



**UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE MORENO**

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS APLICADAS Y TECNOLOGÍA

“SISTEMA DE CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE CONCENTRACIÓN DE CO₂”

Director: BIERZYCHUDEK, Marcos

Co Director: BORGATELLO, José María

Integrantes: LOPEZ, Rubén; AGUIRRE, Francisco

Año: 2026



**UNM 2010
UNIVERSIDAD
DEL BICENTENARIO
ARGENTINO**

Informe Final de Proyectos de Investigación (PI) Universidad Nacional de Moreno

Identificación del proyecto

Tipo de proyecto y año de convocatoria:	PI 2024
Nombre completo del proyecto:	Sistema de calibración de medidores de concentración de CO ₂
Director/a:	Marcos E. Bierzychudek
Lineamiento estratégico: ¹	Electrónica y desarrollo tecnológico, Electrónica aplicada
Fecha de inicio:	20 de febrero de 2025
Fecha de finalización:	20 de abril de 2026
Unidad de localización: Departamento/Centro/ Programa	Centro de Investigación e Innovación Tecnológica – Laboratorio de Electrónica
Resumen:	La determinación de dióxido de carbono (CO₂) es fundamental en distintas áreas de la industria, la salud y la ciencia, por ejemplo para el monitoreo de emisiones industriales, para aplicaciones científicas y para la determinación de la calidad de aire en ambientes cerrados. Este monitoreo se puede realizar por medio de sistemas basados en Internet de las Cosas (IoT) que permiten tomar un dato, registrarlo y presentarlo amigablemente. El usuario puede tomar decisiones consistentes basadas en dichos registros para lo cual se requiere garantizar la calidad de las mediciones calibrando los sensores de CO₂. La calibración es una operación que determina la relación entre la indicación del instrumento bajo estudio y el valor de los patrones utilizados en el proceso en condiciones específicas, documentando el error y calculando la incertidumbre de la medición. El intervalo de tiempo entre calibraciones difiere según la tecnología de cada instrumento. Este proyecto busca desarrollar un sistema de calibración de sensores de CO₂. Se estudiarán distintas opciones para la calibración de sensores, se diseñará el sistema y se estudiarán los componentes a utilizar. El sistema podrá generar distintas concentraciones de CO₂ de manera automática para luego comparar la indicación del instrumento de referencia y el objeto bajo estudio. Se incluye en el trabajo la lectura de la pantalla del instrumento de referencia mediante reconocimiento de caracteres.
Palabras claves:	Automatización, calibración, metrología 4.0, reconocimiento de caracteres, sensores de CO ₂ .

¹ Según Resolución UNM- CS 848/21 Lineamientos estratégicos de Investigación y Desarrollo Tecnológico 2022-2027.

Parte I

Informe de resultados para el repositorio²

1. Introducción y objetivos

El monitoro precisa del dióxido de carbono es un pilar fundamental en ámbitos que van desde la seguridad industrial y los estudios medioambientales hasta la gestión de la calidad del aire interior. En este último, la concentración de CO₂ se ha consolidado como el indicador de referencia para evaluar la eficacia de la ventilación en espacios ocupados. Cuando la ventilación es deficiente, la falta de renovación de aire provoca una acumulación de los bioefluentes emitidos por los ocupantes (como humedad, partículas y compuestos orgánicos volátiles). De forma paralela, el CO₂ exhalado también se concentra, sirviendo como un indicador medible de esta mala calidad del aire. Esta falta de dilución por ventilación es la que incrementa el riesgo de transmisión de patógenos, un hecho que cobró relevancia global crítica durante la pandemia de COVID-19. Esta nueva conciencia ha provocado una masificación sin precedentes en la instalación de medidores de CO₂, muchos de ellos basados en tecnología de bajo costo, como los sensores Infrarrojos No Dispersivos (NDIR por sus siglas en inglés Non-Dispersive Infrared). Si bien esta proliferación es positiva, introduce un desafío metrológico significativo: la deriva (drift) del sensor con el tiempo y factores ambientales hacen que estos sensores pierdan su exactitud, comprometiendo la fiabilidad de sus mediciones. Por lo tanto, surge la necesidad de desarrollar sistemas que automaticen el proceso de calibración. Se requieren soluciones que permitan verificar y ajustar los instrumentos in-situ o en bancos de prueba de alta capacidad, de forma rápida, repetible y con una mínima intervención humana. Este proyecto se enmarca en respuesta a dicho desafío, buscando garantizar la fiabilidad metrológica en la era de la monitorización masiva. Se plantea como problema central la inexistencia de un sistema automatizado de bajo costo y arquitectura abierta que integre el control neumático de los gases, la homogeneización de la atmósfera, la adquisición digital del patrón y el registro sincronizado de datos en una sola plataforma, eliminando los errores humanos y garantizando un proceso de calibración rápido, preciso y reproducible. Esto permite que los procesos de calibración sean más accesibles, poniendo a disposición de instituciones educativas, laboratorios de desarrollo y pequeñas industrias una capacidad metrológica hasta ahora reservada a laboratorios de alto costo.

