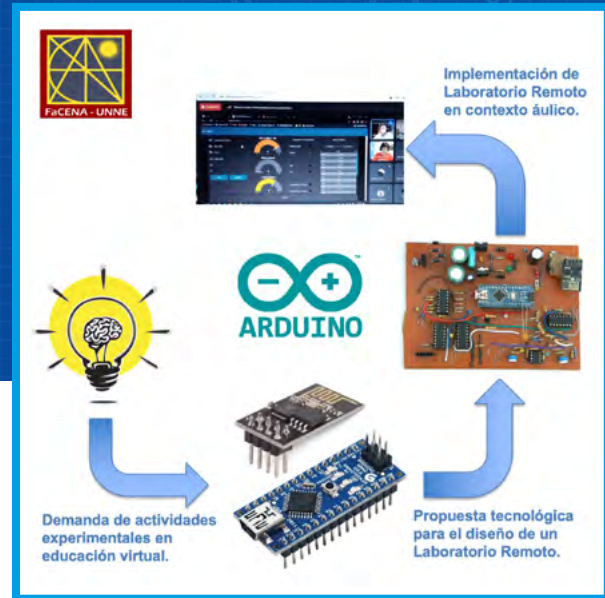


Diseño e implementación de un relevador de curvas I-V con acceso remoto

Raúl A. Gómez Cedrón, Eduardo L. Márquez Burgos, Víctor J. Toranzos, Jeremías A. García Cabrera, Eduardo J. Ricciardi.

Dpto. de Ingeniería FaCENA - UNNE Corrientes Capital
jagarcia Cabrera@yahoo.com.ar



RESUMEN

Desde el inicio de la Pandemia en marzo del 2020, la virtualidad en el ámbito académico tuvo un crecimiento exponencial. Éste contexto se impuso con un impacto particular para aquellas actividades de carácter experimental, cuestión que colocó en primera escena la necesidad de tener disponibilidad de laboratorios de acceso y comando remoto. Atendiendo a esta coyuntura, se plantea el objetivo de contar con un dispositivo que permita realizar ensayos y mediciones de forma remota, sobre componentes electrónicos, aplicando el principio de IoT (Internet of Things), con las mínimas limitaciones posibles.

El presente trabajo expone el diseño y la implementación de un Laboratorio Remoto con la finalidad de llevar a cabo mediciones de tensión y corrientes sobre componentes semiconductores como diodos y/o transistores, posibilitando la configuración de valores deseados y devolviendo una gráfica de Corriente-Tensión a fin de caracterizar el componente bajo prueba.

ABSTRACT

Since the beginning of the Pandemic in March 2020, virtuality in the academic field had an exponential growth. This context was imposed with a particular impact for those activities of an experimental nature, an issue that placed in the forefront the need to have access and remote command laboratories available. Taking into account this situation, the objective of having a device that allows remote tests and measurements on electronic components is set, applying the principle of IoT (Internet of Things), with the minimum possible limitations.

This work presents the design and implementation of a Remote Laboratory in order to carry out voltage and current measurements on semiconductor components such as diodes and / or transistors, enabling the configuration of desired values and returning a Current-Voltage graph to in order to characterize the component under test.

Palabras clave: virtualidad, laboratorio, remoto, electrónica.

INTRODUCCIÓN

Los Laboratorios Remotos, si bien no son una aplicación tecnológica nueva, su necesidad de uso como se describe en [1], adquirió una importancia sin precedentes con la consolidación de la Pandemia en el año 2020. En este contexto el desarrollo de Laboratorio Remotos y el fortalecimiento de líneas institucionales que fomentarán su creación, tomaron el centro de la escena, motivando a docentes y alumnos de las carreras experimentales a afrontar proyectos de estas características.

Puntualmente, este trabajo se desarrolla para su aplicación en carreras de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y asignaturas de Física específicas. En particular, el seno del proyecto fue la asignatura Física del Estado Sólido, la cual se dicta para las carreras de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería en Electrónica.

El dispositivo desarrollado, tiene como objetivo la caracterización de componentes electrónicos mediante el relevamiento remoto y configurable de Curvas I-V (Corriente vs. Tensión).

Curvas I-V

Todo componente electrónico puede ser caracterizado analizando la respuesta en su salida ante una determinada señal de entrada. Este tipo de curvas, como se expone en [2], sirven para determinar importantes características de componentes como diodos, transistores FET, BJT y demás semiconductores.

