

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN MONITOR DE CO_2 PARA LA CALIDAD DEL AIRE DE INTERIORES Y VENTILACIÓN, COMPATIBLE CON TRES SENSORES, CON INTEGRACIÓN IOT, AUTOPRUEBA Y AUTODIAGNÓSTICO

*DESIGN, BUILDING AND CHARACTERIZATION OF A
 CO_2 MONITOR FOR INDOOR AIR QUALITY AND VENTILATION,
TRI-SENSOR COMPATIBLE, WITH IOT INTEGRATION, SELF-
TESTING, AND SELF-DIAGNOSIS*

Guillermo Ramírez Zúñiga

Universidad Tecnológica Emiliano Zapata Del Estado de Morelos, México
guillermoramirez@utez.edu.mx

Guillermo Barrios del Valle

Universidad Nacional Autónoma de México, México
gbv@ier.unam.mx

Guadalupe Huelsz Lesbros

Universidad Nacional Autónoma de México, México
ghl@ier.unam.mx

Héctor Daniel Cortés González

Universidad Nacional Autónoma de México, México
hdcg@ier.unam.mx

Recepción: 26/noviembre/2024

Aceptación: 24/abril/2025

Resumen

Se presenta un monitor de CO_2 para evaluar la calidad del aire interior y la ventilación, compatible con tres sensores de CO_2 , lo que permite adaptarse según la disponibilidad de componentes en situaciones como la pandemia COVID-19. El monitor de CO_2 está integrado a IoT, con autodiagnóstico. Cuenta con alarmas visuales y audibles para diferentes niveles de CO_2 . El diseño del circuito electrónico y su carcasa garantizan una producción y ensamblaje que se puede llevar a cabo en cualquier laboratorio de electrónica. El modo de configuración permite a los usuarios configurar el acceso a Internet y la conectividad IoT. Al iniciar, el monitor

realiza una prueba de autodiagnóstico para la resolución de problemas. Experimentos controlados validaron la precisión y fiabilidad del monitor. Pruebas en un aula demostró su practicidad y efectividad para identificar zonas mal ventiladas. Toda la información para recrear el monitor se encuentra en un repositorio público.

Palabras Clave: Dióxido de carbono, ESP8266, IoT, NDIR, Ventilación.

Abstract

A CO₂ monitor to evaluate indoor air quality and ventilation is presented. The monitor is compatible with three CO₂ sensors, is low-cost, and easy to manufacture. It has IoT integration, self-test, and self-diagnostic capabilities. Additionally, it includes visual and audible alarms for different CO₂ levels. The design of the electronic circuit and casing ensures easy production and assembly. An IoT-enabled NodeMCU board facilitates remote monitoring and data storage through ThingsBoard. The configuration mode allows users to set up Internet access and IoT connectivity. Upon startup, the monitor performs a software test for the buzzer and RGB LED and provides diagnostic messages for troubleshooting. Controlled experiments validated the monitor's accuracy and reliability. A pilot study in a classroom demonstrated its practicality and effectiveness, highlighting the importance of adequate ventilation. All information to replicate the CO₂ monitor is in a public repository.

Keywords: Carbon dioxide, ESP8266, IoT, NDIR, Ventilation.

1. Introducción

Incluso después de que finalizó la declaración de emergencia sanitaria mundial por SARS-CoV-2 [World Health Organization, 2023], la ventilación adecuada sigue siendo un tema importante para la salud. La concentración en partes por millón (*ppm*) de dióxido de carbono (CO₂) en un espacio ocupado puede servir como un indicador de la ventilación dado que la respiración humana emite CO₂ [ASTM International, 2012], [International WELL Building Institute, 2021]. Las investigaciones indican que los espacios con ventilación adecuada y niveles de CO₂ iguales o inferiores a 600 *ppm* no solo pueden mejorar el rendimiento cognitivo

[Wang, 2017], [Satish, 2012], sino también mitigar el riesgo de transmisión de enfermedades aéreas, incluyendo COVID-19 [Tham, 2016], [Bhagat, 2020], [Lednicky, 2020], [Peng, 2020], [Shah, 2021].

La accesibilidad al monitoreo de la calidad del aire interior se ha facilitado con la aparición de microcontroladores y sensores de CO_2 NDIR asequibles.

