

Smart IoT Campus: Monitoreo de CO₂ en el edificio Docencia 1 de la UT de Tijuana

César Ortega-Corral, Florencio López-Cruz, María del Carmen Vargas-García

Universidad Tecnológica de Tijuana. Carretera libre Tijuana-Tecate Km. 10

Frac. El Refugio, Tijuana, B.C. 22253. México.

cesar.ortegac@uttijuana.edu.mx, florencio.lopez@uttijuana.edu.mx

Resumen

En este trabajo se presenta la medición de dióxido de carbono (CO₂) en el aire de un laboratorio de computación universitario. El monitoreo se lleva a cabo mediante un nodo inalámbrico de sensores, como parte del desarrollo de un ecosistema de dispositivos de Internet de las Cosas (IoT) en un edificio de la Universidad Tecnológica de Tijuana (UTT). El dispositivo de IoT, denominado Nodo Beta, está diseñado para adquirir y enviar datos a la nube a través del protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Estos datos incluyen información sobre las condiciones ambientales y la calidad del aire, y se hacen accesibles para los usuarios mediante tableros de IoT dentro del sistema Smart IoT Campus, desarrollado en la plataforma llamada Thingsboard. El objetivo principal de este trabajo es la medición continua de dióxido de carbono (CO₂), ya que estudios recientes han señalado que el CO₂ es un indicador crucial de la calidad del aire en espacios cerrados. La exposición a niveles elevados de dióxido de carbono provoca somnolencia y pérdida de atención. En el contexto postpandemia, el monitoreo de CO₂ también es esencial, ya que su acumulación en espacios mal ventilados está asociada con un mayor riesgo de transmisión de COVID-19.

Palabras clave— Dióxido de carbono, Internet de las cosas, MQTT.

Abstract

This work presents the measurement of carbon dioxide (CO₂) levels in the air of a university computer lab. Monitoring is done by a wireless sensor node, as part of an Internet of Things (IoT) ecosystem development within a building at the Universidad Tecnológica de Tijuana (UTT). The IoT device, named Nodo Beta, is designed to acquire and transmit data to the cloud via the MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) protocol. This data includes information about environmental and air quality conditions, accessible to users through IoT dashboards within the Smart IoT Campus system, using the ThingsBoard platform. Our primary objective is the continuous measurement of carbon dioxide (CO₂), as recent studies have indicated that CO₂ is a crucial indicator of air

quality in enclosed spaces. Exposure to high levels of CO₂ causes drowsiness and loss of attention. In the post-pandemic context, monitoring CO₂ is also essential, as its buildup in poorly ventilated spaces is associated with a higher risk of COVID-19 transmission.

Keywords— Carbon dioxide, Internet of Things, IoT, virtual dashboard

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto Smart IoT Campus, que se inició formalmente en 2022, se conceptualiza como un ecosistema heterogéneo de nodos de Internet de las Cosas (IoT) para la medición de condiciones ambientales, la calidad del aire, el uso de servicios y los accesos en espacios cerrados del edificio Docencia 1 de la Universidad Tecnológica de Tijuana [1]. Este edificio, al ser el primero construido en el campus, cuenta con una infraestructura tradicional caracterizada por muros gruesos de hormigón, lo que complica las modificaciones o adaptaciones necesarias para la automatización [2]. Implementar sistemas como persianas o cortinas automatizadas, por ejemplo, implicaría cambios significativos y costosos en la infraestructura existente [3]. En este contexto, la ventilación adecuada depende de la colaboración de los usuarios de los espacios, pero para ello es crucial que las personas sepan cuándo es necesario ventilar [4]. Por esta razón, se propone un sistema de nodos de IoT que realice el monitoreo continuo de las condiciones ambientales y emita alertas en tiempo real para guiar la toma de decisiones de ventilación [5]. Es válido cuestionar por qué no se mantienen los laboratorios constantemente ventilados. La razón principal radica en que dejar puertas y ventanas abiertas de forma permanente genera una acumulación excesiva de polvo, lo cual puede dañar los equipos de cómputo almacenados en estos espacios [6]. Este enfoque combina la necesidad de preservar los equipos con la importancia de garantizar un ambiente saludable para los usuarios.