Comercialmente un trazador de curvas I-V es un dispositivo al que se le conecta un componente, con la lógica de “caja negra”, sobre el cual se aplica una señal de entrada (tensión o corriente dependiendo del ensayo) y se realiza el sensado de la respuesta a la salida. Típicamente el dispositivo, cuenta con una pantalla o bien se conecta a un osciloscopio para la visualización de la respuesta.

Señal PWM

Este tipo de modulación, es la comúnmente utilizada por sistemas microcontrolados, como alternativa o complemento de los DAC (Conversión Digital-Analógica en castellano), para la generación de señales analógicas. Este tipo de señal denominada “Modulación por Ancho de Pulso” (PWM del inglés Pulse Width Modulation), permite, como su nombre lo indica, modular cualquier señal de características analógicas, mediante señales digitales a alta frecuencia, técnica que se analiza detalladamente en [3] for practical inverters, the output voltage is a series of rectangular waveforms. The major issue for the control of the power inverters is obtaining suitable modulation methods to control the output rectangular waveforms in order to synthesize the desired waveforms. Therefore, a modulation control method is required to get a desired fundamental frequency

voltage and to eliminate higher-order harmonics as much as possible. Higher frequencies are employed in traditional pulse width modulation (PWM. Este tipo de modulación consiste en una señal cuadrada de período T fijo y ciclo de trabajo “Duty Cycle” (DC) variable, de manera tal que el valor medio que da como resultado la combinación del DC y T, para un pulso en particular, corresponde al valor analógico modulado en ese periodo de tiempo T.

El dispositivo diseñado se vale de este tipo de modulación para la generación de las tensiones y corrientes de barrido, aplicados al componente bajo ensayo.

Filtro Pasa Bajos Pasivo (FPB)

Es un sistema compuesto, en su versión más simplificada, por una resistencia y un capacitor, calculados de manera tal que la frecuencia de corte esté por debajo del rango de frecuencias que se pretende eliminar.

El esquema circuital más básico responde al de la Figura 1:

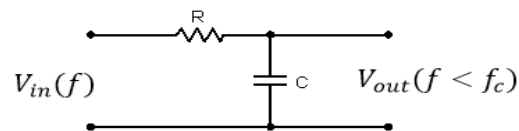


Figura 1. Filtro Pasa Bajos de primer orden pasivo.

Para el diseño de este tipo de filtro, basado en lo desarrollado en [4], se utiliza una expresión como se presenta en (1).

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (1)$$

Acceso Remoto

Si bien, los aspectos técnicos del Sistema Embebido (SE) que llevará adelante la tarea de interactuar localmente con el componente a ensayar, resultan fundamentales para el correcto funcionamiento del dispositivo, la clave de su funcionamiento y aplicación radica en que, tanto los parámetros del ensayo como los datos obtenidos del mismo sean accesibles de manera remota. Para ello, como primera medida, es necesario que el SE cuente con el hardware adecuado para vincularse a internet (conexión Ethernet o Wi-Fi) según la norma detallada en [5] y mediante esta comunicación, interactuar con el usuario remoto a fin de permitir la configuración de parámetros de ensayo y posteriormente presentar los resultados. La interacción con el usuario debe realizarse mediante una interface Web, que le otorgue un entorno gráfico y amigable

para la carga de parámetros, inicio del ensayo y lectura de resultados, el cual debe ser fácilmente accesible desde una PC o dispositivos móviles.

En la Figura 2, se presenta un esquema general del sistema:

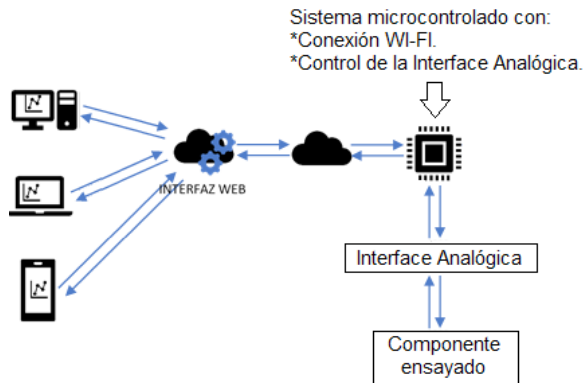


Figura 2. Diagrama general del dispositivo.

DESARROLLO

Como punto inicial del desarrollo, se llevó adelante la selección del microcontrolador con el cual se implementaría el SE que debía controlar la señal de entrada aplicada al componente y simultáneamente registrar la respuesta del mismo ante este estímulo.