Trabajos previos, han reportado el diseño de un dispositivo de CO_2 de bajo costo para entornos de oficina y laboratorio, logrando una precisión de medición dentro de ± 32 ppm, similar a la de los dispositivos de estándar industrial [Thomas, 2019]. Este dispositivo, aunque simple, con un sensor NDIR y conectividad WiFi a ThingSpeak para la recopilación de datos, carecía de una pantalla.

Actualmente, existen numerosos proyectos similares disponibles en línea y en revistas. Algunos, a pesar de ofrecer detalles exhaustivos, carecen de pruebas prácticas o evidencia de aplicación en el mundo real y de su adecuada calibración, se han realizado esfuerzos para crear monitores de CO_2 asequibles para aplicaciones en campo (uso en condiciones reales), con un PCB resistente y calibrados para medir concentraciones de CO_2 entre 500 y 5000 ppm [Courchesne, 2023].

Los diseños de monitores actuales de CO_2 vienen con conectividad IoT, sistemas de semáforo, pantallas, alarmas audibles e incluso integración con redes LoRa, eliminando la dependencia de redes existentes, pero requiriendo configuraciones avanzadas [Toschke, 2022]. Cabe destacar que estos monitores suelen estar diseñados con un solo sensor NDIR de CO_2 .

En este contexto, presentamos un monitor de CO_2 diseñado para evaluar la ventilación en áreas ocupadas, de fácil fabricación usando software y hardware libre, equipado con alarmas, con un diseño de PCB compatible con tres sensores, firmware diseñado para conectarse a una plataforma IoT y diagnóstico de fallas más comunes mediante códigos numéricos. Además, toda la información (piezas, material, esquemáticos, PCB, programas e instrucciones detalladas) para replicar el monitor de CO_2 se encuentra disponible en el repositorio: https://github.com/lata-mas/Monitor_co2_pistas_educativas.

2. Métodos

Para construir el monitor de CO_2 se siguió la siguiente metodología:

- Definir características del monitor.
- Seleccionar tres sensores de CO_2 que puedan usarse en el monitor de CO_2 .
- Desarrollar el firmware para el funcionamiento del monitor con las características deseadas.
- Diseñar el PCB.
- Documentar y liberar con licencia MIT en el repositorio: https://github.com/lata-mas/Monitor_co2_pistas_educativas toda la información para ensamblar el monitor de CO_2 .
- Realizar pruebas piloto en aula.

Desde el inicio se pensó en diseñar un monitor que fuera compatible con tres sensores CO_2 , previendo falta de disponibilidad en alguno de los sensores seleccionados durante eventos como la pandemia COVID-19.

Características de diseño para el monitor de CO_2

- Bajo costo y accesibilidad en el MCU seleccionado.
- Error máximo de 50 *ppm* en rango de 400 a 1000 *ppm* de CO_2 .
- Pantalla para indicar niveles de CO_2 .
- Alertas audibles y visuales para ubicar los valores de CO_2 en tres rangos.
- Configurado para ser conectado a una plataforma IoT si se desea.
- Pruebas de autodiagnóstico y detección de errores.
- Modo de sensor ficticio para realizar pruebas de armado.
- Documentado completamente bajo licencia GNU 3 para ser reproducido y modificado.

Se seleccionó la placa de desarrollo NodeMCU Lolin V3 basada en el ESP8266 que cuenta con los suficientes pines, conexión WiFi y compatibilidad con Arduino IDE. Se seleccionaron los sensores NDIR SEN0220, SCD30 y S8LP, por sus

especificaciones ($error < 50 ppm$) y su disponibilidad en México. El SEN0220 se comunica mediante UART y el SCD30 y el S8LP por I2C. Como pantalla se seleccionó un display de 7 segmentos de 4 dígitos. Para la alarma audible y visual se seleccionó un buzzer y un LED RGB, respectivamente.

El firmware del monitor se programó en Arduino IDE y cuenta con pruebas de autodiagnóstico por software y detección de errores. En el firmware también se implementó un modo de sensor ficticio para probar el monitor armado aun cuando no se cuente con el sensor seleccionado. Además, el firmware cuenta con un modo de configuración para registrar el token del dispositivo dado de alta en la plataforma IoT y la red inalámbrica para conexión a internet.

