

# Control ecoeficiente para equipos de prueba eléctrica en la industria electrónica

## *Eco-efficient control for electrical testing equipment in the electronics industry*

Geu M. Puentes-Conde<sup>1a,b</sup> , Ernesto Sifuentes de la Hoya<sup>1c</sup>  ✉ , Javier Molina Salazar<sup>1b</sup> , Francisco Javier Enríquez-Aguilera<sup>1c</sup> , Guadalupe Navarro Enriquez<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> {<sup>a</sup> Doctorado en Tecnología}, {<sup>b</sup> Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura}, {<sup>c</sup> Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación}, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Mecatrónica; Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez, México

### RESUMEN

Este artículo presenta la implementación de un sistema de control ecoeficiente para equipos de prueba eléctrica en la manufactura de alarmas para la detección de humo, monóxido de carbono (CO) y gases explosivos. El propósito principal es reducir el impacto ambiental asociado a los procesos industriales mediante la optimización del consumo de energía e insumos. El sistema integra hardware y software para la gestión autónoma de tarjetas electrónicas, fuentes de alimentación y estaciones de cómputo, y coordina automáticamente diversos modos de operación. Esta estrategia permite prolongar la vida útil de los componentes y reducir el consumo eléctrico durante los periodos de inactividad. Los resultados experimentales muestran una disminución del 25 % en el consumo energético durante la operación normal mediante el control de periféricos en hibernación y una reducción total del 100 % tras intervalos de inactividad, además de una disminución de entre 8.7 % y 10 % en el uso de gases de prueba (CO y metano). En conjunto, la propuesta constituye una alternativa de bajo costo, replicable y orientada a la sostenibilidad energética y ambiental en sistemas de prueba industrial, con potencial para optimizar la eficiencia de los procesos productivos.

**PALABRAS CLAVE:** control ecoeficiente; sustentabilidad energética; equipos de prueba eléctrica; optimización energética; reducción de emisiones.

### ABSTRACT

This research demonstrates the implementation of an eco-efficient control system for electrical test equipment used in manufacturing smoke, carbon monoxide (CO), and explosive gas detection alarms. The main goal is to reduce the environmental impact of industrial processes by optimizing energy use and decreasing gas consumption. The system merges hardware and software to independently manage electronic boards, power supplies, and computer stations, automatically coordinating different operating modes. This approach extends component lifespan and decreases energy use during idle times. Experimental results show a 25% reduction in energy consumption during normal operation through peripheral hibernation control, and a complete 100% reduction after periods of inactivity, along with an 8.7% to 10% decrease in test gas usage (CO and CH<sub>4</sub>). Overall, the solution is low-cost, easy to replicate, and aims to enhance energy and environmental sustainability in industrial test systems, with the potential to boost production efficiency.

**KEYWORDS:** eco-efficient control; energy sustainability; electrical testing equipment; energy optimization; emission reduction.

#### Correspondencia:

**DESTINATARIO:** Ernesto Sifuentes de la Hoya  
**INSTITUCIÓN:** Universidad Autónoma de Ciudad Juárez / Instituto de Ingeniería y Tecnología  
**DIRECCIÓN:** Ave. del Charro núm. 450 norte, C. P. 32320, Ciudad Juárez, Chihuahua, México  
**CORREO ELECTRÓNICO:** [esifuent@uacj.mx](mailto:esifuent@uacj.mx)

**Fecha de recepción:** 28 de octubre de 2025. **Fecha de aceptación:** 19 de marzo de 2026. **Fecha de publicación:** 24 de abril de 2026.



## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la industria enfrenta una presión creciente para impulsar la innovación tecnológica y, al mismo tiempo, desarrollar productos y servicios con un enfoque sostenible. Este desafío se sitúa en un contexto global marcado por la crisis climática, la escasez de recursos naturales y el crecimiento constante de la población mundial. Bajo estas condiciones, resulta indispensable adoptar prácticas que reduzcan la generación de residuos, las emisiones de gases de efecto invernadero y la liberación de contaminantes. Dichas acciones se relacionan estrechamente con el concepto de *ecoeficiencia*, introducido por el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD) en 1992, y definido como una estrategia empresarial orientada a generar mayor valor con menor impacto ambiental [1]. En esta misma línea, la ecoeficiencia debe enfocarse en la mejora de los procesos de manufactura, de manera que se optimice el uso de los recursos y se reduzca la degradación ambiental, manteniendo al mismo tiempo la rentabilidad económica [2]-[3].

De acuerdo con datos del Instituto Municipal de Investigación y Planeación (IMIP), Ciudad Juárez constituye una región de gran relevancia industrial, albergando un total de 416 plantas de manufactura que representan aproximadamente el 11.8 % de la superficie urbana [4]. Este escenario justifica el desarrollo de la presente investigación, enfocada en el sector de la manufactura de productos electrónicos, donde los equipos de prueba eléctrica resultan ser herramientas indispensables para evaluar el desempeño de circuitos impresos (PCB) mediante la aplicación de estímulos eléctricos, térmicos y ambientales, entre otros, con el propósito de verificar su funcionalidad [5]-[6]. La [Figura 1](#) muestra un equipo de prueba eléctrica diseñado principalmente para la calibración y validación de alarmas de humo, de CO y de gas explosivo [7].



Figura 1. Equipo de prueba eléctrica para prueba de alarmas de CO y gas explosivo.