SE de Control y Comunicación

Analizando las características técnicas y las herramientas disponibles para su programación, se seleccionó el microcontrolador ATMEGA328P, montado en la placa de prototipado Arduino Nano.

Este microcontrolador cuenta con múltiples salidas con PWM implementado por hardware, así como un convertor AD de 10bits de resolución, con un módulo de múltiples entradas multiplexadas con varios pines disponibles en el encapsulado.

En la Figura 3, puede verse una imagen de la placa Arduino Nano, con el ATMEGA328P montado, así como la distribución de pines y sus funciones:

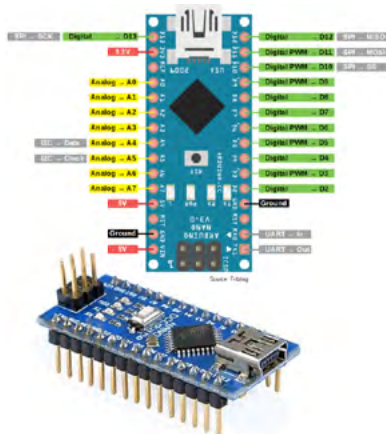


Figura 3. Pines e imagen del Arduino Nano.

La implementación del ATMEGA328P, permite un control lo suficientemente preciso de dos señales analógicas, mediante dos salidas PWM, vinculadas cada una a un FPB. La señal de salida del filtro posibilita obtener una señal adecuada para interactuar con la electrónica analógica, necesaria para la implementación de una fuente de corrientes (FI) y una fuente de tensión (FV), ambas controladas por el microcontrolador.

Si bien el ATMEGA328P posee muchas ventajas, los protocolos de comunicación disponibles son puramente seriales y cableados (SPI, I2C, USART) como se detalla en [6]. Esto plantea la necesidad de contar con otro SE, que pueda complementar con el Arduino Nano, a fin de proveer la comunicación adecuada para vincular el dispositivo a internet y a su vez, comunicar datos con el Arduino por medio de protocolo serie.

Para esta función, se seleccionó el módulo ESP-01 cuyas especificaciones se detallan en [7], el cual se basa en el microcontrolador ESP8266, incorporando una memoria Flash, componentes indicadores, pines de conexión y antena WiFi.

En la Figura 4 puede verse una imagen del módulo ESP-01 con sus partes constitutivas:

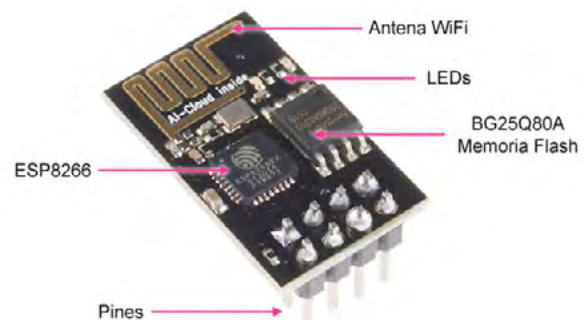


Figura 4. Imagen del módulo ESP-01.

Este módulo posee varias formas de programación, entre ellas en lenguaje C++. Estas características permitieron desarrollar una API-REST a bajo nivel sobre el ESP8266, a fin de interactuar con el usuario remoto mediante una aplicación Web. A su vez, el módulo ESP-01 recibe los datos por comunicación serial, enviados desde el ATMEGA328P, de las lecturas tanto de tensión como de corriente y las almacena convenientemente a fin de ser enviadas hacia la aplicación Web mediante ficheros Json, cuyas características se detallan en [8], para ser visualizadas por el usuario.

Por su parte, la comunicación serie entre los módulos Arduino Nano y ESP-01 no fue directa, dado que el primero trabaja con lógica de 5v y el segundo con lógica de 3,3v. Para subsanar esta cues-

ción fue necesario implementar un bloque de adaptación de señales lógicas entre ambos, operando de manera bidireccional. En la Figura 5 se presenta el esquema de vinculación de los módulos, con el bloque de adecuación de tensión:



Figura 5. Diagrama del circuito de adaptación lógico.

La interacción entre los módulos, como le mencionó anteriormente, debe ser en ambas direcciones dado que es el usuario el que configura los parámetros del ensayo, lo que genera un flujo de datos desde el ESP-01 hacia el Arduino Nano y luego, es el segundo el que implementa la medición de manera directa sobre el componente, relevando y enviando, desde el Arduino Nano hacia el ESP-01, los datos para ser presentados al usuario. En la Figura 6 se presenta un diagrama en bloques integrado de los programas de ambos módulos que componen el SE e interactúan entre la aplicación web y la electrónica analógica que está directamente conectada al componente ensayado.