El objetivo general del trabajo es desarrollar un sistema de referencia automatizado para la calibración de medidores de dióxido de carbono capaz de generar concentraciones controladas del gas y comparar las lecturas de los sensores bajo prueba con un instrumento patrón, garantizando la precisión, trazabilidad y confiabilidad de las mediciones. Los objetivos específicos son:

1. Construir e instrumentar una cámara de calibración hermética, integrando un sistema neumático de mezcla de gases, sensores internos para establecer un lazo de control y registrar condiciones ambientales, e interfaces herméticas.
2. Desarrollar el firmware del ESP32 Servidor para la adquisición de datos de los sensores internos, la comunicación con PC y la ejecución de comandos básicos.
3. Desarrollar el firmware del ESP32 Cliente para controlar un lazo de realimentación de la concentración de CO₂ interna, y la comunicación con PC.
4. Diseñar e implementar una Interfaz Humano-Máquina (HMI) en Python para la supervisión y adquisición de datos.
5. Implementar un módulo de visión artificial mediante Reconocimiento Óptico de Caracteres (OCR por sus siglas en inglés Optical Character Recognition) como parte de la HMI, para la adquisición automática de las mediciones del display del instrumento patrón Vaisala GM70.
6. Caracterizar y validar el desempeño dinámico del sistema de referencia automático. Esto implica la ejecución de ensayos experimentales para determinar los parámetros clave del sistema:
 - a. Tiempos de respuesta y estabilización mediante pruebas de inyección de CO₂.

b. Precisión y estabilidad en el seguimiento de consignas con valor específico, mediante pruebas de respuesta escalón.

El alcance del proyecto abarca la construcción y la validación de un prototipo mecatrónico completo para la calibración de sensores de CO₂ en un rango de 0 a 2000 ppm, en una cámara de volumen de 20 litros, y con un instrumento de referencia con incertidumbre igual a 1,5 % del rango + 2 % de la lectura, que equivale a 70 ppm para la concentración de 2000 ppm.

2. Marco de referencia

La pandemia de COVID-19 ha generado una creciente conciencia sobre la importancia de la calidad del aire interior en la prevención de la propagación de enfermedades respiratorias. El monitoreo del dióxido de carbono en interiores ha emergido como una herramienta valiosa para evaluar la calidad del aire y la efectividad de la ventilación. El CO₂ es un subproducto común de la respiración humana o de procesos industriales, y su concentración en el aire interior puede indicar la presencia de aire estancado y la necesidad de una mejor ventilación. Por lo tanto, la medición del CO₂ proporciona una indicación indirecta la calidad del aire en un ambiente cerrado. Para los diversos contextos habitables se puede utilizar como referencia el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios del gobierno de España que clasifica la calidad del aire interior mínima del establecimiento según una tabla predefinida. Así, con un sistema de ventilación adecuado se logra minimizar la posibilidad de padecer el síndrome del edificio enfermo, que definido por la OMS es el conjunto de enfermedades originadas o estimuladas por la contaminación del aire en estos espacios cerrados. Así por ejemplo, un nivel de 350 ppm (partes por millón) de CO₂ en el ambiente implica aire de óptima calidad, pero un nivel de 1200 ppm de CO₂ implica aire de baja calidad.