Sin embargo, el sistema actual carece de características ecoeficientes entre hardware y software; por ejemplo, Monagas *et al.* [8] presentan un prototipo de un equipo de prueba eléctrica *in-circuit* modular, de bajo costo y compacto, que integra controles que permiten un funcionamiento óptimo, lo que posibilita el desarrollo y la aplicación de controles ecoeficientes en el equipo de prueba en el presente estudio.

La [Figura 2](#) presenta el diagrama de bloques general del equipo de prueba, conformado por una computadora central que, a través de una interfaz gráfica de usuario (GUI), coordina el funcionamiento de las tarjetas de control, las tarjetas de prueba y el medidor de CO y de gas explosivo. La comunicación entre estos módulos se establece mediante el protocolo serial RS-232, complementada con fuentes de alimentación y una tarjeta de adquisición y control PCI-6320 de National Instruments (NI). Este dispositivo es responsable del monitoreo de sensores y actuadores, lo que permite una gestión integral y de alta precisión de las variables críticas del sistema.

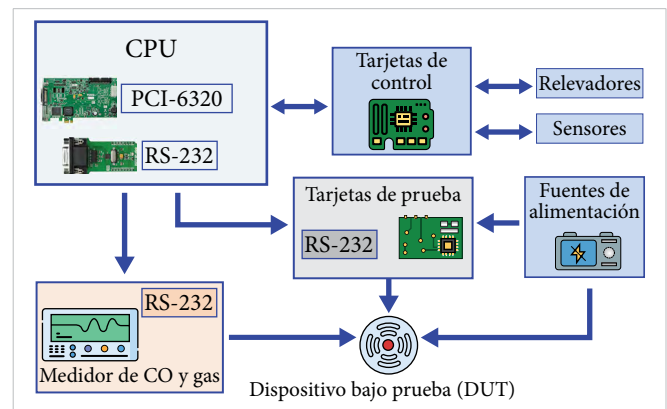


Figura 2. Esquema general en bloques del equipo de prueba propuesto.

La distribución y la capacidad operativa del equipo de prueba propuesto dependen directamente del número de tarjetas de prueba instaladas. La [Figura 3](#) muestra la capacidad de una tarjeta individual para controlar un nido compuesto por ocho dispositivos bajo prueba (*Device Under Test*, DUT) mediante la comunicación UART y la aplicación de estímulos de voltaje proporcionados por una fuente de alimentación.

El sistema de prueba permite procesar hasta 64 unidades por ciclo operativo. Esta capacidad se fundamenta en una arquitectura modular compuesta por ocho tar-

jetas de prueba, cada una vinculada de forma independiente a una fuente de alimentación dedicada.

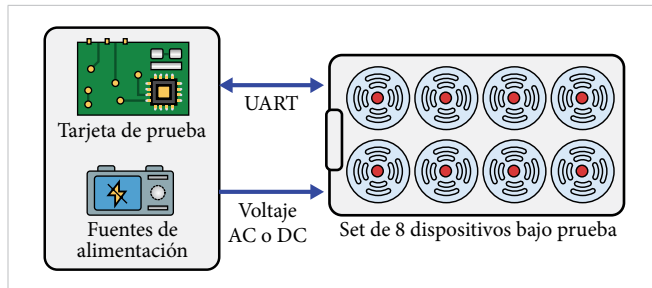


Figura 3. Prueba del dispositivo bajo prueba (DUT) por tarjeta.

Los componentes interactúan simultáneamente mediante la comunicación RS-232, mientras que el control de periféricos —sensores y relevadores— se realiza a través de los puertos digitales de la tarjeta NI PCI-6320. La Figura 4 presenta el diagrama de flujo del funcionamiento general del equipo de prueba eléctrica.

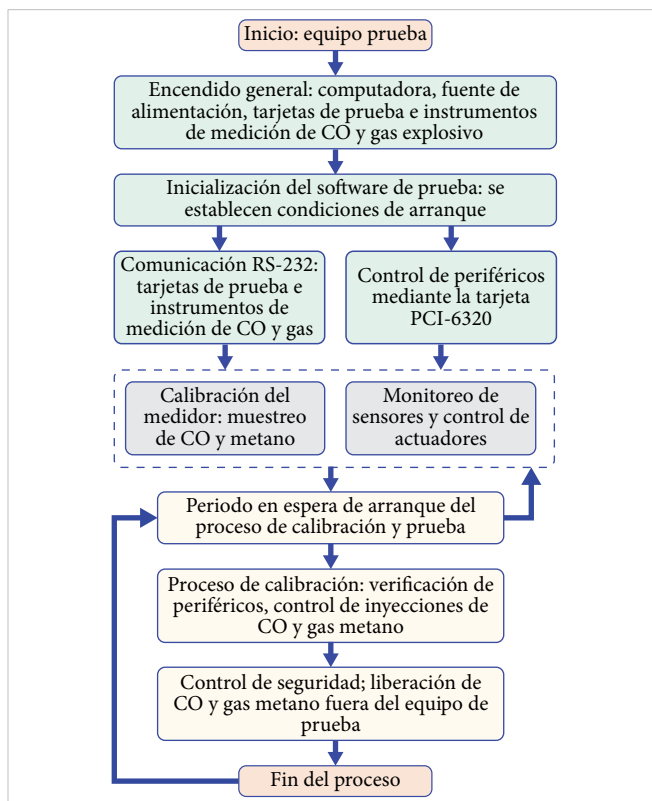


Figura 4. Diagrama de funcionamiento general del equipo de prueba.