En cuanto a CO₂, es un gas que se produce durante algunos procesos de combustión y cuando los animales respiran, los cuales consumen el oxígeno en el medio y exhalan CO₂ [7]. En la actualidad el CO₂ en el aire ha ido en aumento, y lo atribuyen a actividad volcánica [8] y a la industrialización [9]. Por otro lado, a partir de la pandemia del COVID-19, el CO₂ ha cobrado importancia, no solo porque produce somnolencia, sino porque ahora se considera un indicador indirecto del riesgo de contagio de enfermedades respiratorias debido a que el aire en espacios cerrados se ha respirado mucho por las personas presentes [10][11].

La regulación de la calidad del aire en espacios cerrados es un factor clave para la salud y el rendimiento de las personas.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, “Environmental Protection Agency”) recomienda que los niveles de CO₂ en interiores no superen las 1,000 ppm, ya que concentraciones más altas pueden provocar fatiga, reducción en la capacidad cognitiva y afectar el bienestar general [12]. Por su parte, en México, la Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008 establece un límite máximo permisible de 5,000 ppm de CO₂ en ambientes laborales, considerando que niveles superiores pueden representar riesgos para la salud ocupacional [13]. Sin embargo, estudios han demostrado que incluso valores por encima de 2,500 ppm pueden disminuir la concentración y el rendimiento en tareas cognitivas [14]. Esto enfatiza la importancia de contar con mecanismos de monitoreo continuo que permitan evaluar y mejorar la ventilación en espacios educativos y laborales.

2. PROBLEMÁTICA

En el uso de espacios públicos cerrados, como en una institución educativa, conlleva un riesgo de contagio por la simple proximidad de personas saludables con personas que quizás sufren de alguna enfermedad respiratoria contagiosa [15]. Por el momento no hay forma de determinar la presencia y concentración de patógenos de contagio en el aire, sólo un sensor que desarrollaron para detectar partículas virales de SARS-CoV-2 en el aire pero están lejos de comercializarlo [16]. Por lo que se ha sugerido que se puede hacer una estimación del riesgo de contagio a partir del conocimiento de qué tanto se ha respirado el aire en el entorno cerrado, y una forma indirecta es midiendo el CO₂ [17][18]. Las personas cuando respiran exhalan CO₂, lo que provoca un aumento progresivo en su concentración en el aire cuando no hay una ventilación adecuada [19].

Los efectos del CO₂ pueden clasificarse en fisiológicos, cognitivos y ambientales. A nivel fisiológico, una mayor concentración de CO₂ puede generar somnolencia, pérdida de atención, dificultad para concentrarse, mareos y dolores de cabeza, lo que impacta el bienestar y el rendimiento académico de los estudiantes. En casos extremos de intoxicación por CO₂, cuando la concentración supera las 5,000 ppm, una exposición prolongada puede causar daño cerebral a largo plazo y pérdida de conciencia. Además, diversos estudios han demostrado que la exposición continua a altos niveles de CO₂ afecta la función cognitiva, con efectos notables como:

1. Disminución de la atención y concentración.
2. Reducción en la capacidad de toma de decisiones.
3. Deterioro de la memoria a corto plazo.
4. Menor rendimiento en tareas de lógica y razonamiento.

Desde una perspectiva ambiental y tecnológica, el aumento de CO₂ en el aire eleva la temperatura, afectando tanto el

comfort de las personas como el desempeño de los equipos de cómputo en el laboratorio. En la Tabla 1 se muestran intervalos de partes por millón de CO₂ contra el nivel de riesgo a la salud de las personas que respiran dicho aire [20].

Tabla 1. Concentración de CO₂ en aire y niveles de riesgo a la salud.

ppm de CO ₂	CO ₂ : Nivel de riesgo
ppm < 1000	Normal
1000 < ppm < 2000	Bajo
2000 < ppm < 3000	Alto
3000 < ppm < 4000	Muy Alto (ventilar la habitación)
4000 < ppm	Extremadamente Alto (Abandonar la sala y ventilar)