La metrología, o ciencia de las mediciones, constituye la base para garantizar la confiabilidad y comparabilidad de los resultados experimentales. En el ámbito de la calibración de gases, es fundamental que las mediciones estén referidas a patrones para asegurar su validez. Tres conceptos son centrales en este proceso: la calibración es el proceso que determina la relación entre los valores indicados por un instrumento —el sensor bajo estudio o dispositivo bajo prueba— y los valores proporcionados por un patrón de referencia bajo condiciones controladas; la trazabilidad garantiza una cadena ininterrumpida y documentada de comparaciones que vincula la medición final con patrones nacionales o internacionales, como los del NIST, del CENAM o del INTI; y la incertidumbre de medida es la cuantificación de la duda sobre el valor obtenido.

En el mercado actual existe una gran variedad de sensores e instrumentos de medición de concentración de CO₂ diseñados para uso industrial, científico o privado. Durante la calibración, el dispositivo bajo estudio (DUT por sus siglas en inglés) se expone a una concentración conocida de CO₂. La diferencia entre la indicación del DUT y el valor de la concentración conocida es el error de medición, que puede ser utilizado para ajustar la indicación del dispositivo. El desafío es lograr dicha concentración con valor conocido durante un período de tiempo suficiente para realizar el proceso de calibración.

Formalmente, cualquier corrimiento sistemático o aleatorio del cual no se conozca su valor exacto actúa como una fuente de incertidumbre, por lo que un resultado de medición completo siempre debe expresarse con su incertidumbre y sus unidades correspondientes, representando un intervalo de posibles valores típicamente centrado en el valor medido y limitado por la incertidumbre. Las calibraciones de los sensores deben ser trazables al Sistema Internacional de Unidades (SI) para garantizar su validez y coherencia entre distintos instrumentos. En la metrología de gases, esta trazabilidad se logra implementando un método de calibración por comparación directa bajo condiciones ambientales controladas. Este proceso se puede reproducir comparando el instrumento directamente contra una atmósfera de concentración conocida mediante uno o varios instrumentos de referencia calibrados, o bien generándola mediante materiales de referencia certificados (MRC), como gases patrón.

El desafío central radica en la calibración masiva y periódica de sensores de bajo costo, cuya deriva (drift) o corrimiento temporal es su principal debilidad. El estado del arte actual para mitigar esta deriva se enfoca principalmente en métodos alternativos, como algoritmos de software o rutinas de autocalibración. Sin embargo, estos enfoques —que no deben confundirse con la calibración metrológica formal contra patrones o MRC— a menudo carecen de la trazabilidad y la robustez que requiere una solución integral. Actualmente existen cuatro estrategias principales para llevar a cabo la calibración y el posterior ajuste de estos dispositivos. La forma más sencilla de calibrar un medidor de CO₂ es exponerlo a aire fresco, así el sensor se calibra a una concentración de 400 ppm de CO₂ que es el promedio acordado internacionalmente para el aire exterior. Este método puede ser aplicado de manera automática, por ejemplo si un instrumento se ubica en espacio con alta ocupación en horario laboral, sus algoritmos pueden emplear los valores mínimos detectados en horas de inactividad, asumiendo que su valor es 400 ppm, para reajustar la línea base. Sin embargo, este método aplica solo cuando no se requiere una alta exactitud ni trazabilidad en las mediciones y cuando se buscan medir valores no mayores a 1000 ppm. Otro método posible es la generación de ambientes controlados en cámaras herméticas mediante medios físicos, por ejemplo caudalímetros calibrados para inyectar volúmenes conocidos de CO₂. Este método permite la trazabilidad al SI, pero requiere gases ultrapuros y una infraestructura neumática importante. La calibración mediante gases de referencia, opción operativamente sencilla y de alta exactitud, utiliza materiales de referencia fabricados según la norma ISO 17034. Por ejemplo, el NIST produce estos materiales con incertidumbres menores a 0,5%. Este es el mejor método para lograr la trazabilidad en la calibración, sin embargo, el costo de cada cilindro es mayor a US\$ 2000. Por lo tanto, este método es aplicable solo para la calibración de los instrumentos más exactos que luego son utilizados como instrumentos de trabajo para calibrar otros sensores. Además, su aplicación masiva resulta inviable por el elevado costo económico de los cilindros y por la limitación en la cantidad de puntos a calibrar. Por último, los instrumentos de menor jerarquía metrológica pueden ser calibrados en comparación directa con otro con menor incertidumbre. Así el instrumento de referencia se ubica en el mismo ambiente y se comparan las lecturas de ambos instrumentos, la cual ofrece el mejor equilibrio entre costo y flexibilidad para realizar diversos ensayos. Por ejemplo, el instrumento Vaisala GM70 es recomendado por su fabricante para calibrar los medidores que se instalan de manera fija en habitaciones o laboratorios reduciendo costos y tiempos. También los fabricantes de instrumentos ofrecen kits de calibración conformado por dos cilindros con gases de referencia y un accesorio para inyectar el gas al DUT. El kit permite determinar el error de medición en dos puntos del rango del instrumento para determinar así una curva de ajuste.

