

Implementación de un sistema DAS de bajo coste con ESP32 para el monitoreo de corrientes durante la formación técnica

Olivera Ylla, Carlos Alberto¹; Cuba Vargas, Karen Esteincin²; Palomino Monteza, Vanessa Yaniz³

^{1,2}Servicio Nacional de Adiestramiento en Trabajo Industrial (SENATI), Perú, coliveray@senati.pe, ecuba@senati.pe

³Centro de Altos Estudios Nacionales (CAEN), Perú, yanizpalominom@gmail.com

Resumen– Este trabajo presenta el diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos (DAS) de bajo coste basado en el microcontrolador ESP32, orientado a la enseñanza de fenómenos eléctricos transitorios en cursos de Electricidad Industrial. La solución permite visualizar en tiempo real la curva de corriente durante el encendido de diversas cargas, como lámparas de descarga y motores trifásicos. Se emplearon sensores ACS712 para adquirir datos, que fueron procesados por el ESP32 y presentados a través de una interfaz web local. Los resultados obtenidos en el laboratorio muestran una alta concordancia con los valores teóricos esperados, con errores inferiores al 6.1 % en cargas resistivas y menor al 12 % en cargas no lineales. El sistema demostró ser funcional, preciso y viable para su uso educativo, ofreciendo una alternativa accesible a instrumentos de medición costosos. Se discuten sus ventajas, limitaciones y posibles mejoras futuras.

Palabras clave– DAS; ESP32; Corriente eléctrica; Electricidad Industrial; Aprendizaje práctico.

I. INTRODUCCIÓN

El aprendizaje de fundamentos eléctricos en la formación técnica presenta retos persistentes, especialmente en cursos introductorios como Electricidad Básica. Muchos estudiantes, provenientes directamente de la educación secundaria, enfrentan dificultades para comprender fenómenos dinámicos como los picos de corriente o las caídas de voltaje. Estos eventos transitorios son esenciales para interpretar el comportamiento real de los sistemas eléctricos, pero su enseñanza suele basarse en esquemas estáticos —diagramas, diapositivas o trazos en pizarra— que no logran representar adecuadamente estos procesos [1]. Esta dificultad se agrava por la escasez de equipos apropiados para la visualización en tiempo real de señales eléctricas. Instrumentos como osciloscopios o analizadores de red son ideales, pero su alto costo y complejidad operativa los hace inaccesibles para muchos institutos, que optan por herramientas básicas como pinzas amperimétricas, las cuales ofrecen lecturas puntuales, pero no permiten registrar ni analizar fenómenos rápidos [2].

Frente a esta situación, diversas investigaciones han promovido el uso de plataformas tecnológicas accesibles como medio para fortalecer el aprendizaje práctico [3]. Entre estas soluciones, destacan los sistemas de adquisición de datos con microcontroladores, que permiten capturar, visualizar y analizar señales eléctricas de forma sencilla. En particular, el ESP32 se ha consolidado como una opción educativa de gran valor por su conectividad Wi-Fi integrada, compatibilidad con

múltiples sensores, bajo costo y facilidad de programación. Su implementación ha demostrado beneficios en la comprensión conceptual, la motivación y la autonomía del estudiante [4]. Asimismo, la integración de sistemas de adquisición de datos (DAS) de bajo coste en el aula potencia el aprendizaje activo y contextualizado, al permitir la visualización de variables como voltaje y corriente en tiempo real [5], [6].

Los microcontroladores, al integrar procesador, memoria y periféricos en un solo chip, permiten el desarrollo de sistemas embebidos económicos y versátiles. Desde los años 70, han evolucionado hacia plataformas más potentes y programables como Arduino, Raspberry Pi y especialmente el ESP32 [1], [7]. Estas herramientas han ganado popularidad en la enseñanza de ciencias aplicadas gracias a su bajo coste, documentación abundante y entornos de desarrollo accesibles, que facilitan su uso incluso por estudiantes sin experiencia previa [4].

El ESP32 destaca por su arquitectura de doble núcleo, múltiples convertidores analógico-digitales, conectividad inalámbrica, interfaces estándar como I²C, SPI y UART, y capacidades PWM. Además, incluye funciones de seguridad como cifrado de datos y arranque seguro [8]. Estas características lo hacen ideal para proyectos educativos que requieren adquisición y visualización de datos eléctricos. Su integración en actividades de laboratorio ha demostrado mejorar las competencias de los estudiantes en automatización y análisis de señales [3], [8]. Su compatibilidad con entornos como Arduino IDE o PlatformIO facilita aún más su incorporación en instituciones con recursos limitados.

No obstante, a pesar de estas ventajas, su adopción en especialidades como Electricidad Industrial sigue siendo limitada, en contraste con su uso más frecuente en áreas como electrónica o informática. Esta brecha representa una oportunidad para incorporar nuevas estrategias didácticas que permitan observar y analizar variables eléctricas reales durante el funcionamiento de motores, cargas inductivas u otros sistemas industriales. Incluir el ESP32 en prácticas eléctricas ayudaría a fortalecer la comprensión de fenómenos dinámicos, acercando a los estudiantes a situaciones reales que requieren interpretación de transitorios y toma de decisiones técnicas fundamentadas.

Un caso representativo es el de dos Santos et al., quienes implementaron un sistema de monitoreo IoT con ESP32 para paneles fotovoltaicos. Su sistema logró medir corriente y voltaje con un error menor al 1 % frente a equipos

profesionales, transmitiendo los datos a la nube para su análisis [9]. Este ejemplo demuestra que el ESP32 puede ofrecer precisión, fiabilidad y escalabilidad, incluso en entornos exigentes. Su bajo costo (entre 5 y 7 USD por unidad) lo convierte en una solución viable para implementar múltiples estaciones educativas de adquisición de datos[10].

En comparación con otras plataformas como Arduino UNO o los microcontroladores PIC, el ESP32 ofrece una arquitectura más robusta, conectividad nativa y mejor capacidad de procesamiento [7], [8]. A diferencia de los entornos cerrados y más técnicos de los PIC, el ESP32 cuenta con una comunidad activa y recursos abundantes que reducen significativamente la curva de aprendizaje. Por estas razones, ya ha sido integrado en numerosas experiencias de aprendizaje práctico en áreas técnicas, aunque su potencial en Electricidad Industrial aún está poco explorado.

Dada esta situación, resulta pertinente investigar cómo puede adaptarse esta tecnología a los entornos formativos de electricidad. La combinación del ESP32 con sistemas DAS simplificados representa una alternativa pedagógica innovadora, al permitir el monitoreo en tiempo real de variables eléctricas, su análisis gráfico y la elaboración de conclusiones fundamentadas por parte de los estudiantes. Esta propuesta no solo moderniza las prácticas de laboratorio, sino que también fomenta la autonomía, el pensamiento crítico y la conexión entre la teoría y su aplicación en contextos reales.