Es relevante señalar que el instrumento de medición empleado para obtener las lecturas de referencia requiere un proceso constante de calibración, condición indispensable para garantizar la precisión y la confi-

bilidad de los resultados. Este procedimiento se lleva a cabo mediante el muestreo de gases estándar, que se establecen como referencia para realizar una interpolación lineal entre diferentes concentraciones conocidas: aire limpio a 0 ppm, monóxido de carbono (CO) a 150 ppm y metano (CH<sub>4</sub>) a 5000 ppm, 12 000 ppm y 20 000 ppm como gas explosivo.

En esta investigación, el objetivo principal es incrementar la eficiencia operativa del equipo de prueba propuesto y, al mismo tiempo, minimizar su impacto ambiental mediante la optimización del uso de los recursos. Las acciones implementadas se centran en: (i) la reducción del consumo energético en distintos modos de operación de las tarjetas de prueba, incluyendo el control de fuentes de alimentación durante periodos de inactividad y la desconexión total tras lapsos prolongados sin operación; (ii) la optimización del proceso de calibración del medidor de CO y gas explosivo, garantizando precisión y estabilidad en las mediciones; y (iii) el monitoreo y control sistemático de los insumos empleados. La integración de estos mecanismos permite disminuir el consumo eléctrico y asegurar un uso más eficiente y sostenible de los recursos.

## II. METODOLOGÍA

El diseño metodológico adoptado en esta investigación corresponde a un enfoque experimental-descriptivo. Este se fundamenta en la manipulación controlada del equipo de prueba propuesto mediante la integración de hardware y software, con el propósito de optimizar el consumo de energía eléctrica y disminuir el uso de insumos. Asimismo, se documenta en detalle el comportamiento esperado del sistema durante el proceso, lo que permite analizar cómo las modificaciones implementadas inciden directamente en la eficiencia energética y la gestión de recursos.

### A. ARQUITECTURA DE SOFTWARE Y CONTROL DEL SISTEMA

El código fuente del equipo de prueba propuesto se desarrolla en el entorno orientado a objetos LabWindows/CVI de National Instruments (NI) en ANSI C. Esta plataforma permite integrar y orquestar controles a través de programación para: (i) gestionar los modos de operación de las tarjetas electrónicas mediante un conjunto de comandos o instrucciones vía comunicación RS-232; (ii) gobernar mediante señales digitales las fuentes de alimentación a través de la tarjeta NI PCI-6320 que interactúa con una tarjeta de potencia para el control de

relevadores y sensores; y (iii) ejecutar instrucciones de desconexión eléctrica vía software, tanto del equipo de prueba, como de la estación de cómputo tras prolongados periodos de inactividad.

Por otra parte, la disminución del uso de insumos mediante rutinas de control incorporadas al código fuente para la autocalibración inteligente del instrumento de medición, con el fin de minimizar los recursos de funcionamiento del equipo. Asimismo, la implementación de una interfaz gráfica para la supervisión, el registro y la gestión de insumos en tiempo real mediante la integración de la información en una base de datos SQL y la generación de notificaciones automáticas por correo electrónico. Esta configuración garantiza la trazabilidad operativa y una respuesta temprana ante las desviaciones.

### B. CONTROL DE TARJETAS DE PRUEBA

Las tarjetas de prueba constituyen los elementos clave en el funcionamiento del equipo propuesto, ya que están directamente vinculadas a la conversión de la comunicación RS-232 a UART. Bajo este esquema se establece una relación maestro-esclavo, en la que la computadora central actúa como maestro y las tarjetas de prueba como esclavos que ejecutan las instrucciones recibidas. Esta arquitectura asegura un control jerárquico y eficiente, garantizando que los dispositivos bajo prueba (Device Under Test, DUT) respondan con precisión a los estímulos programados.

De acuerdo con el diagrama de flujo de la [Figura 4](#), una vez que el sistema se enciende, las tarjetas permanecen en operación normal, es decir, en estado de espera, hasta que se inicia un proceso de prueba. Sin embargo, para incrementar la eficiencia energética, incorporan modos de operación avanzados que permitan reducir el consumo durante los periodos de inactividad. Vía RS-232, la computadora inicializa en estados de bajo consumo, lo que permite una gestión dinámica de los recursos.

La implementación de dichos modos requiere modificaciones en la programación de los microcontroladores integrados en cada tarjeta, así como la definición de nuevos comandos e instrucciones que permitan la transición entre los distintos estados de operación: modo normal, modo *sleep* y modo bajo consumo. Estos modos, resumidos en la [Tabla 1](#), permiten adaptar el consumo energético a las necesidades del proceso en curso.

TABLA 1  
MODOS DE OPERACIÓN DE LAS TARJETAS DE PRUEBA

MODOS DE OPERACIÓN	DESCRIPCIÓN	CONSUMO ESPERADO	APLICACIÓN PRINCIPAL
Normal	La tarjeta permanece activa y lista para ejecutar procesos de prueba, recibiendo y transmitiendo datos en tiempo real.	100 % (consumo nominal)	Ejecución de pruebas eléctricas y validación de los DUT.
<i>Sleep</i>	Estado de suspensión parcial; algunos periféricos se desactivan, pero se mantiene la comunicación mínima para reactivación inmediata.	40–60 % del consumo nominal	Periodos cortos de inactividad entre pruebas.
Bajo consumo	Estado de hibernación profunda; la mayoría de los módulos se apagan y solo se conserva la lógica esencial para la reactivación.	< 10 % del consumo nominal	Periodos prolongados de inactividad o espera.