Los sensores económicos que se utilizan en IoT para la determinación de CO₂ se basan en distintas tecnologías, siendo la tecnología predominante el método Infrarrojo No Dispersivo (NDIR). Su principio de funcionamiento se basa en la Ley de Beer-Lambert, donde una fuente de radiación infrarroja atraviesa la muestra de gas y un fotodetector mide la atenuación de la luz en la longitud de onda específica donde el CO₂ absorbe energía (aproximadamente a 4,26 μm). A mayor concentración de CO₂, mayor es la absorción. La ventaja de los sensores NDIR es su alta selectividad y su larga vida útil; no obstante, presentan dos desventajas clave que hacen obligatoria su recalibración periódica: la deriva a largo plazo provocada por el envejecimiento de la fuente luminosa o del detector, y su sensibilidad a las variaciones de temperatura y presión del gas medido.

Existen distintas normativas relevantes al momento de calibrar un sensor de CO₂, la más importante es la norma ISO/IEC 17025. La misma especifica los requisitos generales para la competencia de laboratorios de ensayo y calibración. Es especialmente relevante para laboratorios que realizan calibración de equipos de medición, ya que establece los criterios para garantizar la precisión y la fiabilidad de los resultados de las calibraciones.

3. Métodos y técnicas

La estrategia metodológica adoptada para el desarrollo y la validación del sistema de calibración automatizado de medidores de concentración de CO₂ se estructuró a partir de una aproximación

experimental de laboratorio y documental. El trabajo combinó el diseño mecatrónico, la instrumentación electrónica, el desarrollo de firmware en sistemas embebidos, la programación de interfaces en software de alto nivel y la implementación de técnicas de visión artificial. Toda la metodología se orientó a resolver la problemática central planteada sobre la construcción de un sistema para caracterizar la deriva temporal de los sensores de gases de bajo costo, y disponer de una infraestructura de calibración confiable, accesible y reproducible.

El trabajo de laboratorio se llevó a cabo en las instalaciones del Centro de Investigación e Innovación Tecnológica, específicamente en el Laboratorio de Electrónica de la Universidad Nacional de Moreno. En este espacio controlado se realizaron las tareas de ensamblaje mecatrónico, integración de hardware y pruebas experimentales de caracterización y validación. La recolección de datos se ejecutó de forma directa mediante la generación de atmósferas controladas dentro de un recinto de ensayo construido en el marco del proyecto. Las mediciones se realizaron mediante dispositivos telemétricos de variables ambientales y de proceso del sistema, las lecturas del instrumento de referencia y los datos emitidos por las unidades o sensores bajo estudio.