El proyecto está orientado a estudiantes de los ciclos II, III y IV de la carrera de Electricidad Industrial de un instituto superior tecnológico (duración de 3 años). En el segundo ciclo, los estudiantes trabajan con lámparas de alta intensidad (HID) en el curso de Instalaciones Eléctricas, donde la herramienta fue utilizada para visualizar los picos de corriente y los tiempos de estabilización térmica. El sistema puede ser empleado en el tercer ciclo, durante el curso de Automatismo Industrial, para analizar el arranque de motores trifásicos en diferentes configuraciones (directo y estrella-triángulo). Finalmente, en el cuarto ciclo, en el curso de Máquinas Eléctricas, se podría utilizar el DAS para comparar el comportamiento de motores y generadores, fortaleciendo la comprensión de fenómenos dinámicos y la toma de decisiones técnicas fundamentadas.

Para entender el valor formativo de los sistemas de adquisición de datos (DAS), es necesario considerar su evolución. Estos sistemas surgieron a mediados de la década de 1960, cuando IBM introdujo computadoras especializadas como el Modelo 1800 Data Acquisition and Control System. En julio de 1967, este sistema fue implementado por primera vez en la University of Alabama at Birmingham para la gestión de pacientes cardíacos, permitiendo la adquisición de señales de electrocardiogramas, presión intracardiaca y catéteres vasculares [11]. Desde entonces, los DAS han evolucionado desde grandes sistemas institucionales hasta plataformas de bajo costo basadas en microcontroladores como el ESP32, democratizando el acceso a la adquisición de datos en contextos educativos e industriales.

La incorporación de tecnologías IoT ha impulsado una nueva etapa de miniaturización y democratización de los sistemas de adquisición de datos (DAS). Hoy es posible construir sistemas DAS funcionales con plataformas de bajo costo como el ESP32, combinadas con sensores y conectividad inalámbrica. Según Zobel et al. [12], estas soluciones se están utilizando con éxito en el ámbito educativo para la adquisición de datos en mediciones experimentales, permitiendo a los estudiantes trabajar con hardware accesible, de código abierto y con un costo inferior a los 100 euros. Esta transformación permite que los estudiantes trabajen con sistemas que replican escenarios reales de monitoreo, incluso en contextos con limitaciones presupuestarias.

Es importante distinguir entre un sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) y un sistema DAS (Data Acquisition System). Mientras que un SCADA permite monitorear variables, generar alertas ante fallas y ejecutar acciones automáticas de control, un DAS se limita a la adquisición, registro y visualización de datos, sin capacidad de actuación sobre el proceso [13]. Los SCADA son esenciales en sectores como manufactura, distribución eléctrica o tratamiento de agua, donde se requiere control remoto. En cambio, los DAS son ideales para aplicaciones educativas y de monitoreo, donde el objetivo es la observación y el análisis de fenómenos, no su control. El presente trabajo se enfoca en un DAS, ya que su propósito es exclusivamente formativo: permitir a los estudiantes visualizar y analizar curvas de corriente sin la complejidad adicional de un sistema de control.

En el contexto de la Industria 4.0, los sistemas SCADA y DAS han evolucionado hacia plataformas conectadas a la nube y con capacidades de análisis predictivo. El ESP32 cumple un rol crucial al facilitar la construcción de sistemas de adquisición de datos (DAS) escalables y económicos, capaces de recolectar datos, analizarlos localmente y enviarlos a servicios remotos [13], [14]. En el ámbito educativo, estas plataformas han demostrado ser herramientas efectivas para la enseñanza de sistemas embebidos y adquisición de datos, permitiendo a los estudiantes trabajar con tecnología actual y desarrollar competencias alineadas con las demandas de la industria moderna [14].

Desde el enfoque pedagógico, los sistemas de adquisición de datos (DAS) se han consolidado como herramientas útiles para el aprendizaje activo y significativo. Permiten que los estudiantes interactúen directamente con datos reales, analicen condiciones de operación, comparen comportamientos de distintos sistemas y desarrollen habilidades en instrumentación y análisis de datos [13]. Tabuenca et al. señalan que este tipo de plataformas tecnológicas promueven además el trabajo colaborativo, la resolución de problemas y la adquisición de competencias digitales esenciales para la inserción laboral [15].

Una de las ventajas más importantes de los sistemas de adquisición de datos (DAS) educativos modernos es su capacidad para funcionar en laboratorios portátiles o remotos. Gracias a la versatilidad del ESP32, es posible configurar

prácticas de monitoreo sin necesidad de licencias costosas, conectándose a una red Wi-Fi y operando desde cualquier navegador web [10]. Esto permite ampliar las oportunidades de aprendizaje, incluso en contextos rurales o con infraestructura limitada, y favorece la inclusión tecnológica.

Este proyecto se enmarca en ese contexto. Su finalidad fue diseñar e implementar un sistema de adquisición de datos (DAS) de bajo coste orientado a la enseñanza de Electricidad Industrial, utilizando el microcontrolador ESP32 como unidad de adquisición de datos. Para ello, se integraron sensores ACS712 que permiten registrar corriente en tiempo real, y se desarrolló una interfaz web accesible desde dispositivos móviles. Esta solución permitió observar el comportamiento de la corriente durante el encendido de cargas como lámparas HID y motores trifásicos, bajo diferentes métodos de arranque: directo, estrella-triángulo y con arrancador suave. Con esta herramienta, se busca no solo reforzar el aprendizaje de conceptos eléctricos fundamentales, sino también fomentar el pensamiento crítico, la curiosidad tecnológica y el interés por la innovación entre los estudiantes de formación técnica.

II. METODOLOGÍA

La presente investigación corresponde a un estudio de tipo aplicado, con un enfoque cuantitativo, de diseño transversal y alcance descriptivo-tecnológico, orientado a la sistematización de una solución práctica de bajo coste para la visualización y registro de corriente eléctrica en tiempo real. El objetivo central fue desarrollar un sistema basado en el microcontrolador ESP32-WROOM-32 (240 MHz dual core, 520 kB RAM, conectividad Wi-Fi 802.11 b/g/n) que permita a estudiantes de formación técnica observar, registrar y analizar gráficamente la curva de corriente durante el arranque de motores y otras cargas eléctricas, contribuyendo a la comprensión de fenómenos eléctricos en situaciones reales. El proyecto fue validado experimentalmente en el laboratorio de electricidad de un instituto superior tecnológico de Lima. Para ello, se utilizó una pinza amperimétrica PRASEK PREMIUM PR-202A (precisión $\pm 1.5\% + 5$ dígitos) como instrumento de referencia. El procedimiento consistió en: (1) conectar ambos equipos a la misma carga; (2) registrar 10 lecturas por punto; (3) calcular el error como $(I_{DAS} - I_{pinza})/I_{pinza} \times 100$. Los errores obtenidos fueron inferiores al 6.1% en cargas resistivas y menores al 12% en cargas no lineales, valores aceptables para un sistema educativo de bajo coste. El error del 12% se atribuye a la resolución del ADC del ESP32 (12 bits) y a la naturaleza no lineal de la carga, proponiéndose como mejora futura el uso de dsPIC.

