_V1 * 3.3) / 4095.0;
   int adc_V2 = analogRead(pinVoltaje_V2);
   float voltaje_V2 = (adc_V2 * 3.3) / 4095.0;
   float corriente = fabs((voltaje_V2 - voltaje_V1) / 220.0);
   String str_voltaje_V1 = String(voltaje_V1, 1);
   String str_corriente = String(corriente, 8);
   String json = "{\"voltage\":" + str_voltaje_V1 + ",
\"current\":" + str_corriente + "}";
   request->send(200, "application/json", json);
 });

 server.begin();
}

void loop() {}
```