De manera complementaria, el trabajo documental proporcionó una base normativa y conceptual indispensable para garantizar la validez metrológica. La búsqueda y análisis documental se nutrió de fuentes especializadas, incluyendo manuales técnicos de fabricantes de instrumentación analítica, hojas de datos de componentes electrónicos y sensores de CO₂ NDIR, normativas internacionales de gestión de la calidad en laboratorios como la ISO/IEC 17025, procedimientos estandarizados de calibración de analizadores de gases y guías de cálculo de incertidumbre de medición. Estas fuentes documentales permitieron fijar las especificaciones operativas, la selección de materiales, los criterios de diseño de la cámara y la estructura de la cadena de trazabilidad metrológica al SI.

En lo referente a las unidades de análisis, la investigación definió tres elementos centrales de estudio dentro de la cadena metrológica. La primera unidad de análisis estuvo constituida por el sistema de calibración en su conjunto como objeto mecatrónico, evaluando su comportamiento dinámico, hermeticidad, estabilidad de concentración y tiempo de respuesta ante cambios de consigna. La segunda unidad de análisis la conformaron los sensores de dióxido de carbono basados en tecnología Infrarroja No Dispersiva (NDIR), los cuales representan la tipología de medidores de bajo costo ampliamente masificada para el monitoreo de la calidad del aire interior e Internet de las Cosas (IoT). La tercera unidad de análisis estuvo constituida por el instrumento patrón de referencia y su interfaz de visualización, analizando la fidelidad en la captura de su señal e indicación.

El sistema de calibración propuesto se basa en la comparación de dos instrumentos que, aunque comparten el principio NDIR, poseen clases de exactitud y arquitecturas diferentes. El patrón de referencia es el sistema modular Vaisala GM70, compuesto por la sonda NDIR de precisión GMP222 (que se introduce en la cámara hermética mediante una interfaz M12) y la unidad de indicación portátil MI-70. El sistema GM70 posee trazabilidad metrológica a INTI y actúa como la referencia del ensayo. El hardware de control y adquisición del sistema se implementa sobre una arquitectura de sistemas embebidos distribuida basada en el microcontrolador ESP32 DevKit V1, seleccionado por su capacidad de procesamiento, bajo costo y conectividad integrada. Esta conectividad se explota mediante Bluetooth Low Energy (BLE) para la comunicación inalámbrica entre la unidad interna (ESP32 Servidor) y la externa (ESP32 Cliente), lo que elimina la necesidad de pasacables herméticos complejos, y mediante comunicación serial UART como enlace simple y robusto entre el ESP32 Cliente y la PC Host para la transmisión de comandos y recepción de telemetría. El núcleo de supervisión y centralización de datos reside en la PC Host y está desarrollado en Python. Para la Interfaz Humano-Máquina (HMI) se seleccionó la biblioteca nativa Tkinter, permitiendo el desarrollo de un panel de control y visualización gráfica en tiempo real intuitivo y modular. La innovación clave del software radica en la adquisición de datos del patrón: dado que la unidad MI-70 no ofrece una interfaz de datos digital accesible, se implementó un módulo de visión artificial mediante Reconocimiento Óptico de Caracteres (OCR) utilizando la biblioteca Tesseract. De este modo, el software "lee" el display del patrón a través de una cámara web, digitalizando su valor de forma no invasiva para habilitar la comparación automática y el registro sincronizado en formato CSV. Debido a que el motor de OCR es sensible a factores como la

iluminación ambiente, los reflejos o el brillo de la pantalla, el software incorpora además un módulo de validación lógica para filtrar lecturas no confiables y asegurar la integridad de los datos del patrón antes de su almacenamiento. El subsistema físico consistió en la construcción e instrumentación de una cámara de calibración hermética con un volumen de 20 litros. La cámara incorporó un lazo de mezcla y circulación neumática dotado de electroválvulas para el control del flujo de gas, así como interfaces pasantes herméticas para permitir el ingreso de la sonda patrón mediante un conector M12 y el cableado de alimentación y señal de los sensores bajo prueba sin comprometer la estanqueidad del recinto. Dentro de la cámara se integraron sensores internos para registrar variables ambientales críticas como la temperatura y la humedad relativa, además de la concentración de dióxido de carbono interna.