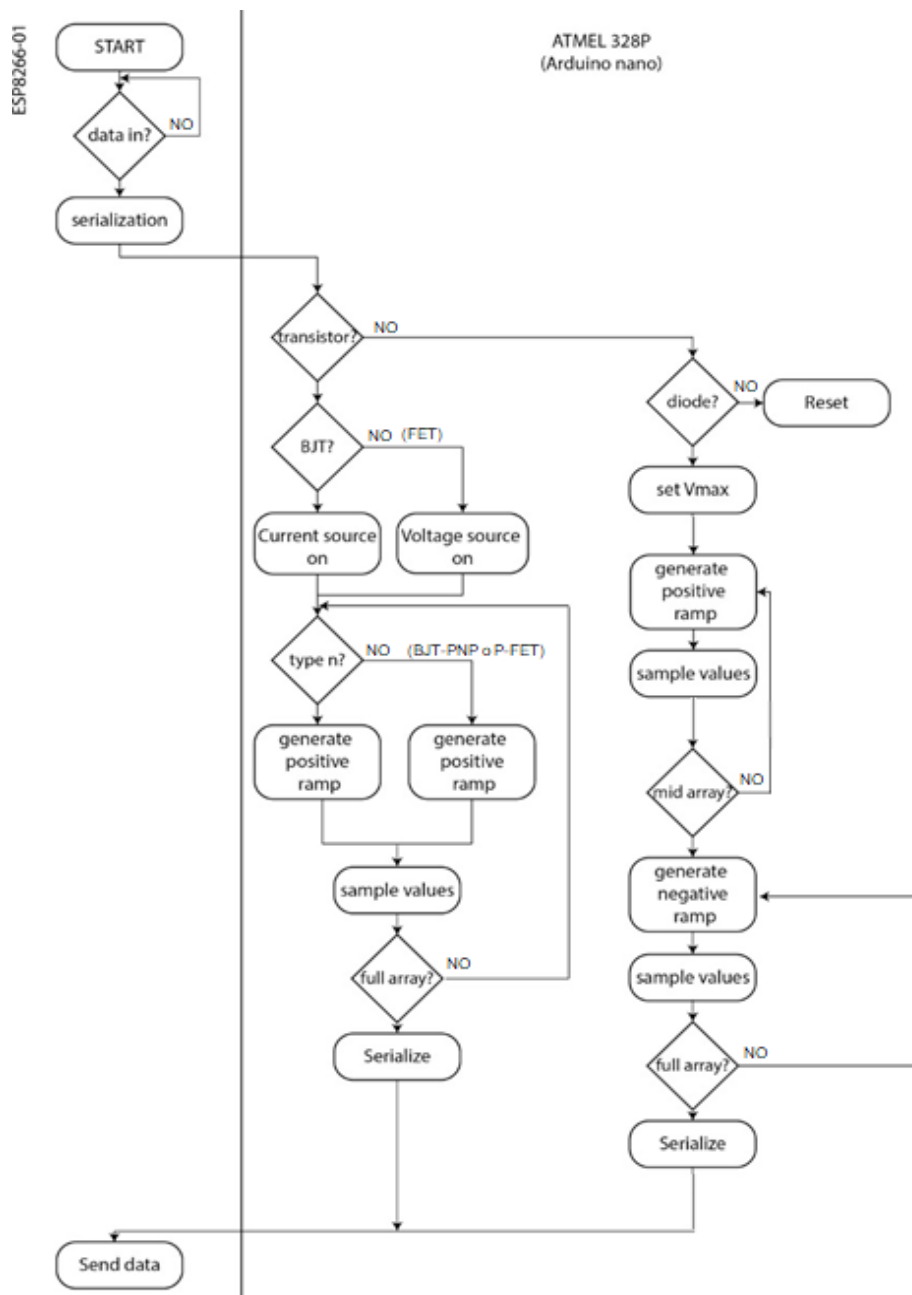


Figura 6. Diagrama de flujo general del conjunto ESP-01 - Arduino_Nano.