La arquitectura general del sistema fue definida mediante un diagrama de bloques, el cual se muestra en la Fig. 1.

Este esquema permitió identificar y organizar los componentes esenciales: sensores de corriente, convertidores analógicos, unidad de procesamiento, almacenamiento temporal, interfaz web de usuario y módulos de comunicación.

Arquitectura del sistema de adquisición y visualización de corriente (ESP32-ACS712)

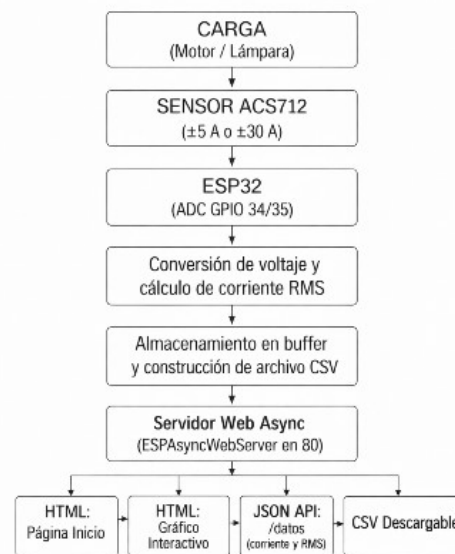


Fig. 1. Diagrama de bloques del sistema DAS basado en ESP32 para medición de corriente, visualización web y descarga de datos en formato CSV.

El bloque inicial está conformado por dos sensores de corriente ACS712: el modelo ACS712ELCTR-05B-T (rango de ± 5 A, sensibilidad de 185 mV/A) y el modelo ACS712ELCTR-30A-T (rango de ± 30 A, sensibilidad de 66 mV/A). Estos sensores operan bajo el principio de efecto Hall, generando una señal analógica proporcional a la corriente medida. La señal entregada por el sensor está centrada en 2.5 V para condiciones de corriente nula, desplazándose hacia arriba o hacia abajo según la dirección y magnitud de la corriente alterna. Esta señal es enviada directamente a los pines GPIO34 y GPIO35 del ESP32, los cuales funcionan como entradas analógicas con una resolución de 12 bits y una referencia interna de 3.3 V.

Una vez recibida la señal, el segundo bloque funcional realiza la conversión de los valores analógicos a digitales mediante el convertidor ADC del microcontrolador. A partir de los valores digitalizados, se calcula la corriente efectiva utilizando un conjunto de muestras almacenadas en arreglos tipo float. Específicamente, se capturan 16 muestras por cada intervalo de cálculo, a razón de una muestra cada milisegundo. Este número fue seleccionado para equilibrar la carga computacional y obtener un valor eficaz representativo (RMS), especialmente útil en corriente alterna. La función *calcularRMS()* toma como argumento el arreglo de muestras correspondiente al sensor activo, eleva al cuadrado cada una de ellas, obtiene la media de los cuadrados y aplica la raíz cuadrada del resultado. Este procedimiento se repite cada vez que el arreglo se llena, y el valor calculado se guarda como último valor válido para su posterior visualización.

De manera paralela, otro bloque del sistema se encarga del almacenamiento temporal de los datos recolectados. Cada nuevo valor RMS se acompaña de una marca de tiempo generada a partir del contador *millis()* del ESP32, y ambos se formatean como texto en una cadena tipo String que actúa como buffer CSV. Esta cadena es gestionada por la función *agregarDatoCSV()*, la cual también implementa mecanismos para controlar el tamaño del archivo y evitar el desbordamiento de memoria. Si la longitud del texto supera los 10,000 caracteres, la función recorta automáticamente los datos más antiguos, manteniendo solo las últimas muestras disponibles. El encabezado "Tiempo(s), Corriente(A)" se asegura al inicio del archivo, garantizando compatibilidad con herramientas de hoja de cálculo para su análisis posterior.

El bloque encargado de la interfaz web cumple una función central en la operatividad del sistema. Para ello, se utilizó la librería *ESPAsyncWebServer*, que permite levantar un servidor web local sobre el ESP32 y atender múltiples rutas simultáneamente. La estructura del servidor contempla rutas específicas para tres propósitos principales: / para mostrar la pantalla de selección de rango, /*rango* para mostrar el gráfico de corriente en tiempo real, y /*grafico-completo* para presentar una vista histórica completa con estadísticas. Además, se configuraron endpoints como /*datos*, que devuelve un objeto JSON con los valores actuales de corriente y RMS, y /*datos-csv*, que permite descargar el archivo CSV generado en el buffer interno. Esta última funcionalidad fue pensada para que el sistema no solo sirva como herramienta de visualización, sino también como fuente de datos reales para trabajos posteriores de análisis.

Dentro de la sección gráfica, se identifican funciones importantes como *generarHTMLInicio()*, *generarHTMLGrafico()* y *generarHTMLGraficoCompleto()*. Estas funciones están diseñadas para generar el contenido HTML de cada una de las vistas disponibles. En particular, *generarHTMLGrafico()* incluye elementos JavaScript que, mediante peticiones asincrónicas (AJAX), consultan el endpoint /*datos* cada 100 milisegundos y actualizan un gráfico dinámico generado con la biblioteca *Chart.js*. Esta gráfica presenta los últimos 30 valores medidos, lo que equivale a una ventana de observación de aproximadamente 3 segundos. El diseño permite visualizar de manera clara el comportamiento de la corriente durante eventos transitorios como el arranque de un motor o el encendido de una lámpara de descarga. La gráfica histórica, generada por la función *generarHTMLGraficoCompleto()*, procesa el archivo CSV directamente en el navegador y extrae valores estadísticos clave: corriente máxima, mínima y promedio. Esta información se presenta junto con el gráfico completo del registro, permitiendo al usuario analizar tendencias y variaciones con mayor profundidad.

La capa de comunicación se basa exclusivamente en la conectividad WiFi del ESP32, que opera en modo cliente. Al momento de inicializarse, el dispositivo se conecta automáticamente a una red con SSID y contraseña predefinidos, lo que permite el acceso desde cualquier

dispositivo dentro de la misma red local. Todas las interacciones entre cliente y servidor se realizan mediante el protocolo HTTP, empleando el método GET para mantener la simplicidad del diseño. Los datos se transfieren en formatos estándar ampliamente compatibles: JSON para las actualizaciones en tiempo real y CSV para el registro histórico. Esta elección se realizó con base en la necesidad de asegurar accesibilidad desde navegadores comunes y compatibilidad con herramientas de análisis como Excel o Google Sheets. Se evitó deliberadamente el uso de WebSockets o HTTPS para mantener la implementación sencilla y de bajo consumo de recursos, aunque estas características podrían añadirse en una versión futura.