La recolección de datos experimentales se efectuó mediante ensayos de respuesta dinámica y seguimiento de consignas en el rango de 0 a 2000 ppm. Durante las pruebas, el sistema automatizado ejecutó inyecciones controladas de gas para alcanzar valores escalón prefijados. La frecuencia de muestreo de las variables internas y de los valores digitalizados del patrón se sincronizó mediante el software central, consolidando la información de cada punto de ensayo en archivos de texto estructurado en formato de valores separados por comas (CSV). Este registro sincronizado permitió asociar temporalmente la respuesta de la unidad bajo prueba con la indicación del patrón de referencia. Los archivos CSV generados por la HMI se sometieron a algoritmos de filtrado para eliminar posibles valores atípicos o errores de lectura remanentes del sistema OCR. Una vez consolidadas las series temporales, se realizó el análisis dinámico del sistema para caracterizar su comportamiento funcional. Este análisis incluyó la determinación de los tiempos de respuesta y de estabilización del gas en el volumen de 20 litros tras las inyecciones neumáticas, así como la evaluación de la precisión y estabilidad del lazo de control en el seguimiento de las concentraciones de consigna. También se realizó la comparación directa entre los valores indicados por los sensores bajo ensayo, un sensor MH-Z19C, y los valores reportados por el patrón Vaisala GM70 en cada nivel de concentración estable. Se determinó el error sistemático de medición de las unidades bajo prueba como la diferencia entre la lectura del sensor y la indicación patrón. De acuerdo con las pautas de las guías de incertidumbre y la normativa metrológica aplicable, se procedió al análisis de las fuentes de incertidumbre asociadas al proceso de calibración. Se consideraron en el modelo de evaluación la incertidumbre propia del instrumento patrón de referencia, la resolución de los dispositivos en evaluación y la repetibilidad de las mediciones obtenidas. Este tratamiento de datos permitió cuantificar la duda asociada al proceso de calibración y validar la capacidad técnica del prototipo mecatrónico desarrollado como una plataforma automatizada, precisa y trazable para la caracterización de sensores de gases en el ámbito de la metrología aplicada.

4. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo y puesta en marcha del proyecto permitieron alcanzar satisfactoriamente el objetivo general de construir un sistema de referencia automatizado para la calibración de medidores de dióxido de carbono, logrando la generación controlada de concentraciones del gas en el rango de 0 a 2000 ppm dentro de una cámara hermética de 20 litros y la comparación de un instrumento bajo estudio con un instrumento patrón trazable. En relación con el primer objetivo específico, la construcción e instrumentación de la cámara hermética demostró un desempeño mecánico y neumático adecuado, logrando una estanqueidad que impidió la fuga del gas o la contaminación con el aire exterior durante los ensayos. La integración del sensor de CO₂ permitió verificar la estabilidad de la concentración de CO₂ dentro del recinto. La homogeneización de la mezcla de dióxido de carbono y aire en el volumen de la cámara se logró en tiempos acotados mediante el circuito de circulación, garantizando una distribución uniforme del gas en torno a las sondas de medición.

En lo concerniente al desarrollo del firmware para los microcontroladores ESP32, la arquitectura implementada cumplió plenamente las metas fijadas para el segundo y tercer objetivo específico. El ESP32 Servidor adquirió y transmitió de manera continua y sin pérdidas los datos de los sensores internos de la cámara a través del enlace inalámbrico Bluetooth Low Energy (BLE). Esta solución inalámbrica demostró ser una alternativa tecnológica robusta que simplificó de manera drástica el diseño mecánico de la cámara al reducir la cantidad de conectores pasacables, preservando la hermeticidad del

recinto. Por su parte, el ESP32 Cliente ejecutó eficazmente el lazo de realimentación para la inyección de gas y la gestión de las electroválvulas, respondiendo a los comandos enviados desde la computadora central mediante la interfaz serial UART de manera estable.