La [Figura 5](#) muestra el esquema de comunicación propuesto para gestionar la activación y el control de dichos modos en una tarjeta específica, lo que consolida un sistema más eficiente y sostenible.

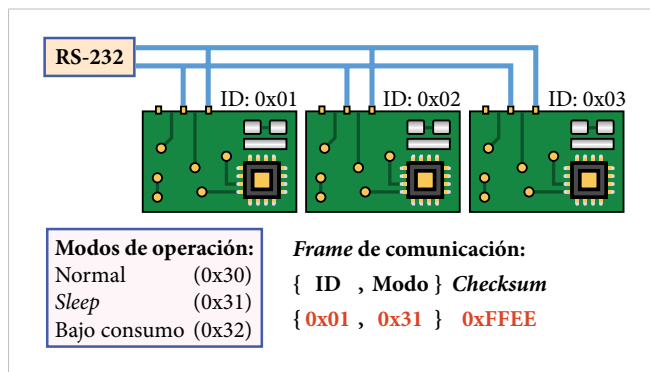


Figura 5. Modo operación propuesta en las tarjetas de prueba.

Otro aspecto fundamental del sistema propuesto es que cada tarjeta de prueba cuenta con una fuente de alimentación dedicada, encargada de suministrar los estímulos de voltaje a los DUT. De esta forma, el control de encendido y apagado de dichas fuentes puede gestionarse con precisión mediante la tarjeta de control y la tarjeta NI PCI-6320, como se muestra en la [Figura 6](#). Este mecanismo de control selectivo resulta esencial para optimizar el consumo energético, ya que permite desactivar individualmente las fuentes durante periodos de inactividad o en ausencia de *sets* completos de unidades bajo prueba (DUT).

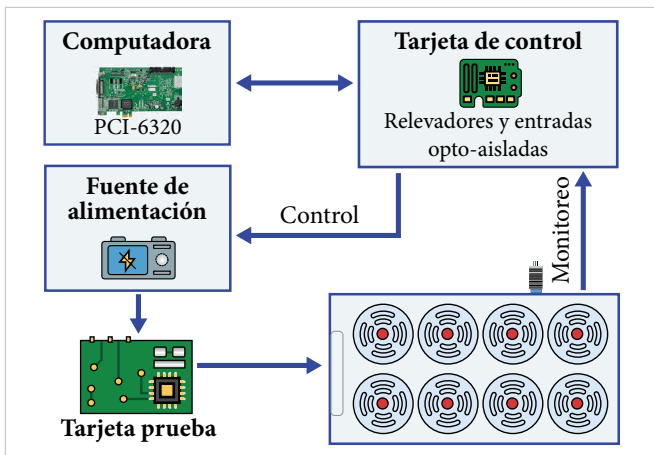


Figura 6. Control de fuentes de alimentación.

En consecuencia, se favorece una operación más eficiente, prolongando la vida útil de los componentes y reduciendo el impacto ambiental asociado al uso continuo de la energía eléctrica. La [Figura 7](#) presenta el diagrama de flujo correspondiente al control energético de las tarjetas de prueba eléctrica y de la computadora, desarrollado en esta investigación.

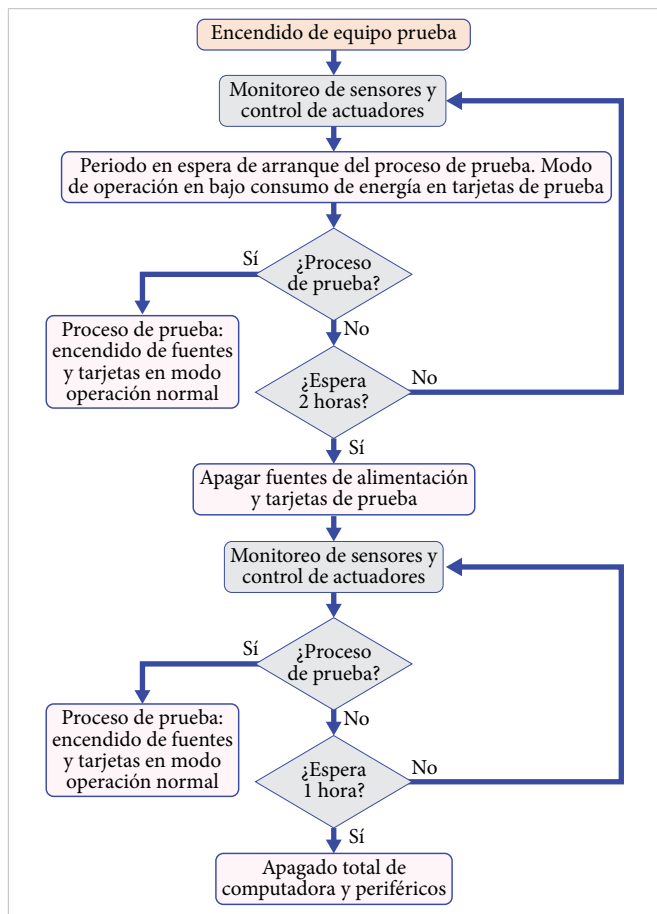


Figura 7. Control energético propuesto.