Interface Analógica

Para la interacción entre el SE y el componente bajo ensayo, fue necesario el diseño e implementación de una módulo de electrónica analógica. Para ello se hizo uso de Amplificadores Operacionales y del integrado UTC4053, que incorpora un triple multiplexor/demultiplexor analógico de 2x1. Se implementaron circuitos basados en AO tanto para adaptación de las señales PWM, vinculándolos a la salida de los FPB, como para la adaptación de los circuitos de sensado de tensión y corriente. Por su parte el UTC4053 se implementó para la conmutación entre las señales negativas y positivas para el relevamiento de ambos planos de la respuesta del componente bajo ensayo. Finalmente se incorporó a la electrónica analógica, por un lado el bloque adaptación digital de 3,3v a 5v, el cual se implemen-

tó con transistores MOSFET incrementales del tipo 2N7000 y por otro, al par de FPB, conectados a las salidas PWM del microcontrolador. En función de la frecuencia de corte deseada, habiendo tomado como límite superior una $f_c=50\text{Hz}$, el cálculo de los componentes según la Ecuación 1, se realizó de la

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot 47k\Omega \cdot 100nF} = 33,86\text{Hz} \quad (2)$$

En (2) se fija una frecuencia de corte por debajo de la máxima calculada, producto del redondeo para componentes de valores comerciales, en particular se seleccionó una $R = 47k\Omega$ y un capacitor $C = 100nF \times 50v$.

En la Figura 7 se presenta dividido en bloques los circuitos esquemáticos descriptos:

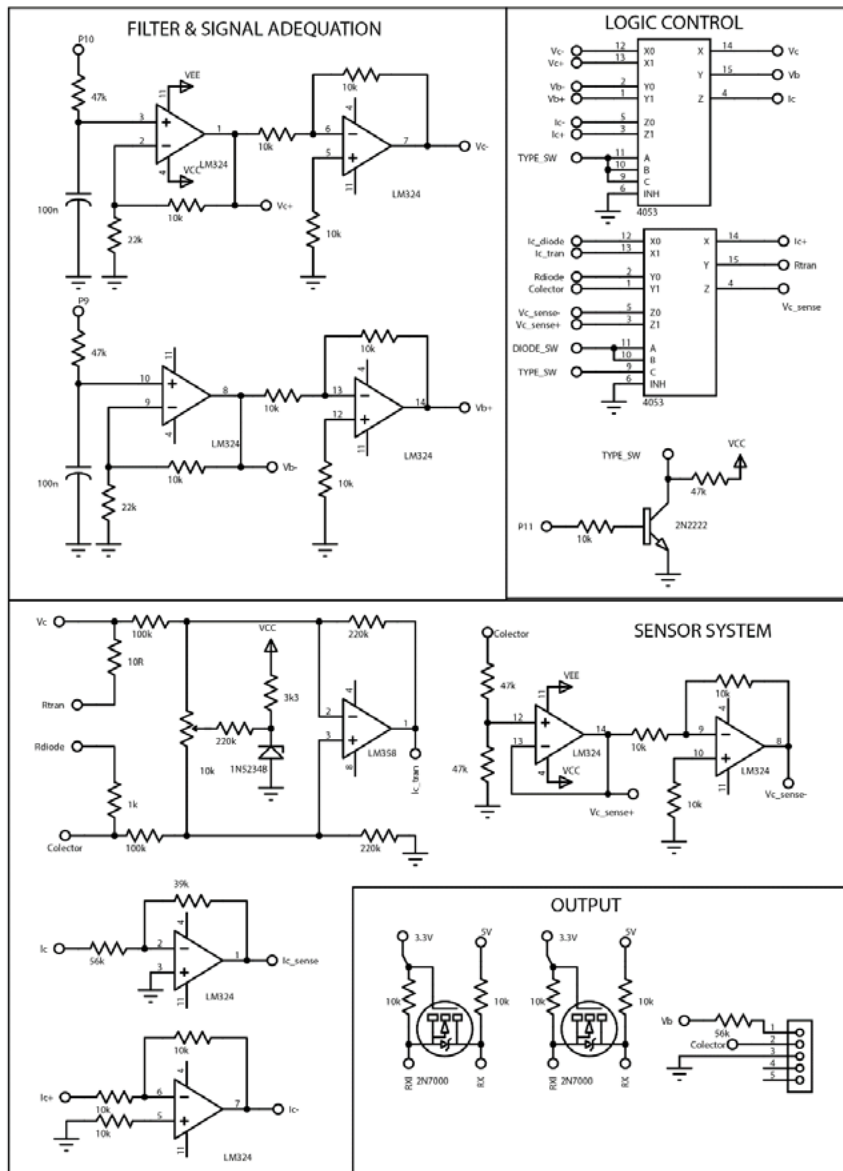


Figura 7. Circuitos esquemáticos de los bloques de electrónica analógica.