El monitor mide el CO_2 cada cuatro segundos y calcula el promedio móvil de un minuto que se mostrará en una pantalla de 7 segmentos y se publicará en una plataforma IoT cada minuto. La alarma visual es un LED RGB que cambia de color de acuerdo con el valor en que se encuentra el nivel de CO_2 medido. La alarma sonora es un buzzer que se activa de acuerdo con el valor de ppm de CO_2 . Se definieron tres zonas de concentración de CO_2 y el siguiente comportamiento de las alarmas visual y sonora:

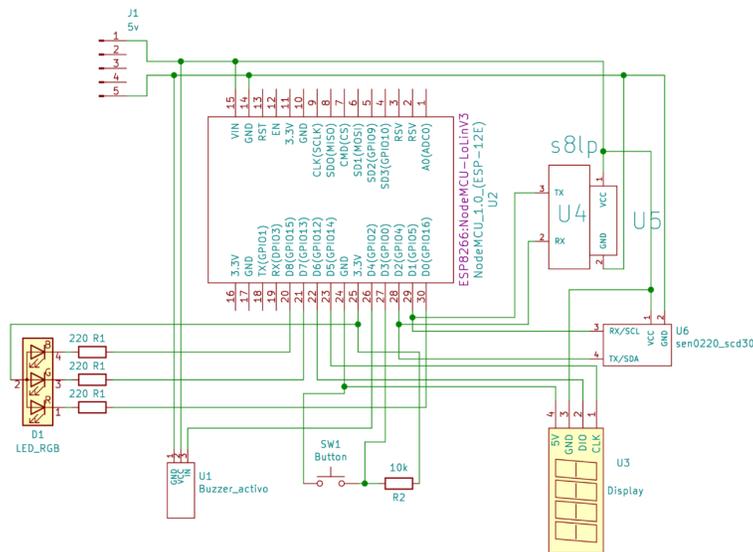
- Zona 1 ($CO_2 \leq 600 ppm$): El LED RGB emite una luz verde, sin alarma audible. El espacio es seguro.
- Zona 2 ($600 ppm < CO_2 \leq 700 ppm$): El LED RGB emite una luz amarilla, y la alarma sonora emite dos pulsos audibles cada 20 segundos. Se recomienda tomar acciones que propicien la ventilación.
- Zona 3 ($CO_2 > 700 ppm$): El LED RGB emite una luz roja, y la alarma sonora emite tres pulsos audibles cada 20 segundos. Se recomienda evacuar el espacio para disminuir la posibilidad de contagiarse por medio de aerosoles.

La alarma audible podrá desactivarse temporalmente presionando el botón durante 20 segundos después del pitido y se reactivará una vez que los niveles de CO_2 vuelven a la Zona 1, asegurando alertas renovadas si las concentraciones aumentan. Finalmente, se documentó el diseño electrónico y CAD del monitor de CO_2 en un repositorio de GitHub (<https://github.com/lata->

mas/Monitor_co2_pistas_educativas) con licencia GNU General Public License v3.0.

Esquemático y PCB

En el esquemático, presentado en la Figura 1, se muestra el sensor SEN0220 (I2C) y el sensor S8LP (UART) por ser protocolos de comunicación diferentes, pero solo se usa un sensor a la vez por monitor. Se diseñó un PCB a doble cara y una carcasa lo más sencilla posible que permite la adecuada ventilación. Finalmente, se creó y documentó un repositorio de acceso libre en GitHub donde se pueden encontrar todo el material necesario para replicarlo y una licencia GNU 3, ubicado en https://github.com/lata-mas/Monitor_co2_pistas_educativas [Barrios, 2022].