La validación experimental del sistema se llevó a cabo en condiciones controladas en el laboratorio mencionado. La temperatura ambiente se mantuvo en $29 \pm 2^\circ\text{C}$ y la humedad relativa en $60 \pm 5\%$. Se conectaron distintas cargas al sistema de medición para validar su funcionamiento en condiciones reales y diversa, con el objetivo de comprobar tanto la precisión como la estabilidad del sistema en escenarios reales. Las lecturas se tomaron simultáneamente con las mediciones de corriente cada 2 segundos. Se conectaron distintas cargas al sistema de medición para validar su funcionamiento en condiciones reales y diversas. Entre las cargas utilizadas se incluyeron lámparas incandescentes de 100 W, resistencias térmicas de 500 y 1500 W, y lámparas de alta intensidad: halogenuro metálico Philips HPI-T PLUS 400W, vapor de sodio Philips SON-T Plus 250W, vapor de mercurio Philips ML 250W E40 y luz mixta Philips ML 250W E40. Asimismo, se realizaron pruebas con un motor trifásico ABB M2BAX 80MB 4 de 1 HP sometido a dos modos distintos de arranque: arranque directo y arranque estrella-triángulo. En cada caso, se observó y registró la curva de corriente durante el encendido, permitiendo identificar tanto el comportamiento transitorio como el valor estabilizado.

Los resultados obtenidos fueron comparados con mediciones realizadas mediante instrumentos de referencia, validando así la precisión y utilidad del sistema desarrollado para fines didácticos y de análisis técnico. Los valores obtenidos por el sistema DAS fueron consistentes con las mediciones realizadas mediante multímetros digitales y pinzas amperimétricas de referencia, presentando un error absoluto medio inferior al 5 % en el caso del sensor de 5 amperios y menor al 10 % para el sensor de 30 amperios. Si bien los resultados son adecuados para fines educativos y de monitoreo general, se plantea como mejora futura la incorporación de un botón físico o digital que permita ajustar manualmente el factor de corrección aplicado a cada sensor, lo cual facilitaría una calibración más precisa según las condiciones específicas de uso.

También se observaron los tiempos de respuesta y la fluidez del gráfico durante eventos transitorios, concluyéndose que el sistema es capaz de representar visualmente los picos de corriente típicos del arranque de cargas inductivas. Las curvas registradas fueron exportadas en formato CSV y posteriormente graficadas en herramientas externas,

confirmando la utilidad del sistema como generador de datos reales para análisis académico.

En el plano técnico, se tomaron precauciones para optimizar el uso de memoria del ESP32, evitando el uso excesivo de memoria dinámica y delimitando el tamaño de los arreglos y buffers. El sistema fue diseñado para utilizar aproximadamente entre 50 y 60 kilobytes de memoria RAM, lo que representa cerca del 20 % de la memoria disponible para el usuario en el módulo ESP32-WROOM-32. Esta optimización permitió garantizar la estabilidad del sistema incluso durante periodos prolongados de medición y transmisión continua de datos. La variable datosCSV, que almacena los registros temporales, fue gestionada con técnicas de recorte y reinicio tras cada descarga para evitar sobrecargas. Asimismo, se implementó un mecanismo de autoapagado después de 5 minutos de medición continua para limitar el consumo de recursos y prevenir posibles fallos por saturación. La alimentación del ESP32 se realizó mediante una fuente de 5 V y 2 A, conectada al pin Vin, garantizando un funcionamiento estable incluso con carga de red activa y uso intensivo del WiFi.

Desde el punto de vista ético, se garantizó la seguridad de los usuarios mediante el aislamiento físico del sensor respecto a las líneas de potencia, recordando que los sensores ACS712 aíslan galvánicamente el circuito de medición del circuito de control. Además, se diseñó el sistema con fines exclusivamente académicos, sin involucrar la recopilación de datos personales ni la interacción directa con usuarios externos, lo que excluyó la necesidad de autorización ética institucional.

En resumen, la metodología adoptada permitió desarrollar un sistema robusto, accesible y funcional, alineado con los objetivos educativos del proyecto. Su diseño modular, su software transparente y su validación experimental confirman que es una herramienta viable para el análisis de fenómenos eléctricos en entornos de formación técnica.

III. RESULTADOS

La evaluación experimental del sistema DAS propuesto se inició con pruebas aplicadas a cargas resistivas, con el fin de validar la precisión del registro de corriente en situaciones de comportamiento lineal y predecible. Para estos ensayos se utilizaron sensores ACS712 en dos rangos: 5 A y 30 A, dependiendo de la demanda estimada de cada carga.

El primer caso correspondió a una lámpara incandescente de 100 W alimentada con tensión nominal de 220 V. Según la ley de Ohm, se estimó una corriente teórica de aproximadamente 0.455 A. Durante la prueba, el sensor ACS712 de 5 A registró un rango de valores entre 0.40 A y 0.55 A al momento del encendido. La señal osciló ligeramente en los primeros instantes, para luego estabilizarse en torno a los 0.478 A.

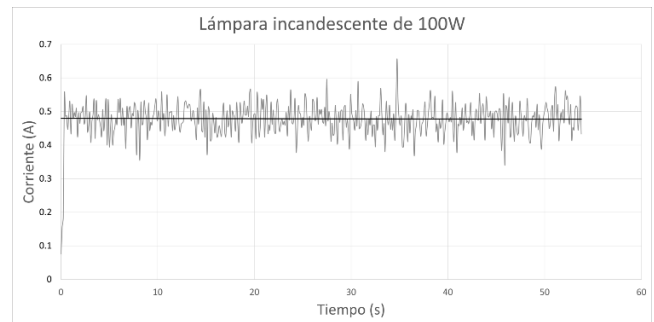


Fig. 2. Curva de corriente registrada con el sensor ACS712 de 5 A durante la operación de una lámpara incandescente de 100W.

Esta lectura representó un error absoluto de 0.028 A respecto al valor teórico, es decir, una desviación de 6.22 %. La curva obtenida presentó un perfil regular y simétrico, sin presencia de transitorios abruptos, como puede observarse en la Fig. 2.