El desarrollo de la Interfaz Humano-Máquina en Python cumplió con el cuarto y quinto objetivo específico al consolidar en una única plataforma accesible la supervisión, el control del lazo neumático y el registro temporizado de las variables. El hito tecnológico destacable fue la implementación exitosa del módulo de visión artificial basado en Reconocimiento Óptico de Caracteres (OCR) mediante la herramienta Tesseract para la adquisición automática de las lecturas del equipo Vaisala GM70. La integración de la cámara web apuntada al display de la unidad de indicación portátil MI-70 permitió digitalizar las mediciones del patrón en tiempo real sin requerir modificaciones electrónicas ni invasión física del equipo de referencia. El módulo de validación lógica incorporado en el código en Python logró filtrar eficazmente los errores de lectura esporádicos causados por reflejos o variaciones sutiles en la iluminación del laboratorio, garantizando una digitalización confiable y continua de la indicación patrón que luego se almacenó de forma sincronizada con los datos de los sensores bajo prueba en archivos de formato CSV.

Respecto al sexto objetivo específico, la caracterización y validación del desempeño dinámico del sistema permitió evaluar el comportamiento del prototipo ante perturbaciones y cambios de consigna. Los ensayos experimentales de respuesta escalón a diferentes Set Points demostraron que el sistema alcanza y estabiliza las concentraciones de CO₂ objetivo de manera repetible, permitiendo establecer mesetas de concentración constante para llevar a cabo la comparación directa. La determinación de los tiempos de respuesta y estabilización evidenció la viabilidad operativa de realizar barridos de calibración multipunto en tiempos sensiblemente menores a los requeridos por los métodos manuales tradicionales.

En relación con los nuevos conocimientos obtenidos sobre los casos o unidades bajo estudio, los ensayos realizados aportaron información empírica sumamente valiosa para el grupo de trabajo sobre el comportamiento de los sensores de dióxido de carbono de bajo costo basados en tecnología NDIR. Se observó que, si bien la tecnología NDIR ofrece una selectividad alta para la molécula de CO₂, los sensores económicos carecen de exactitud, lo que provoca desvíos sistemáticos considerables respecto a la lectura del patrón trazable Vaisala GM70. Asimismo, las pruebas evidenciaron que las rutinas de autocalibración por software o de nivel cero automatizado que incorporan comercialmente estos dispositivos de bajo costo no reemplazan en absoluto a una calibración metrológica formal, ya que no se evalúan los errores de ganancia del sensor.

En materia de avances en el conocimiento científico y la formulación de enfoques originales, esta investigación aporta un sistema de calibración enmarcado en los principios de la Metrología 4.0, demostrando la factibilidad de digitalizar instrumentos de referencia mediante técnicas de visión artificial de bajo costo. La combinación de OCR con algoritmos de validación lógica para la adquisición de patrones de alta jerarquía constituye una innovación metodológica replicable en otros laboratorios de ensayo y calibración que no disponen de equipamiento de última generación con salidas de datos digitales nativas o protocolos de comunicación abiertos. Además, la arquitectura de control distribuida mediante microcontroladores de bajo costo interconectados por BLE introduce un enfoque de diseño mecatrónico simplificado para la instrumentación de cámaras de atmósfera controlada, eliminando barreras complejas de estanqueidad y reduciendo significativamente los costos de desarrollo de sistemas de calibración en metrología de gases.

Las contribuciones para la resolución de problemas específicos y la formulación de herramientas de intervención se traducen directamente en la creación de un equipo de prueba funcional que democratiza el acceso a la calibración de medidores de dióxido de carbono. En el contexto posterior a la pandemia de COVID-19, donde el monitoreo de la calidad del aire interior se ha vuelto indispensable para mitigar riesgos de transmisión de patógenos en escuelas, oficinas y edificios públicos, la proliferación masiva de medidores de bajo costo sin verificar representa un riesgo para la salud pública debido a la falsa sensación de seguridad que generan las mediciones no confiables. El sistema desarrollado proporciona una herramienta concreta, accesible y de bajo costo para que institutos educativos, laboratorios regionales de desarrollo y pequeñas industrias puedan verificar, ajustar y calibrar sus redes de sensores

de IoT de manera rápida y reproducible, asegurando la trazabilidad de sus mediciones hacia patrones internacionales sin necesidad de recurrir a costosas infraestructuras de calibración basadas exclusivamente en cilindros de gases de referencia certificados de elevado valor comercial.