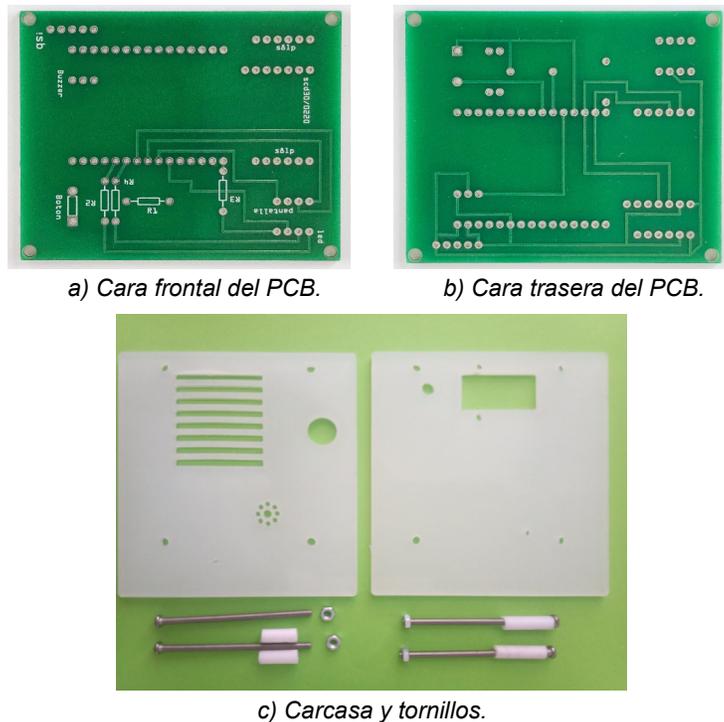


Fuente: elaboración propia

Figura 1 Diagrama de conexiones para el Monitor de CO_2 .

En la Figura 2 se muestra el PCB y la carcasa del monitor de CO_2 . La carcasa está compuesta por dos láminas rígidas con recortes para componentes como la pantalla. Estas láminas se mantienen unidas con cuatro tornillos cada uno acompañado por una tuerca y están separadas internamente por segmentos de una pajilla rígida cortada. En el repositorio [Barrios, 2022] se encuentra la lista de materiales con el nombre marcado en las caras del PCB, así como los pasos para

ensamblarlo. El firmware del monitor se encuentra en la carpeta “software”. El repositorio está autodocumentado y en él se encuentran los archivos CAD para maquinar con corte láser o una plantilla en PDF y los archivos fuente para ser modificados de ser necesario. La dirección del repositorio es https://github.com/lata-mas/Monitor_co2_pistas_educativas.



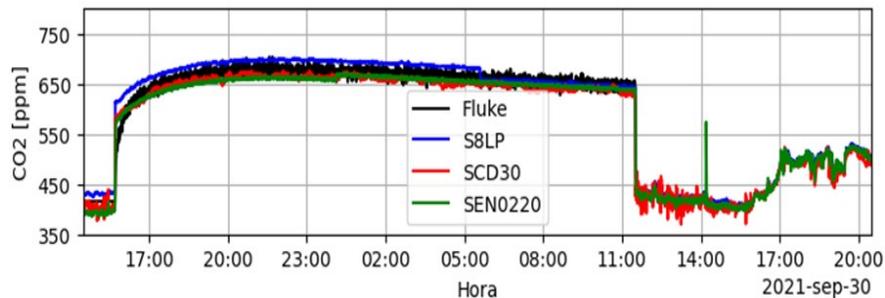
Fuente: elaboración propia

Figura 2 PCB y carcasa del monitor de CO_2 .