Montaje electrónico

El montaje de los componentes tanto del SE como de la electrónica analógica, así como los conectores necesarios para la alimentación y el componente a ensayar, se realizó en una placa de Pertinax de 14 cm por 10 cm, de una sola capa.

El diseño de PCB fue asistido por computadora, y resguardado en un gabinete estanco. En la Figura 8 y Figura 9 se presentan una imagen 3D de la placa y una captura de la placa física con la cual se llevaron adelante los ensayos:

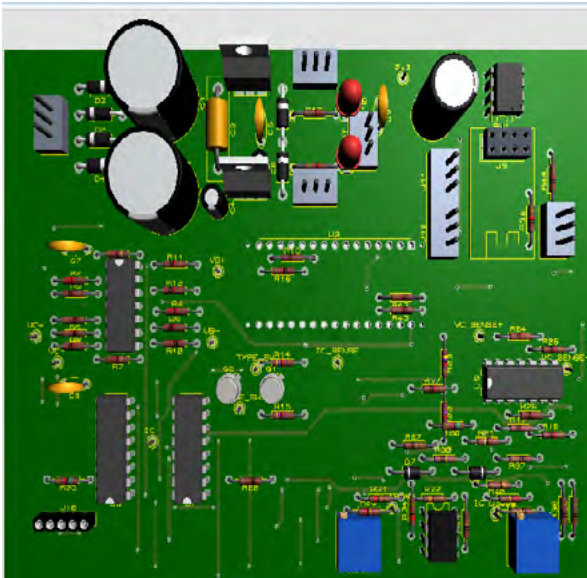


Figura 8. Vista 3D de la placa desarrollada.

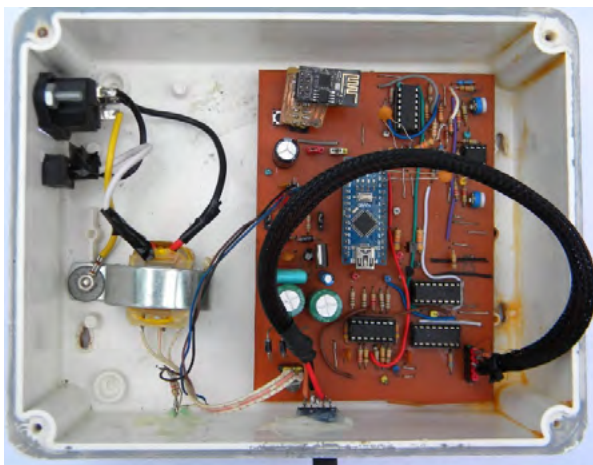


Figura 9. Captura de la placa física, instalada en el gabinete.

Interfaz WEB

Para la interfaz WEB con el usuario, se realizó una programación en bloques basándose en el lenguaje JAVASCRIPT, el cual permite crear una interfaz gráfica intuitiva, que posibilita ingresar los datos necesarios para el ensayo y obtener los resultados en forma de tabla lo cual facilita la confección de la gráfica I-V.

Los datos que recibe el módulo ESP-01 vía protocolo serie desde el Arduino Nano, son almacenados en una variable del tipo Arreglo (Array) a fin de ser fácilmente convertidos a formato JSON, previo al envío a la aplicación Web. Esta última realiza un filtrado de datos excedentes, se adecua el vector de forma tal que puedan tabularse los datos y representarse en una gráfica dinámica que permita, no solo visualizar la respuesta, sino que presente el valor de cada punto de medición, cuando el usuario ubique el puntero del mouse sobre cualquier punto de la gráfica.

En la Figura 10 se presenta una captura de la pantalla de la interfaz Web, donde puede apreciarse la forma de interacción con el usuario.



Figura 10. Captura de la pantalla de la Interfaz WEB.

Resultados de los ensayos

Los ensayos llevados adelante en el dispositivo fueron sobre tres componentes principales:

- Diodo zener 55C2VT (2,7V).
- Transistor BJT-NPN TIP41C.
- Transistor BJT-PNP BC327.