Las conclusiones de la investigación permiten afirmar que se han cumplido íntegramente los objetivos planteados y se ha dado respuesta satisfactoria al problema de investigación central. La falta de sistemas de calibración automatizados, accesibles y de arquitectura abierta para sensores de CO₂ ha sido resuelta. El trabajo ha demostrado que es perfectamente viable construir plataformas metrológicas combinando instrumentación de referencia trazable con hardware abierto, firmware en sistemas embebidos y software libre en Python.

Como reflexiones finales, este proyecto resalta el papel estratégico que desempeña la metrología aplicada y la instrumentación electrónica en la garantía de la fiabilidad de las tecnologías emergentes de Internet de las Cosas. La masificación de sensores inteligentes sólo proporcionará un valor real a la sociedad y a la toma de decisiones si la calidad de los datos recolectados está respaldada por procesos de calibración continuos, automatizados y metrológicamente rigurosos. La experiencia acumulada y la plataforma desarrollada en el Laboratorio de Electrónica del CIEIT sientan una base sólida para ampliar estas capacidades hacia la metrología de otros gases de interés ambiental e industrial, consolidando una línea de trabajo innovadora y de alto impacto tecnológico que vincula la investigación universitaria con las necesidades concretas del entorno productivo y social.

5. Nuevos interrogantes y líneas de investigación a futuro

El proyecto ha generado una base para enfrentar nuevos desafíos en la metrología y sensores de gases. Esta línea de trabajo despierta un gran interés tanto en la comunidad internacional como en socios locales con potencial para aplicar estos desarrollos en productos y servicios comerciales. Asimismo, se complementa con las actividades de otros grupos de investigación de la UNM en Machine Learning y gestión ambiental, lo que pone de manifiesto un área de trabajo sumamente prometedora para continuar profundizando. Esto derivó en la presentación de un proyecto FITBA en el año 2026, dedicado al estudio y modelado de sensores de gases en aire de bajo costo. A futuro, este marco permite abordar nuevas líneas de investigación, tales como la calibración de sensores de bajo costo para distintos gases, el desarrollo de dispositivos IoT para monitoreo ambiental, y el diseño y fabricación de la electrónica asociada.

6. Bibliografía

- [1] Gas Sensor Calibration, CO₂ Meter. Accedido: 19 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.co2meter.com/blogs/news/gas-sensor-calibration>
- [2] CO₂ sensor calibration, Edaphic Scientific. Accedido: 19 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://edaphic.com.au/co2-sensor-calibration/>
- [3] Vaisala, GM70 Handheld Carbon Dioxide Meter Datasheet. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://docs.vaisala.com/v/u/B210824EN-G/en-US>
- [4] CO₂ Sensor Calibration Kit. [En línea]. Disponible en: <https://www.cochranesupply.com/media/assets/product/documents/BAPI/BACO2-KIT.pdf>
- [5] Carbon Dioxide Measurements and Reference Materials, NIST, Accedido: 19 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.nist.gov/programs-projects/carbon-dioxide-measurements-and-reference-materials>
- [6] Metrología, procedimiento de calibración, Procedimiento QU-007 para calibración de analizadores de dióxido de carbono (CO₂), Edición digital 1.
- [7] Why is measuring CO₂ important?, Juhani Lehto, Product Manager for high-end product, oct 24, 2018
- [8] Carbon Dioxide Measurements and Reference Materials, National Institute of Standards and Technology.
- [9] CO₂ Sensor Calibration: What You Need to Know, CO₂ Meter Gas Measurement Specialist .