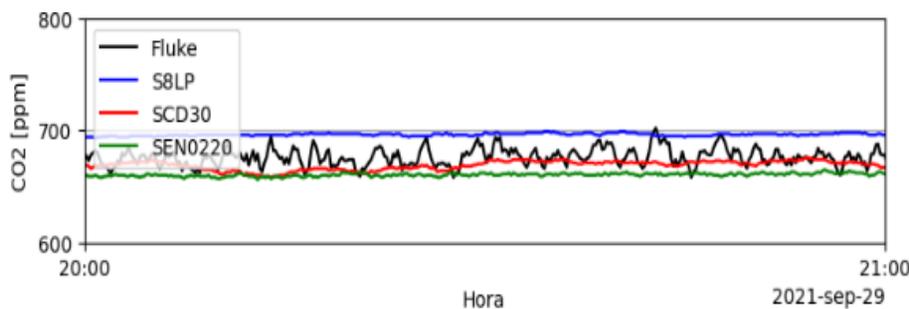
Caracterización de los sensores

Para revisar si los sensores tienen un $error \leq 50 \text{ ppm}$ se diseñó un experimento. En una caja hermética de acrílico se colocaron tres monitores, cada monitor con uno de los sensores seleccionados (S8LP, SCD30 y SEN0220), junto con un dispositivo de referencia, un Fluke 975 AirMeter. Se mezcló bicarbonato de sodio de grado farmacéutico y vinagre en diferentes proporciones dentro de la caja. Los monitores de CO_2 y el Fluke se programaron para registrar mediciones cada 20 segundos sin promediar y se activó el modo de autocalibración en cada uno de los tres sensores. Cada experimento duró aproximadamente 20 h, en la Figura 3a se

muestran los resultados de uno de los experimentos. Se extrajo un segmento de datos de 60 *min*, durante los cuales la concentración de CO_2 mantuvo un valor casi constante, Figura 3b.



a) Prueba de caracterización a 680 ppm con duración de 20 horas.



b) Periodo de extracción de datos para la caracterización.

Fuente: elaboración propia

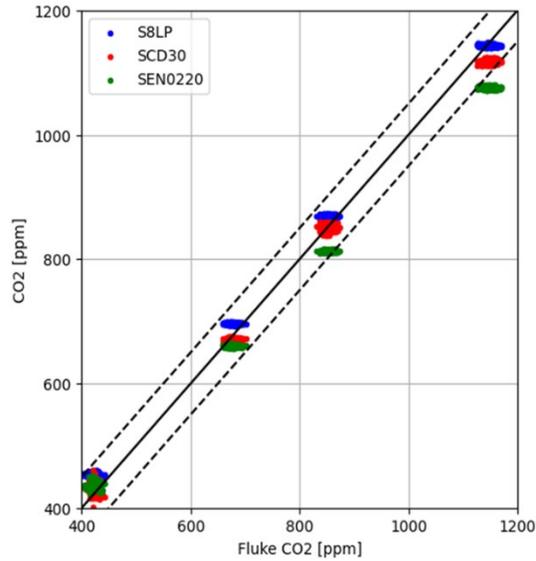
Figura 3 Caracterización de los monitores, identificados por su correspondiente sensor.

Se realizaron cuatro experimentos que cubrieron un rango de concentración de CO_2 desde 420 hasta 1,100 *ppm*. En la Figura 4 se muestra la comparación de las mediciones de los monitores, cada uno con diferente sensor. Las líneas discontinuas representan el margen de error de 50 *ppm*. Los resultados muestran que para concentraciones de CO_2 de hasta 850 *ppm* los tres sensores se mantuvieron dentro del rango de error deseado. A concentraciones cercanas a los 1100 *ppm* el SEN0220 tiene un error mayor a lo deseado.

3. Resultados

Se construyeron 40 *monitores* de CO_2 para su implementación en aulas, laboratorios y salas de reuniones del Instituto de Energías Renovables de la UNAM con el objetivo de proporcionar alertas en tiempo real sobre los niveles de CO_2

durante la pandemia de COVID y evaluar la eficiencia de la ventilación en espacios interiores de uso común.



Fuente: elaboración propia

Figura 4 Comparación de los sensores de CO_2 y el dispositivo de referencia, Fluke.

En la Figura 5 se muestra el dispositivo armado y en funcionamiento. Cada dispositivo se dio de alta en la plataforma IoT ThingsBoard para poder monitorearlo remotamente y almacenar los datos para futuros análisis.

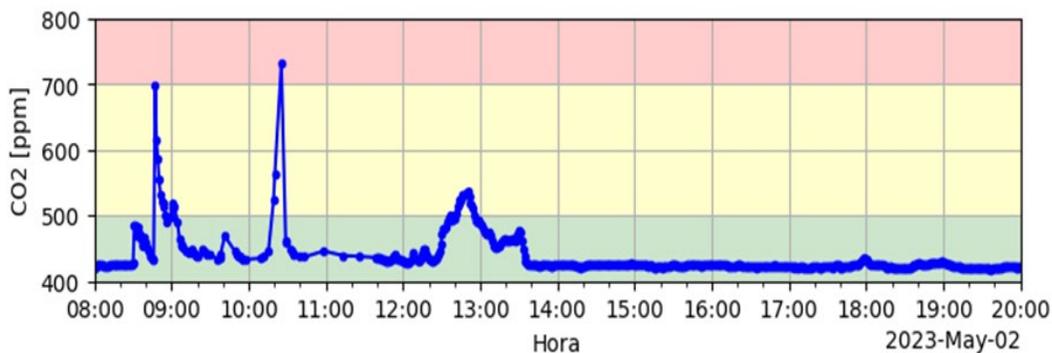
El 2 de mayo de 2023, se llevó a cabo una campaña de medición en un aula diseñada para una ocupación máxima de 25 *personas*, las mediciones de CO_2 durante esta campaña se muestran en la Figura 6.