En la Figura 11 se presenta el resultado del ensayo del diodo zener 55C2VT, mediante la curva I-V generada por la Interfaz:

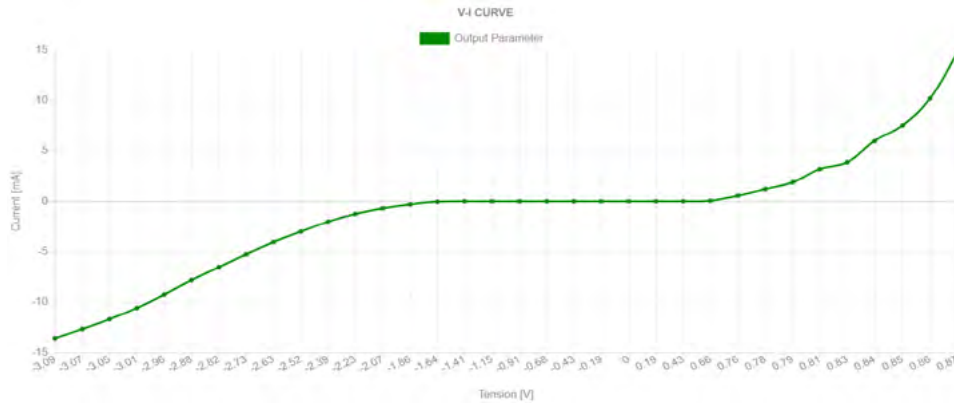


Figura 11. Curva I-V diodo 55C2VT (ZENER 2,7V).

En primera medida puede observarse como la respuesta se corresponde con la de un diodo zener desde un punto de vista cualitativo. Desde un análisis cuantitativo de los valores arrojados por la gráfica, la tensión de ruptura en inversa se establece a partir de los 1,86V, quedando establecida la respuesta del zener en valores acordes a su tensión

nominal de 2,7V. En directa, la tensión de conducción se presenta a partir de los 0,66V como establece el rango de la Hoja de Datos de componente.

En la Figura 12 se presenta el resultado del ensayo del transistor BJT-NPN TIP41C.

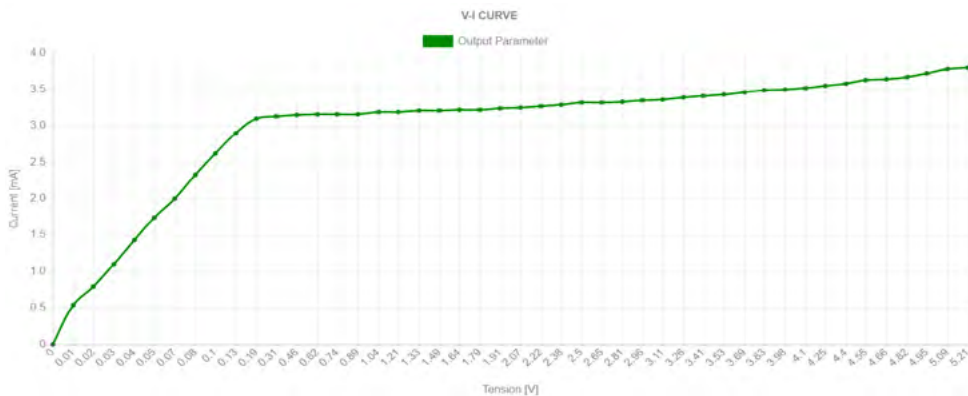


Figura 12. Curva I-V transistor TIP41C.

El ensayo presentado en la Fig.12 se realizó con un barrido de la tensión V_{CE} de 0V a 6V con una I_B constante de 100uA y sensado de I_C . Puede observarse como en el punto $V_{CE}=0,19V$ e $I_C=3,1mA$ el

transistor comienza su funcionamiento como fuente de corriente.

Finalmente, en la Figura 13, se presenta la curva I-V del ensayo del transistor BC327:

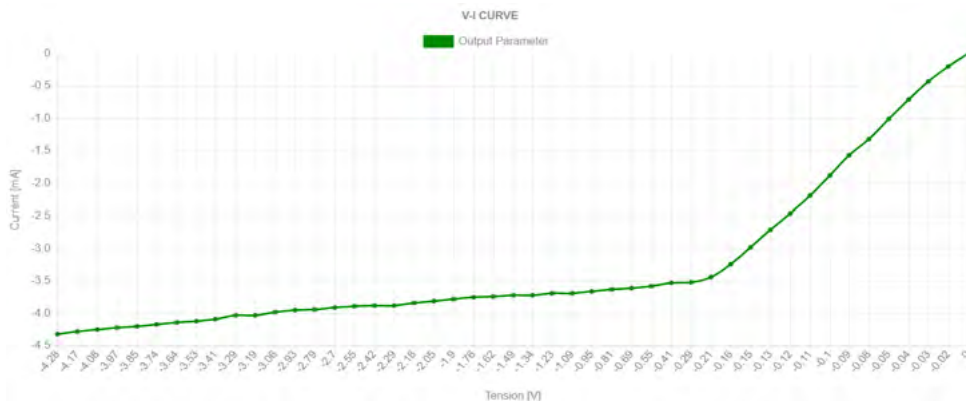


Figura 13. Curva I-V transistor BC327.

El ensayo presentado en la Fig.13 se realizó con un barrido de la tensión V_{CE} de 0V a 6V con una I_B constante de 35 μ A y sensado de I_C . Puede observarse como la gráfica presenta una forma invertida al 3er cuadrante, respecto a la del TIP41C. Esto es debido a que los barridos se realizaron con polaridades tanto de corriente como de tensión invertidas respecto al NPN, con los circuitos de sensado en la misma polaridad. En el punto $V_{CE}=0,16V$ e $I_C=3,5mA$ (considerándolos por sus valores absolutos) el transistor comienza su funcionamiento como fuente de corriente.

Implementación

Luego de las pruebas y ensayos de calibración, el dispositivo fue utilizado como recurso didáctico para la implementación de laboratorios remotos en la asignatura Física del Estado Sólido, durante el segundo cuatrimestre el año 2021.

Se implementaron así, los laboratorios de relevamiento de curvas I-V de diodo zener y transistores BJT, en la Figuras 14a y 14b se presentan capturas de uno de los laboratorios mencionados:

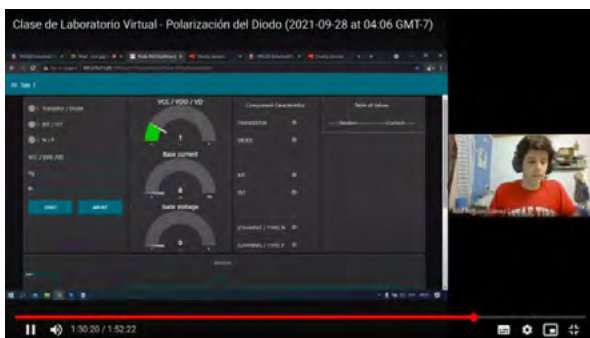


Figura 14a. Presentación de la interfaz (la foto corresponde a uno de los autores).



Figura 14b. Presentación de la tabla de datos y curva I-V.

CONCLUSIONES

Se logró el diseño, montaje e implementación de un dispositivo para el relevamiento de curvas I-V remoto. Su aplicación exitosa en el ambiente áulico, sienta las bases para su expansión y ramificación hacia otras experiencias de laboratorio para cualquier asignatura del área electrónica. Se tiene como objetivo a seguir, la instalación fija del equipo a fin de lograr un funcionamiento permanente de manera remota, sin necesidad de un operador local, a fin de poder integrarlo a la red de laboratorios remotos abiertos, disponibles en el país.

REFERENCIAS

- [1] Caputo, D.C. (2021). Laboratorios de acceso remoto innovando en educación superior, *Rev. ARGENTINA Ing.*, vol. 17, pp. 15–17, 2021, [Online]. Available: <https://confedi.org.ar/wp-content/uploads/2021/05/5-proyectos-R17.pdf>.
- [2] Boylestad, R.; Nashelsky, L. (2014). *Electronic devices and circuit theory*, Pearson, Boston.
- [3] Peddapelli, S.K. (2017). *Pulse Width Modulation*, De Gruyter, Oldenbourg.
- [4] Boylestad, R.L. (2016). *Introductory Circuits Analysis*, Pearson; Upper Saddle River.
- [5] 3Com-Corporation, (2000). IEEE 802.11b Wireless LANs, p. 14,.
- [6] Microchip Technology Inc, "ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P DataSheet," *megaAVR Data Sheet*, p. 653, 2020, [Online]. Available: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061B.pdf>.
- [7] S. A. T. CO;LTD, "ESP-01 01 WiFi Module Version 1.0," pp. 1–19, 2015.
- [8] Rischpater, R.(2015). *JavaScript JSON Cookbook: Over 80 recipes to make the most of JSON in your desktop, server, web, and mobile applications*, Packt Publishing.