Dicho esquema describe de manera sistemática la secuencia de decisiones y acciones implementadas para gestionar los diferentes modos de operación, optimizar el consumo energético y garantizar la desconexión total del sistema tras periodos prolongados de inactividad.

### C. CONTROL DE CALIBRACIÓN DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

En el código fuente del equipo de prueba, desarrollado en LabWindows/CVI de NI, se implementó un hilo de programación adicional dedicado a las rutinas de autocalibración del equipo de medición. Este hilo de programación, independiente del sistema principal, automatiza la calibración mediante una tarjeta de control que comunica con la computadora vía RS-232 y con el medidor a través del protocolo ModBus RS-232, lo que permite controlar remotamente tanto el instrumento como las electroválvulas de cada gas. El sistema gestiona los tiempos de calibración y el flujo de aire limpio, así como el de monóxido de carbono (CO) y metano (CH<sub>4</sub>), con el propósito de reducir el consumo de insumos. La [Figura 8](#) muestra el esquema general de control entre la computadora, la tarjeta de control y el medidor.

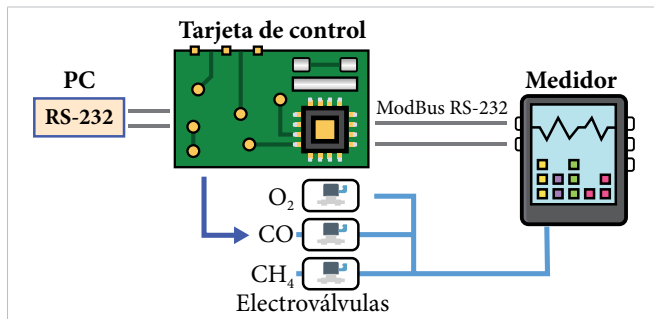


Figura 8. Control para el proceso de auto-calibración del medidor.

El proceso de autocalibración del instrumento de medición se describe en el diagrama de flujo de la [Figura 9](#). Dicho procedimiento se activa únicamente al iniciar una prueba, de modo que la calibración automática solo se ejecuta cuando es requerida para el proceso de validación. De lo contrario, aun cuando el medidor se encuentre descalibrado, el proceso no se ejecuta, lo que evita ciclos de calibración innecesarios y permite mantener el instrumento en modo de bajo consumo durante los periodos de inactividad. El procedimiento es gestionado por software, encargado de controlar con precisión los tiempos de muestreo del flujo de gas mediante las electroválvulas y de ajustar la calibración del medidor con base en las lecturas obtenidas y el estándar de gas seleccionado.

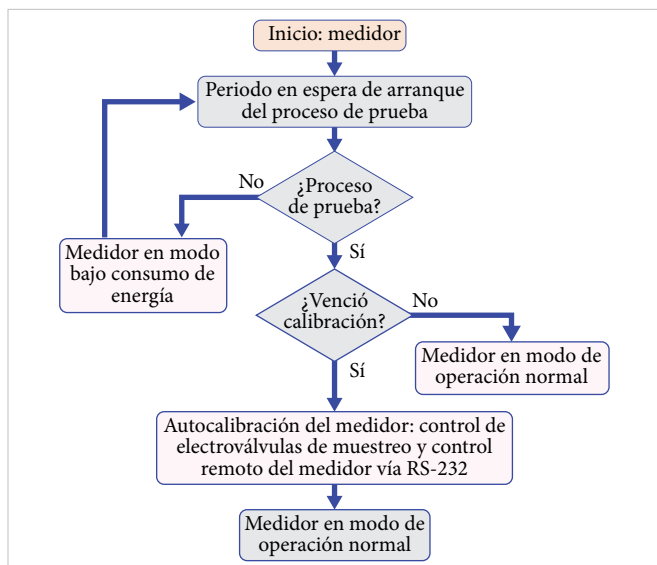


Figura 9. Control de auto calibración del medidor propuesto.

#### D. MONITOREO DE INSUMOS

El consumo de tanques de gas para las diferentes concentraciones de CO y metano, junto con sus estándares de calibración correspondientes, constituye información crítica para gestionar de manera eficiente el uso diario, semanal o mensual y realizar proyecciones de consumo. Con este propósito, se desarrolló una interfaz gráfica en el entorno LabWindows/CVI de NI para el monitoreo remoto de los tanques de gas.

El sistema administra los datos mediante una base de datos centralizada, habilitada para enviar alertas y notificaciones por correo electrónico sobre el comportamiento, garantizando así una supervisión continua y oportuna. La Figura 10 muestra el esquema general del sistema, conformado por una computadora, un adquirente de datos USB-1208FS-PLUS y la lectura analógica de 4-20 mA proveniente de sensores de presión (OMEGA: DPG1000DAR-3KG-1N) instalados en cada tanque según el tipo de gas.