La segunda prueba consistió en conectar una resistencia térmica de 500 W. La corriente teórica, obtenida mediante el cociente entre la potencia y la tensión ($500 \text{ W} / 220 \text{ V}$), fue de 2.27 A. Al realizar la medición con el mismo sensor de 5 A, el sistema reportó un valor promedio estabilizado de 2.135 A. No se detectaron picos de arranque, y la señal se mantuvo constante durante todo el periodo de observación. El error absoluto fue de 0.135 A, equivalente a una variación del 5.95 %, lo cual se consideró aceptable dentro del contexto educativo (Fig. 3).

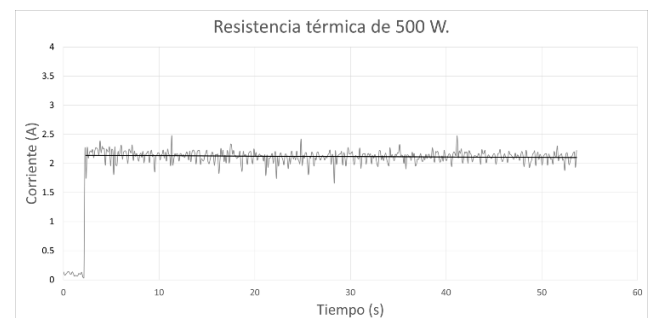


Fig. 3. Corriente medida en una resistencia térmica de 500 W. La señal muestra un comportamiento plano, sin picos ni ruidos importantes.

En la tercera prueba se trabajó con una resistencia térmica de 1500 W, correspondiente a una carga de mayor demanda. Para esta evaluación se empleó el sensor ACS712 de 30 A, realizando previamente una calibración de offset con valor de reposo cercano a 0.25 A. La corriente teórica para esta carga fue de 6.82 A, y el valor registrado por el sistema fue de 6.835 A. al inicio disminuyendo hasta 6.801. El error fue de 0.28%, lo que evidenció un buen desempeño del sistema incluso con mayores niveles de corriente. La curva mostró un comportamiento plano, sin ruido ni oscilaciones perceptibles, lo cual coincide con la naturaleza puramente resistiva de la carga (Fig. 4).

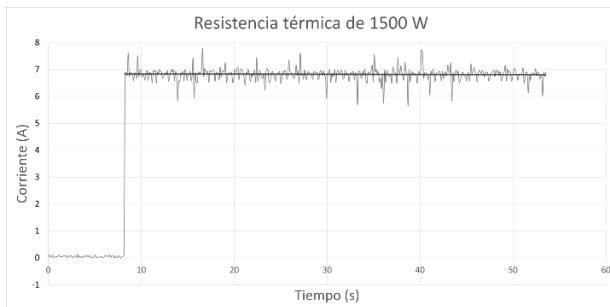


Fig. 4. Curva de corriente registrada con el sensor ACS712 de 30 A durante la operación de una resistencia térmica de 1500 W.

La Tabla 1 resume los resultados obtenidos para estas tres pruebas, indicando las corrientes teóricas y medidas, el tipo de sensor utilizado y el error relativo. Los datos evidencian una buena correlación entre los valores esperados y los medidos, especialmente en cargas mayores, donde el margen de error fue mínimo.

Carga probada	SU	CT	CM	E
Lámpara Incand. (100 W)	5 A	0.45	0.478	6.22
Res. térmica (500 W)	5 A	2.27	2.135	5.95
Res. térmica (1500 W)	30 A	6.82	6.801	0.28

Tabla 1. Comparación entre valores teóricos y medidos de corriente en pruebas con cargas resistivas. SU: Sensor usado, CT: Corriente teórica (A), CM: Corriente medida (A), E: Error (%).

En la siguiente fase experimental se evaluó el comportamiento eléctrico de distintas lámparas de alta intensidad (HID) durante su encendido y operación estable. Este tipo de cargas presenta fenómenos transitorios notorios debido al proceso de ionización y estabilización térmica que ocurre internamente. Se realizaron mediciones con sensores ACS712 de 5 A y 30 A, aplicando correcciones por offset en cada caso para mejorar la precisión del registro.

La primera prueba se realizó con una lámpara mixta de 250 W conectada a 220 V. El consumo teórico estimado para esta carga es de 1.136 A. Se utilizó el sensor ACS712 de 5 A para registrar la corriente. La lámpara fue activada alrededor del segundo 6, generando un pico inicial de 1.552 A. Posteriormente, la señal se estabilizó en un valor promedio de 1.35 A, con una pendiente descendente de -0.0006 A/s, lo que indica una reducción progresiva de la corriente a medida que la lámpara alcanzaba su equilibrio térmico (Fig. 5). Las lecturas se tomaron por cerca de un minuto, lo que permitió determinar el comportamiento inicial de estabilización. Dado que este tipo de lámparas requiere cierto tiempo para alcanzar su régimen estable de funcionamiento, se ha considerado un tiempo estimado de tres minutos como referencia para la estabilización completa. Si se interpola la tendencia observada, se estima que la corriente final podría alcanzar los 1.24 A, lo que representa un error del 9.12% respecto a ese valor proyectado, bastante cercano al consumo teórico calculado.

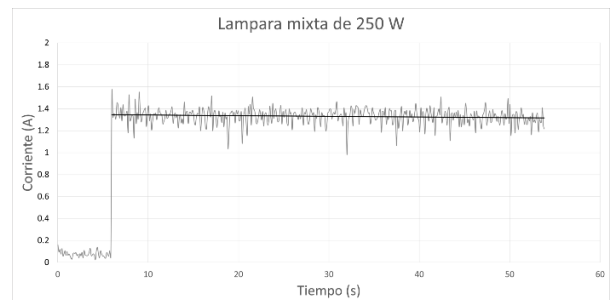


Fig. 5. Curva de corriente de una lámpara mixta de 250 W medida con sensor ACS712 de 5 A. Se incluye línea de tendencia que muestra una ligera caída en el régimen estacionario.

En la segunda medición, se evaluó una lámpara de vapor de mercurio de 250 W. También se utilizó el sensor de 5 A, aplicando el mismo offset de 0.25 A. El sistema registró un pico de corriente de 3.85 A, correspondiente al pulso de encendido necesario para ionizar el gas interno. Transcurridos los primeros 10 segundos, la corriente comenzó a descender y luego se estabilizó en torno a los 1.10 A. Comparado con la corriente teórica (1.14 A), se obtuvo un error de 3.2 %, y la pendiente de descenso calculada fue de -0.0018 A/s. La curva resultante reflejó claramente la fase de estabilización térmica posterior al arranque (Fig. 6).