Fuente: elaboración propia

Figura 5 Monitor de CO_2 en funcionamiento con una batería USB para energizarlo.

El monitor de CO_2 se colocó estratégicamente en el centro del aula, alimentado por una batería USB para asegurar movilidad y una recolección de datos ininterrumpida. De 8:00 a 9:50 horas, el monitor de CO_2 estuvo conectado a una fuente de alimentación para cargar su batería USB. Al desconectarse de la fuente de alimentación, se observó un aumento inicial en los niveles de CO_2 . Este aumento transitorio, que fue registrado por la plataforma IoT, es un comportamiento conocido asociado con el cambio de fuente de alimentación y se estabilizó poco después, como se muestra en la Figura 6.



Fuente: elaboración propia

Figura 6 Campaña controlada, medición de ventilación y ocupación en un aula.

La sesión en el aula comenzó a las 9:00 con una ocupación inicial de 10 personas y todas las ventanas abiertas. Para las 9:45, la ocupación había aumentado a 19 personas. Un breve receso de 9:58 a 10:06 resultó en una reducción de la ocupación. Para evaluar el impacto de la ventilación o la falta de ella en los niveles de CO_2 , a las 10:14 se cerraron todas las ventanas. Esta acción provocó un rápido aumento en la concentración de CO_2 , lo que llevó al sistema de alerta del monitor a cambiar de una luz verde a una roja. Siguiendo las recomendaciones de seguridad, los ocupantes evacuaron el aula. Al reabrir las ventanas, los niveles de CO_2 disminuyeron significativamente, pasando de un máximo de 720 ppm a 468 ppm en tan solo tres minutos. Después de las 11:00, la ocupación del aula no superó las cinco personas, y a pesar de la apertura y cierre periódico de ventanas, los niveles de CO_2 se mantuvieron por debajo del umbral de 600 ppm. En la Tabla 1 se presenta la bitácora de las condiciones durante la campaña de medición.

Tabla 1 Bitácora de la campaña de medición en un aula.

Hora	Estado de la ventana	CO ₂ [ppm]	Ocupantes	Observaciones
9:00	Abierta	518	10 personas	Inicio de clases
9:12	Abierta	444	15 personas	Calibración, aula abierta
9:45	Abierta	450	19 personas	Ventanas y puerta abiertas
9:58	Abierta	439	7 personas	Inicio de receso
10:06	Abierta	436	19 personas	Fin de receso
10:14	Cerrada	442	19 personas	Ventanas y puerta cerradas
10:21	Cerrada (verde)	617	19 personas	Aumento rápido del CO ₂
10:23	Cerrada	679	19 personas	Cambios del indicador visual
10:24	Cerrada (rojo)	720	19 personas	Se abren ventanas
10:25	Abierta (amarillo)	711	19 personas	Se abren ventanas
10:26	Abierta (verde)	468	19 personas	Cuatro personas presentando
11:04	Abierta	438	19 personas	Todos sentados
11:30	Abierta	439	0 personas	Desocupado
12:00	Abierta	431	5 personas	Una persona presentando
12:21	Abierta	432	5 personas	Una persona presentando
12:24	Cerrada	431	5 personas	Una persona presentando
12:33	Cerrada	485	5 personas	Una persona presentando
12:36	Cerrada	501	5 personas	Una persona presentando
12:44	Cerrada	524	5 personas	Una persona presentando
12:56	Cerrada	492	4 personas	Una persona presentando
13:03	Cerrada	474	4 personas	Una persona presentando
13:05	Cerrada	472	0 personas	Ventanas y puerta abiertas
13:11	Cerrada	452	5 personas	Ingreso al aula de clases
13:25	Cerrada	464	5 personas	Ventanas y puerta abiertas

Fuente: elaboración propia

Los resultados de esta campaña de medición resaltan la importancia de una ventilación adecuada, especialmente en espacios cerrados con ocupaciones fluctuantes. El mecanismo de retroalimentación en tiempo real del monitor de CO₂ ayudó a garantizar un entorno seguro, alertando a los ocupantes sobre posibles riesgos y fomentando intervenciones oportunas.