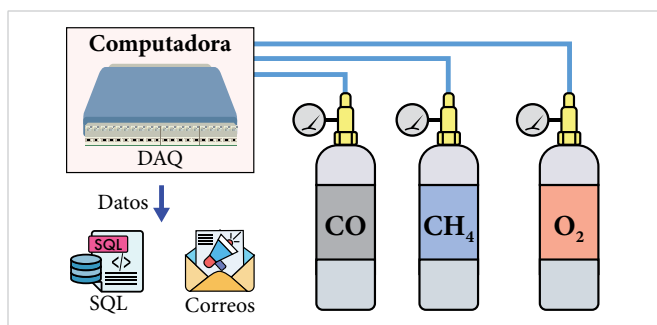


Figura 10. Monitoreo de insumos vía hardware/software.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en esta investigación son de carácter cuantitativo, ya que se basan en la comparación de datos experimentales registrados antes y después de la implementación de los controles en el equipo de prueba. Este análisis permite evaluar la reducción del consumo de energía eléctrica y de otros recursos, al tiempo que se garantiza la continuidad y la rentabilidad del proceso productivo.

La Tabla 2 presenta el desempeño del equipo de prueba en un entorno de producción real, considerando una jornada laboral típica de 7:00 a 16:30 horas. Dichos resultados constituyen la base para analizar el impacto de las estrategias propuestas en la eficiencia energética y en la sostenibilidad operativa del sistema.

TABLA 2  
TIEMPO DISPONIBLE

DESCRIPCIÓN	TIEMPO
Jornada laboral	9,5 h
Proceso de prueba	16 min
Carga y descarga de unidades bajo prueba	7 min
Descanso: desayuno y comida	50 min

De acuerdo con el tiempo efectivo de operación del equipo, y considerando la eliminación de los periodos de descanso, se dispone de un total de 520 minutos productivos por jornada. Bajo estas condiciones, el sistema puede ejecutar hasta 22 ciclos completos de prueba, lo que permite dimensionar su desempeño en un entorno real de manufactura. La Figura 11 muestra la implementación de temporizadores mediante software que controlan automáticamente el consumo de energía.



Figura 11. Control energético vía software.

El primero controla el encendido y el apagado de las fuentes de alimentación tras 10 minutos de inactividad, mientras que el segundo gestiona el apagado total de la computadora tras 1 hora de inactividad. Estos mecanismos se desarrollaron con base en la metodología descrita en la sección anterior y constituyen una estrategia clave para optimizar el uso de los recursos del sistema de prueba.

Los resultados de la implementación de los controles se obtuvieron a partir de mediciones realizadas de forma aleatoria en distintos días a lo largo de un mes completo (20 días hábiles). Posteriormente, los datos fueron ponderados, observándose una tendencia consistente en los patrones de uso del equipo. La [Tabla 3](#) presenta un esquema comparativo de los tiempos de operación, contrastando el desempeño del sistema en su funcionamiento convencional —sin controles de eficiencia energética— con el del sistema mejorado mediante la estrategia propuesta.

TABLA 3  
COMPARACIÓN DE TIEMPOS DE OPERACIÓN

OPERACIÓN	TIEMPO DE OPERACIÓN (min)	
	SISTEMA NORMAL	SISTEMA MEJORADO
Consumo energía normal	570	361
Bajo consumo de energía	0	178
Apagado de fuentes	0	30
Ahorro total	0	0

Los resultados muestran una reducción del consumo energético en diferentes modos de operación, es decir, en la operación normal, del 36 %, atribuida a la implementación de los controles de eficiencia. De este total, un 31 % corresponde al funcionamiento en modo de bajo consumo de las tarjetas de prueba, mientras que el 5 % restante se asocia al apagado selectivo de las fuentes de alimentación. La [Figura 12](#) presenta un gráfico comparativo de los modos de operación, lo que ilustra la distribución del consumo en cada estado.

Es importante señalar que el control de apagado de las fuentes de alimentación se activa tras 10 minutos de inactividad del equipo. Asimismo, aunque en la [Tabla 3](#) no se registra el modo de ahorro total de consumo energético, durante el estudio se identificaron cuatro ocurrencias en distintos días hábiles en las que este modo sí se activó. Dichos casos corresponden a jornadas en las que el equipo no se utilizó nuevamente, lo que permitió activar el control de apagado total, resultando particu-

larmente útil para gestionar periodos de inactividad entre jornadas laborales.

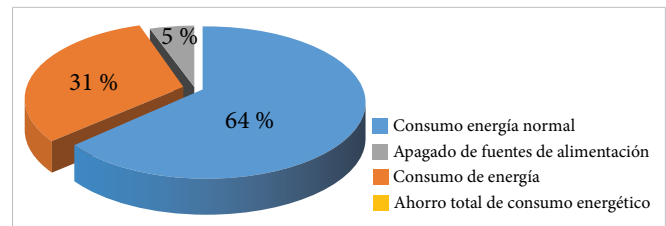


Figura 12. Distribución del tiempo entre los diferentes modos de operación del equipo.

Por otra parte, la [Tabla 4](#) presenta las mediciones del consumo eléctrico en cada modo de operación del equipo de prueba, realizadas directamente en la red eléctrica mediante un amperímetro de gancho Fluke-325. Estos resultados permiten cuantificar con precisión la eficiencia alcanzada en cada estado operativo.