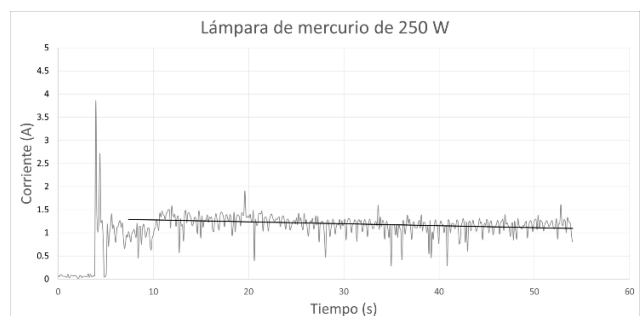


Fig. 6. Comportamiento de la corriente durante el encendido de una lámpara de vapor de mercurio de 250 W. Se observa un pico de arranque y una estabilización progresiva de la corriente.

Para la lámpara de sodio de 250 W se utilizó el sensor de 5 A. El encendido se realizó a los 4 segundos y, a partir de ese momento, la corriente se mantuvo relativamente estable, con un valor promedio de 1.027 A. En comparación con la corriente teórica de 1.14 A, esto representó un error del 9.65 %. La pendiente registrada en esta etapa fue de -0.0001 A/s, lo que evidencia un comportamiento estable. Cabe señalar que el sistema de encendido utilizado incluía un balastro e ignitor, lo cual podría haber influido en la diferencia observada respecto al valor teórico (Fig. 7).

La última prueba de esta serie se realizó con una lámpara de halogenuro metálico de 400 W. Debido a la mayor demanda de corriente durante el encendido, se utilizó un sensor ACS712 calibrado para 10 A.

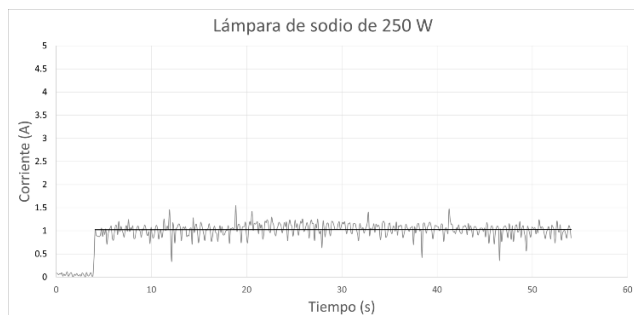


Fig. 7. Curva de corriente registrada durante el encendido de una lámpara de sodio de 250 W. Se observa un comportamiento estable de la corriente.

La última prueba de esta serie se realizó con una lámpara de halogenuro metálico de 400 W. Debido a la mayor demanda de corriente durante el encendido, se utilizó un sensor ACS712 calibrado para 30 A. El arranque se produjo alrededor del segundo 19, alcanzando un pico de 9.0 A. A partir del segundo 28, se observó una caída sostenida en la corriente, con una pendiente de -0.057 A/s , hasta estabilizarse en 1.6 A cerca del segundo 57. Comparado con la corriente teórica de 1.81 A, se registró un error del 12.09 %. La curva mostró un perfil típico de este tipo de lámparas, con una fase de encendido prolongada y una estabilización paulatina (Fig. 8).

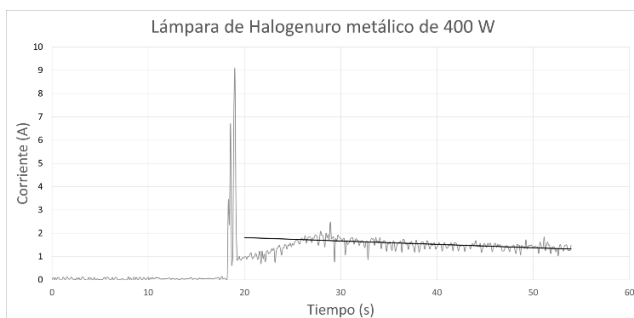


Fig. 8. Curva de corriente de una lámpara de halogenuro metálico de 400 W. Se incluye la línea de tendencia desde el segundo 28, donde se inicia el descenso gradual de la corriente hasta alcanzar el régimen permanente.

La Tabla 2 resume los datos principales de estas cuatro pruebas, incluyendo los valores de pico, las corrientes estabilizadas, las pendientes estimadas y los errores porcentuales respecto a las corrientes teóricas. La información fue extraída directamente de los datos registrados por el sistema DAS implementado.

Tipo de lámpara	PC	m	CE	CT	E
Mixta (250 W)	1.552	-0.0006	1.24	1.14	8.77
Mercurio (250 W)	3.85	-0.0018	1.1	1.14	3.51
Sodio (250 W)	3.22	-0.0001	1.03	1.14	9.65
MH (400 W)	9.00	-0.057	1.6	1.82	12.09

Tabla 2. Comparación entre valores teóricos y medidos de corriente en lámparas HID. PC: Pico de Corriente (A); m: Pendiente; CE: Corriente estabilizada (A); CT: Corriente teórica (A); Error (%).

La última fase experimental se enfocó en el análisis del arranque de un motor trifásico de 1 HP en condiciones de vacío. Se realizaron mediciones utilizando dos técnicas distintas de arranque: arranque directo y arranque estrella-triángulo. En ambas pruebas se empleó el sensor ACS712 de 30 A, calibrado con un offset adecuado, y se configuró el sistema DAS para capturar transitorios de alta velocidad con suficiente resolución temporal.

En el arranque directo, el motor fue conectado directamente a la red de 220 V, sin acoplamiento a carga mecánica. El sistema registró un pico inicial de corriente de 23.6 A, producido en los primeros ciclos tras la conexión. Este valor es característico de los motores de inducción al encender sin contraparte electromotriz. Luego del pico, la corriente descendió rápidamente, alcanzando un valor estabilizado de 1.30 A, que corresponde al consumo del motor operando en vacío. Cabe destacar que el valor nominal de placa del motor es de 3.84 A, lo cual explica la diferencia con la medición estabilizada, debido a la ausencia de carga y a un factor de potencia bajo ($\cos \phi \approx 0.65$). La forma de la curva evidenció un frente abrupto de corriente seguido de una estabilización rápida (Fig. 9).

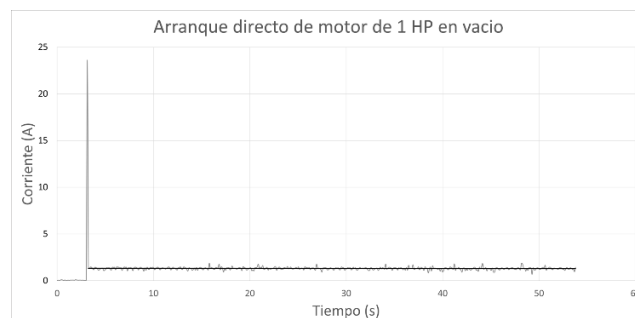


Fig. 9. Curva de corriente durante el arranque directo de un motor trifásico de 1 HP, durante el arranque se presenta un pico de 23.6 A.