4. Discusión

Una vez ensamblado y configurado el monitor de CO₂, se observó que el dispositivo es práctico y ofrece una movilidad adecuada para los requerimientos de los usuarios del Instituto de Energías Renovables. Esto es posible gracias a la batería recargable incluida y la visualización de los niveles de CO₂. Además, las alarmas visuales y sonoras preconfiguradas alertan a los usuarios cuando es necesario ventilar (indicado por una luz amarilla o dos pitidos) o evacuar el espacio

(señalado por una luz roja y tres pitidos). Adicionalmente, el monitor permitió realizar un seguimiento en tiempo real de los niveles de CO_2 en los diferentes espacios del Instituto, gracias a la conexión de los dispositivos a la red wifi y la visualización de datos en la plataforma ThingsBoard. La alarma audible del monitor de CO_2 está diseñada especialmente para usuarios con discapacidad visual que podrían tener dificultades con el sistema de colores o la lectura de la pantalla, así como para aquellos usuarios que, debido a sus actividades, no puedan mirar directamente el monitor. Si se prefiere, el zumbador puede ser excluido o desmontado del diseño sin afectar las funciones del monitor. Los tres sensores seleccionados cuentan con un mecanismo de autocalibración que asume una exposición periódica al aire fresco (aproximadamente 400 ppm de CO_2) durante su operación. Para lograr una calibración adecuada, es necesario que los sensores estén expuestos al aire fresco de manera regular. Sin embargo, en entornos con concentraciones de CO_2 consistentemente elevadas, puede ser más apropiada una calibración manual, ya que la falta prolongada de exposición a niveles ambientales puede resultar en desviaciones de calibración. En cuanto al firmware, se han considerado varias funciones para facilitar el uso y el diagnóstico rápido del monitor de CO_2 ante problemas frecuentes. En caso de fallos, se mostrará uno de los siguientes códigos de error en su pantalla:

- F000: Imposible conectar al WiFi.
- E000: Falla en la medición del sensor de CO_2 .
- E001: Falla en la inicialización del sensor de CO_2 .
- E002: Falla en la modificación del intervalo de medición.
- E003: Falla en el comando de autocalibración.

Los mensajes de error E002 y E003 son exclusivos del sensor SCD30 y podrían aparecer durante su modo de autocalibración. Este modo puede ser activado en el código de Arduino mediante la función `InitSensor()`. Para más información sobre los componentes, esquemático, proceso de ensamblado del monitor de CO_2 , y programas que usa, puede dirigirse al siguiente repositorio de GitHub: https://github.com/lata-mas/Monitor_co2_pistas_educativas.

5. Conclusiones

La necesidad de una ventilación adecuada en espacios interiores, destacada por la pandemia global debido a enfermedades transmitidas por el aire como el COVID-19, subraya la importancia de monitorear la calidad del aire interior. Monitorear la concentración de CO_2 se convierte en un indicador para evaluar la ventilación. El monitor de CO_2 diseñado en este estudio se destaca como una herramienta en el monitoreo de la calidad de aire. Su diseño permite la compatibilidad con tres sensores distintos, ofreciendo flexibilidad y adaptabilidad según la disponibilidad local. Una característica agregada es la inclusión de pruebas de ensamblaje y un modo de configuración posterior al ensamblaje. Esto asegura que, incluso después de que el hardware haya sido ensamblado y el firmware cargado, las configuraciones se puedan ajustar sin problemas. Además, el dispositivo está equipado con mensajes de autodiagnóstico, lo que facilita la resolución de problemas. A medida que la comunidad de hardware y software libre siga expandiéndose, se vuelve esencial incorporar este tipo de características centradas en el usuario. El monitor de CO_2 es compatible con tres sensores de CO_2 diferentes e incorpora la placa económica NodeMCU, lo que lo hace viable de ser construido en cualquier laboratorio de electrónica. Su error, inferior a 50 ppm, junto con alertas auditivas y visuales, permite a quienes lo usan tomar acciones de ventilación oportunas. Las características del software proporcionan a los usuarios verificaciones de ensamblaje, mensajes de autodiagnóstico de errores y un modo de prueba de sensor ficticio. El firmware del dispositivo está listo para que el monitor de CO_2 se integre sin problemas con plataformas IoT como ThingsBoard para un monitoreo remoto continuo y se documenta todo lo necesario para replicar el monitor en un repositorio con licencia GNU 3 (https://github.com/lata-mas/Monitor_co2_pistas_educativas).