TABLA 4  
CONSUMO ELÉCTRICO

OPERACIÓN	CORRIENTE ELÉCTRICA (A)
Operación normal del equipo	2.1
Bajo consumo de energía	0.7
Apagado de fuentes de alimentación	0.4
Ahorro total de consumo energético	0

Con base en la Ecuación (1) y considerando un voltaje de alimentación de 110 VAC, se calculó la potencia activa del equipo a partir de las mediciones de consumo eléctrico obtenidas en los distintos modos de operación, tal como se reporta en la [Tabla 3](#). Este cálculo permite establecer una relación directa entre el estado operativo del sistema y la energía demandada, proporcionando un indicador objetivo de la eficiencia alcanzada. La [Tabla 5](#) representa el consumo energético por cada modo de operación,

$$P = VI \tag{1}$$

TABLA 5  
CONSUMO ENERGÉTICO

OPERACIÓN	CORRIENTE ELÉCTRICO (kW)
Operación normal del equipo	0.231
Bajo consumo de energía	0.077
Apagado de fuentes de alimentación	0.044
Ahorro total de consumo energético	0

La [Tabla 6](#) presenta el consumo energético correspondiente a una jornada laboral de 9.5 horas, calculado a partir de los datos obtenidos en los diferentes modos de operación reportados en las [Tablas 3](#) y [5](#). Estos resultados evidencian una reducción total del consumo energético de hasta un 25 %, lo que confirma la efectividad de los controles implementados.

TABLA 6  
COMPARACIÓN DE TIEMPOS DE OPERACIÓN

OPERACIÓN	CONSUMO ENERGÉTICO (kWh)	
	SISTEMA NORMAL	SISTEMA MEJORADO
Consumo energía normal	2.1945	1.3898
Bajo consumo de energía	-	0.2284
Apagado de fuentes	-	0.022
Ahorro total	-	0
Total	2.1945	1.6402

En cuanto al proceso de calibración del instrumento de medición, constituye un aspecto crítico, ya que garantiza mediciones de referencia confiables.

Previo a esta investigación, la calibración se realizaba manualmente por personal técnico de mantenimiento, mediante la activación mecánica de válvulas para el muestreo de gases estándar. Aunque funcional, esta solución presentaba limitaciones, pues tanto el tiempo de muestreo como el flujo de cada tipo de gas dependían del criterio del técnico y de la decisión manual sobre cuándo calibrar, lo que generaba ineficiencia en la gestión de recursos.

Con el sistema propuesto, el control del proceso de autocalibración del medidor se ejecuta de forma automatizada desde la computadora, activándose únicamente al inicio de un proceso de prueba y con base en la fecha y la hora de la última calibración. Esta estrategia permite visualizar el vencimiento de la calibración del instrumento, como se ilustra en la [Figura 13](#), y asegura un uso más eficiente de los insumos.

La [Figura 14](#) muestra el hilo de programación independiente desarrollado en esta investigación, encargado de establecer la comunicación entre la computadora, la tarjeta de control y el medidor para ejecutar el proceso de calibración. Al operar en paralelo al sistema principal de prueba, se permite que las rutinas de autocalibración se ejecuten sin interferir en el funcionamiento normal del equipo.

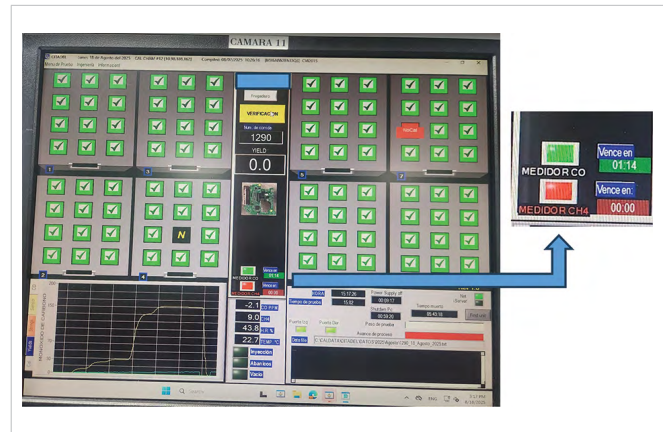


Figura 13. Calibración del medidor.

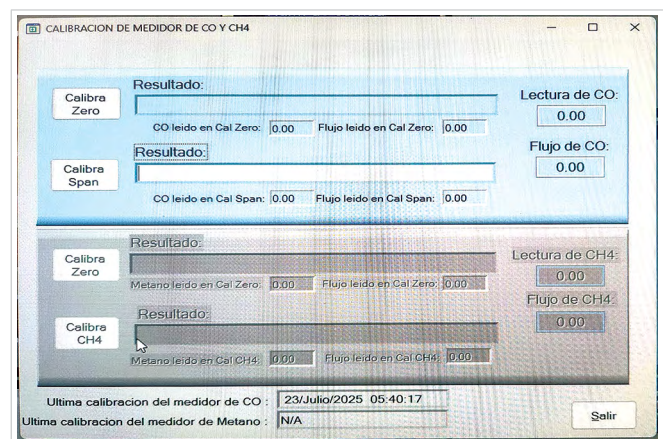


Figura 14. Control del proceso de autocalibración del medidor.

En este esquema, la computadora actúa como nodo maestro que envía las instrucciones de calibración, la tarjeta de control actúa como intermediaria en la gestión de señales y protocolos de comunicación, y el medidor recibe los comandos a través del protocolo ModBus RS-232 y ejecuta las acciones necesarias para la calibración, como la activación de electroválvulas y la selección del gas de referencia. El proceso puede iniciarse de forma automática o semiautomática, lo que ofrece flexibilidad al usuario y asegura la trazabilidad de cada ciclo.