En la segunda prueba se implementó un arranque estrella-triángulo, una técnica que permite reducir la corriente de arranque mediante una conexión inicial en estrella, seguida de una conmutación a triángulo una vez que el motor adquiere velocidad. Al momento del encendido en configuración estrella, se registró un pico de 5.893 A, significativamente menor al del arranque directo. Luego, se observó una interrupción momentánea de la señal (corriente $\approx 0 \text{ A}$), correspondiente al intervalo de conmutación entre las configuraciones. Tras la reconexión en triángulo, se produjo un segundo pico de 2.011 A. Finalmente, la corriente descendió progresivamente hasta estabilizarse en 1.365 A, un valor muy cercano al observado en la prueba anterior, lo que confirma que el régimen permanente fue similar en ambos casos. La curva mostró tres fases bien diferenciadas: pico inicial, pausa de transición y estabilización final (Fig. 10).

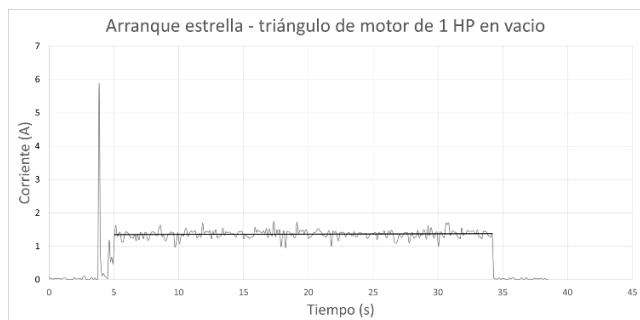


Fig. 10. Curva de corriente en el arranque estrella – triángulo de un motor trifásico de 1 HP, durante el arranque se presenta un pico de 5.893 A.

La comparación de ambos métodos de arranque se presenta resumida en la Tabla 3, que incluye los valores máximos de corriente registrados en cada fase, así como las corrientes estabilizadas. La diferencia entre los picos registrados (23.6 A en arranque directo vs. 5.893 A en estrella-triángulo) pone en evidencia la efectividad de esta última técnica para reducir el estrés eléctrico en el motor al momento del encendido.

Tipo de arranque	Pico de corriente	Corriente estabilizada
Directo	23.6	1.30
Estrella-Triángulo	5.893	1.365

Tabla 3. Comparación entre arranque directo y arranque estrella-triángulo de un motor de 1 HP en vacío.

V. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos mediante el sistema DAS desarrollado permiten interpretar con claridad el comportamiento eléctrico de diferentes tipos de cargas en condiciones reales de laboratorio. En el caso de las cargas resistivas, se observaron valores de corriente cercanos a los teóricos, con errores inferiores al 6.1 % para potencias bajas y prácticamente nulos para potencias mayores. Este comportamiento confirma que los sensores ACS712, aunque económicos, ofrecen un nivel de precisión adecuado para fines didácticos, siempre que se realice una calibración inicial adecuada.

En el análisis de las lámparas de alta intensidad, las curvas registradas permitieron visualizar tanto los picos de corriente en el encendido como las fases de estabilización térmica. Las curvas de lámparas HID (Figuras 5-8) demuestran que el sistema DAS captura correctamente fenómenos transitorios prolongados, como la caída gradual de corriente durante la estabilización térmica, validando su capacidad para registrar cambios lentos en la señal. Estos comportamientos, difíciles de registrar con instrumentos tradicionales como pinzas amperimétricas, se capturaron con suficiente detalle para identificar pendientes, duración de transitorios y valores estables. Al comparar los valores obtenidos con los datos teóricos, los errores se mantuvieron dentro de un margen razonable, considerando la naturaleza no lineal de estas

cargas. En particular, la lámpara de halogenuro metálico presentó el transitorio más prolongado y un pico de corriente cercano a los 9 A, lo que valida la necesidad de herramientas capaces de visualizar estas variaciones con resolución temporal.

Respecto al arranque de motores, las curvas registradas evidenciaron con nitidez las diferencias entre el arranque directo y el arranque estrella-triángulo. El sistema capturó correctamente los picos de corriente, las caídas transitorias por la conmutación de contactores y los valores estabilizados. Estos registros no solo corroboran los principios teóricos, sino que permiten generar material gráfico útil para la enseñanza de técnicas de arranque en máquinas eléctricas.

Comparado con otras propuestas de sistemas DAS educativos encontrados en la literatura, el presente desarrollo destaca por su bajo coste, autonomía, facilidad de replicación y enfoque en cargas industriales típicas del contexto técnico-profesional. Si bien el sistema fue validado en condiciones de laboratorio, su arquitectura modular permite ampliaciones futuras hacia otras variables como voltaje, potencia o factor de potencia, así como su integración con plataformas remotas vía Internet.

Entre las principales limitaciones se encuentra la dependencia del sensor ACS712, cuyo margen de error puede verse afectado por ruido o temperatura ambiente. Además, el sistema no contempla aún un proceso de autoajuste del factor de calibración, lo que podría mejorar la precisión sin intervención manual. Tampoco se ha implementado cifrado de datos o conexiones seguras, lo cual sería importante en versiones remotas. A pesar de ello, para el contexto educativo en el que fue diseñado, estas limitaciones no impidieron el cumplimiento de los objetivos propuestos.

VI. CONCLUSIONES

En este trabajo se describe cómo se implementó un sistema DAS educativo de bajo coste, basado en el microcontrolador ESP32, con el objetivo de monitorear en tiempo real la corriente eléctrica durante el encendido de diversas cargas industriales. La solución permitió registrar curvas asociadas a cargas resistivas, lámparas de alta intensidad y motores trifásicos, capturando de forma efectiva tanto los valores estabilizados como los eventos transitorios.

Los resultados experimentales confirmaron que el sistema ofrece una precisión aceptable para fines educativos, especialmente al aplicar una calibración previa y seleccionar correctamente el rango del sensor. Las curvas obtenidas constituyen un recurso visual valioso, permitiendo a los estudiantes observar fenómenos eléctricos que normalmente no se evidencian con instrumentos básicos, tales como picos de corriente, pendientes de estabilización y diferencias en los métodos de arranque.

Desde el punto de vista pedagógico, el sistema DAS implementado demostró ser una herramienta eficaz para vincular los conceptos teóricos de Electricidad Industrial con

situaciones reales de laboratorio. Específicamente, contribuye a los siguientes resultados de aprendizaje: (a) interpretación de fenómenos dinámicos, al visualizar en tiempo real los picos de corriente y tiempos de estabilización de lámparas HID y motores; (b) toma de decisiones técnicas fundamentadas, al comparar diferentes métodos de arranque (directo vs. estrella-triángulo) y analizar su impacto en la corriente; y (c) desarrollo de competencias en instrumentación, al trabajar con sensores reales (ACS712, DHT11) y registrar mediciones para su posterior análisis. Su bajo coste, facilidad de implementación y portabilidad lo convierten en una alternativa viable para su incorporación en instituciones técnicas con recursos limitados. Además, su estructura modular permite futuras mejoras e implementaciones adaptadas a otros cursos o especialidades.