6. Bibliografía y Referencias

- [1] ASTM International. ASTM D6245-12, Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation, 2012.

- [2] Barrios, G., Ramírez, G., Huelsz, H., Cortés, H., (2022). Monitor_co2_pistas_educativas. https://github.com/lata-mas/Monitor_co2_pistas_educativas.
- [3] Bhagat, R.K., Davies-Wykes, M.S., Dalziel, S.B., and Linden, P.F. Effects of ventilation on the indoor spread of COVID-19. *Journal of Fluid Mechanics*, 903, 2020.
- [4] Courchesne, A., CO2.click, maker-edition CO2, 2023.
- [5] International WELL Building Institute, (2021). Air quality monitoring and feedback — WELL feature library. <http://https://standard.wellcertified.com/air/air-quality-monitoring-and-feedback>.
- [6] Lednicky, J.A., Lauzardo, M., Fan Z.H., Jutla A., Tilly, T.B., Gangwar, M., Usmani, M., Shankar, S.N., Mohamed, K., Eiguren-Fernandez, A., Stephenson, C.J., Alam, M., Elbadry, M.A., Loeb, J.C., Subramaniam, K., Waltzek, T.B., Cherabuddi, K., Morris, J.G. and Wu Ch.Y., (2020). Viable SARSCoV- 2 in the air of a hospital room with COVID-19 patients. medRxiv. <https://doi.org/10.1101/2020.08.03.20167395>.
- [7] Peng, Z. and Jimenez, J.L., (2020). Exhaled CO2 as COVID-19 infection risk proxy for different indoor environments and activities. medRxiv. <https://doi.org/10.1101/2020.09.09.20191676>.
- [8] Satish, U., Mendell, M.J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S., and Fisk, W.J. Is CO2 an indoor pollutant? direct effects of low-to-moderate CO2 concentrations on human decision-making performance. *Environmental Health Perspectives*, 120(12):1671–1677, 2012.
- [9] Shah, Y., Kurelek, J.W., Peterson, S.D., and Yarusevych, S. Experimental investigation of indoor aerosol dispersion and accumulation in the context of COVID-19: Effects of masks and ventilation. *Physics of Fluids*, 33(7), 2021.
- [10] Tham, K.W., Indoor air quality and its effects on humans—A review of challenges and developments in the last 30 years. *Energy and Buildings*, 130:637–650, 2016.

- [11] Thomas, D., Mistry, B., Snow, S., and Schraefel, M.C. Indoor air quality monitoring (IAQ): A low-cost alternative to CO₂ monitoring in comparison to an industry standard device. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 858:1010–1027, 2019.
- [12] Toschke, Y., Lusmoeller, J., Otte, Schmidt, L., J., Meyer, S., Tessmer, A., Brockmann, Ch., Ahuis, M., Hüer, E., Kirberger, Ch., and Berben D. Distributed LoRa based CO₂ monitoring network – A standalone open source system for contagion prevention by controlled ventilation. *HardwareX*, 11:e00261, 2022.
- [13] Wang, S.K., Chew, S.P., Jusoh, M.T., Khairunissa, A., Leong, K.Y., and Azid, A.A. WSN based indoor air quality monitoring in classrooms. volume 1808, 2017.
- [14] World Health Organization. Who director-general's opening remarks at the media briefing, 2023.