Entre los beneficios obtenidos destaca una reducción mensual del 8.7 % al 10 % en el consumo de tanques de gas (CO y CH<sub>4</sub>), lo que contribuye al ahorro de recursos y a la disminución del impacto ambiental, dado que los gases de calibración se liberan parcialmente durante el proceso. La automatización de los tiempos de muestreo, la selección del estándar y el control de válvulas permiten reducir la variabilidad humana y asegurar la calidad metrológica.

Finalmente, tras la implementación de los controles de energía y la optimización del proceso de calibración, se desarrolló un sistema de monitoreo remoto de tanques utilizando el entorno LabWindows/CVI de NI junto con el hardware correspondiente. La [Figura 15](#) muestra el programa implementado en la computadora de supervisión, en el que es posible visualizar gráficamente la tendencia de consumo de cada gas, registrar el historial de uso y acceder a reportes configurables por periodo (diario, semanal o mensual). Esta interfaz también permite al usuario interactuar con el sistema, consultar datos almacenados en la base de datos SQL y generar respaldos automáticos para asegurar la trazabilidad de la información.



Figura 15. Monitoreo y gestión de insumos.

Por su parte, la [Figura 16](#) muestra físicamente el área de control de tanques, compuesta por los sensores de presión conectados a los cilindros de CO y CH<sub>4</sub>, el adquisidor de datos y la infraestructura de comunicación que conecta los registros con la estación de monitoreo.



Figura 16. Zona de tanques.

Este módulo no solo permite medir en tiempo real los niveles de gas en cada tanque, sino que también incorpora rutinas de alarma que envían notificaciones automáticas por correo electrónico al personal responsable cuando se detecta un cambio en el tanque o una condición crítica de presión. Gracias a estas funciones, el sistema habilita estrategias de mantenimiento predictivo, asegura la continuidad operativa y facilita la reposición oportuna de insumos, contribuyendo de manera significativa a la eficiencia y sostenibilidad del proceso productivo.

## IV. CONCLUSIONES

El sistema de control propuesto para el equipo de prueba eléctrica demostró ser una alternativa eficaz para incrementar la eficiencia operativa y reducir el consumo de recursos en la industria electrónica. La integración de hardware y software permitió gestionar de forma autónoma las tarjetas electrónicas, las fuentes de alimentación y la computadora central, logrando una reducción del 25 % en el consumo energético durante la operación normal y la eliminación total del consumo durante periodos prolongados de inactividad.

Asimismo, el control inteligente de insumos permitió una disminución de entre 8.7 % y 10 % en el uso de gases de calibración (CO y CH<sub>4</sub>), contribuyendo no solo a la reducción de costos, sino también a la mitigación del impacto ambiental asociado a su liberación.

El desarrollo de rutinas de autocalibración y el monitoreo remoto de tanques de gas representaron avances relevantes en la automatización y la trazabilidad de los procesos, asegurando una mayor confiabilidad en las mediciones y una gestión eficiente de los recursos.

Si bien los resultados obtenidos son alentadores, aún existen áreas susceptibles de optimización, en particular en la automatización del proceso de calibración y en el manejo integral de los insumos. En este sentido, se recomienda profundizar en la integración de tecnologías emergentes, tales como algoritmos de inteligencia artificial, sistemas de monitoreo inalámbrico o arquitecturas IoT, con el propósito de ampliar la aplicabilidad de la propuesta a otros tipos de equipos industriales y de consolidar un equilibrio sostenible entre desempeño, eficiencia energética y ahorro de recursos.

## REFERENCIAS

- [1] K. Madden, *Eco-efficiency Learning Module*. WBCSD - Five Winds Int., 2006. [En línea]. Disponible: <https://docs.wbcsd.org/2006/08/EfficiencyLearningModule.pdf>
- [2] R. G. Gusmão, R. de Freitas, L. Veiga, O. Gonçalves y W. Leal, “Towards sustainable development through the perspective of eco-efficiency - A systematic literature review”, *J. Clean. Prod.*, vol. 165, pp. 890-904, 2017, doi: [10.1016/j.jclepro.2017.07.166](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.166).
- [3] K. Salonitis, “Manufacturing Energy Efficiency and Industry 4.0”, *Energies*, vol. 16, n.º 5, p. 2268, feb. 2023, doi: [10.3390/en16052268](https://doi.org/10.3390/en16052268).
- [4] IMIP, “Catálogo-directorio de empresas manufactureras”, Instituto Municipal de Investigación y Planeación, Ciudad Juárez, Chih., México. Accedido: ag. 15, 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.imip.org.mx/directorio/Infografias.pdf>
- [5] N. Petkov y M. Ivanova, “Printed circuit board and printed circuit board assembly methods for testing and visual inspection: A review”, *Bull. Electr. Eng. Inform.*, vol. 13, n.º 4, pp. 2566-2585, 2024, doi: [10.11591/eei.v13i4.7601](https://doi.org/10.11591/eei.v13i4.7601).
- [6] A. Buckroyd, *In-Circuit Testing*, Oxford, Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 2015.
- [7] First Alert Products, “First Alert”. [firstalert.com](http://firstalert.com). Accedido: ag. 15, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.firstalert.com/>
- [8] J. E. Monagas, A. Sarmiento y A. Vega, “Low-cost programmable modular system to perform in-circuit test (ICT): Full development of the hardware, software, and mechanics of an ICT machine”, en *Proceedings of the 2016 Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE)*, pp. 1-7, 2016, doi: [10.1109/TAEE.2016.7528359](https://doi.org/10.1109/TAEE.2016.7528359).