Se verificó, además, la viabilidad del uso del ESP32 como base para proyectos educativos orientados al aprendizaje práctico, aunque se identificaron algunas limitaciones inherentes al nivel de precisión, en particular por los efectos del offset generado por los sensores de corriente ACS712. En ese sentido, se recomienda explorar, en futuras versiones, el uso de microcontroladores de mayor precisión, como los dsPIC, especialmente en aplicaciones que requieran mediciones más exactas.

Cabe señalar que el desarrollo de este tipo de proyectos requiere conocimientos intermedios en electrónica y programación, lo cual puede representar un reto para estudiantes en los primeros ciclos de formación. No obstante, se constató que, con una adecuada guía pedagógica y el apoyo de recursos accesibles, es posible lograr resultados funcionales y didácticamente valiosos.

Por último, se reconoce que la literatura académica relacionada con el uso de microcontroladores en procesos de enseñanza-aprendizaje en electricidad industrial es aún escasa, particularmente fuera de las especialidades de electrónica o mecatrónica. Por ello, este trabajo busca también aportar a la construcción de referentes que orienten futuras propuestas pedagógicas centradas en el aprendizaje práctico con tecnologías digitales.

Como líneas futuras de trabajo, se sugiere incorporar sensores adicionales para medir voltaje, potencia y energía, así como desarrollar una interfaz más adaptable y una conexión directa del ESP32 a redes Wi-Fi existentes, sin necesidad de puntos de acceso intermedios. Asimismo, como parte de las mejoras de seguridad y precisión, se propone incorporar un relé de retención controlado por el ESP32 para implementar protección activa por software ante sobrecorrientes (umbral >25A), complementando la protección actual del interruptor termomagnético (ITM) de 32A. La integración con servicios en la nube permitiría, además, almacenar registros históricos y facilitar el acceso remoto a los datos desde cualquier ubicación. Para reducir el error del 12% observado en cargas no lineales (lámparas de halogenuro metálico), se propone el uso de microcontroladores con mayor resolución ADC, como los dsPIC de Microchip, que ofrecen convertidores de 16 bits y mayor velocidad de muestreo. Estas mejoras, junto con la

implementación de un sistema de calibración dinámica, consolidarían esta propuesta como una plataforma integral para la enseñanza de la automatización eléctrica en entornos técnicos.

REFERENCIAS

- [1] J. A. Ariza and H. Baez, "Understanding the role of single-board computers in engineering and computer science education: a systematic literature review", *Computer Applications in Engineering Education*, Jun. 2021, doi: 10.1002/cae.22439.
- [2] H. A. Abd Al-Asadi and A. A. Jabbar Chalhawi, "Remotely controlled water channel system for laboratory education utilizing internet of things and SCADA technologies", *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 31, no. 3, pp. 1266-1273, Sep. 2023, doi: 10.11591/ijeecs.v31.i3.pp1266-1273.
- [3] S. V. Kandala *et al.*, "Engineering end-to-end remote labs using IoT-based retrofitting", *IEEE Access*, vol. 13, pp. 1106-1132, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3523066.
- [4] D. Hercog, T. Lerher, M. Truntič, and O. Težak, "Design and implementation of ESP32-based IoT devices", *Sensors*, vol. 23, no. 15, p. 6739, Jul. 2023, doi: 10.3390/s23156739.
- [5] J. Zambrano-Mieles, M. Tupac-Yupanqui, S. Mari-Loardo, and C. Vidal-Silva, "Integrating ESP32-based IoT architectures and cloud visualization to foster data literacy in early engineering education", *Computers*, vol. 15, no. 1, p. 51, Ene. 2026, doi: 10.3390/computers15010051.
- [6] O. Panagopoulos and A. A. Argiriou, "Low-cost data acquisition system for solar thermal collectors", *Electronics*, vol. 11, no. 6, p. 934, Mar. 2022, doi: 10.3390/electronics11060934.
- [7] K. C. Sum, K.-H. Ng, W.-K. Lam, H.-Y. Chui, and C. F. Li, "Microcontroller based platforms for STEM education", in *2023 IEEE Integrated STEM Education Conference (ISEC)*, IEEE, Mar. 2023, pp. 214-217, doi: 10.1109/ISEC57711.2023.10402172.
- [8] Đ. Mijailović, A. Đorđević, M. Stefanovic, D. Vidojević, A. Gazizulina, and D. Projević, "A cloud-based with microcontroller platforms system designed to educate students within digitalization and the Industry 4.0 paradigm", *Sustainability*, vol. 13, no. 22, p. 12396, Nov. 2021, doi: 10.3390/su132212396.
- [9] T. A. Dos Santos, F. G. De Freitas, D. L. C. Gonçalves, and L. M. Fernández-Ramírez, "Design and validation of IoT measurement system for photovoltaic generation", *Ingeniería*, no. 28, pp. 44-52, Jul. 2022, doi: 10.17163/ings.n28.2022.04.
- [10] Espressif Systems, "ESP32-WROOM-32 datasheet", Shenzhen, China, 2023. [Online]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf
- [11] W. L. Holman and J. E. Davies, "Computers in cardiac surgery", *ASAIO Journal*, vol. 71, no. 10, pp. 861-864, Oct. 2025, doi: 10.1097/MAT.0000000000002441.
- [12] O. M. Zobel, J. Maierhofer, and D. J. Rixen, "OASIS: open acquisition system for IEPE sensors: for academic research and teaching purposes", in *Sensors and Instrumentation and Aircraft/Aerospace Testing Techniques*, vol. 8, New York: River Publishers, 2025, pp. 79-86, doi: 10.1007/978-3-031-34938-6_9.
- [13] S. Gorobchenko *et al.*, "Overview of SCADA-systems: basic protocols, architecture and system components used in teaching students in the discipline of process control systems", in *AIP Conference Proceedings*, vol. 3100, no. 1, p. 030003, 2024, doi: 10.1063/5.0199629.
- [14] M. C. Rodriguez-Sanchez, A. Torrado-Carvajal, J. Vaquero, S. Borromeo, and J. A. Hernandez-Tamames, "An embedded systems course for engineering students using open-source platforms in wireless scenarios", *IEEE Transactions on Education*, vol. 59, no. 4, pp. 248-254, Nov. 2016, doi: 10.1109/TE.2016.2526676.
- [15] B. Tabuenca, V. García-Alcántara, C. Gilarranz-Casado, and S. Barrado-Aguirre, "Fostering environmental awareness with smart IoT planters in campuses", *Sensors*, vol. 20, no. 8, p. 2227, Apr. 2020, doi: 10.3390/s20082227