2. METODOLOGÍA

En el 2024 se publicó en [21] sobre el inicio del ecosistema de IoT en el edificio llamado Docencia 1, de la UT Tijuana, y se trata de un edificio de 1998, donde en su diseño y construcción no se consideró incorporar canastillas para redes de datos, y dado que los muros de hormigón son gruesos implica un reto para las comunicaciones inalámbricas. Además, las paredes del pasillo principal están cubiertas por armarios de metal para los estudiantes, esto aumenta el bloqueo de comunicaciones inalámbricas. En pocas palabras, el edificio Docencia 1 es inadecuado para el uso de WiFi, por lo que la solución de la administración fue instalar puntos de acceso WiFi cada 10 metros a lo largo del pasillo. En la Fig 1 se muestra el croquis de la planta baja de Docencia 1, y en donde se indica con la letra C es la entrada del Laboratorio de Computo 1, el cual es el espacio cerrado bajo estudio.



Fig. 1. Plano de la planta baja del edificio Docencia 1, de la UT Tijuana.

Hay varios parámetros que afectan a la comunicación inalámbrica, varias fuentes de atenuación de señales electromagnéticas como lo son los muros gruesos de concreto colado, con estructura de vigas de acero, y una serie de armarios metálicos de los alumnos, dispuestos a los costados del pasillo, así como materiales metálicos reflectores como

parte de la estructura del plafón del techo interior de la planta baja. En la entrada del Laboratorio de Cómputo 1, se instaló el Nodo Beta de IoT con sensores que miden las variables ambientales, entre ellas está el bióxido de carbono (CO_2) en el aire, la variable de interés en este trabajo.

Dispositivo de IoT

En el centro del Nodo Beta se tiene el módulo ESP32 Dev Kit, de la empresa Espressif [22], el cual combina una unidad de proceso con 2 núcleos Tensilica LX6, operando con reloj de 80MHz hasta 240 MHz y 512 kilobytes SRAM, memoria FLASH integrada de 4 MB, 8 MB o 16 MB, todo en un solo chip. Además, el ESP32 dispone un transceptor de WiFi y otro transceptor Bluetooth, para conexiones LAN (del inglés “Local Area Network”) y PAN (“Personal Area Network”). El módulo también tiene a bordo el chip CP210x puente USB (“Universal Serial Bus”) a UART (“Universal Asynchronous Receiver Transceiver”). En la Fig. 2 se muestra a bloques el Nodo Beta y los sensores que inicialmente tiene conectados.

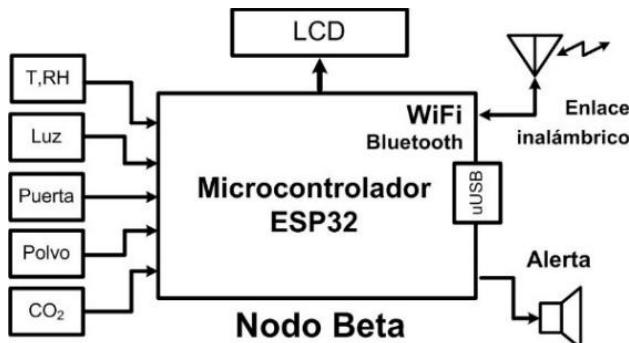


Fig. 2. Al Nodo Beta se le incorporan sensores de calidad del aire, cuyo enfoque aquí el de CO_2 .

La conexión inalámbrica del nodo de IoT se realiza mediante WiFi a 2.4GHz, accediendo a la red que proporciona entrada y salida de datos a Internet a través de un Gateway en la misma LAN (“Local Area Network”). Para el envío de datos, se utiliza un protocolo ligero de comunicaciones máquina a máquina llamado MQTT (“Message Queuing Telemetry Transport”), que está estandarizado para aplicaciones de IoT [23]. De esta forma, se envían mensajes al servicio en la nube, permitiendo mostrar los datos al usuario final. En este proyecto, se utiliza la plataforma Thingsboard Community, cuya explicación de uso se detallará más adelante.

El Nodo Beta mide las siguientes variables del entorno: temperatura, humedad relativa, nivel de luz en lámparas, polvo y CO_2 , así mismo se incluye el estado de la puerta, abierta o cerrada, cuyo cambio se detecta por eventos mediante un interruptor magnético. En la Tabla 2 se presentan los sensores usados, sus unidades de medida y tipo de conexión [24-28].

Tabla 2. Sensores empleados en los nodos de IoT.

Sensor	Unidad física	Tipo	Conexión
DHT22	°C Celsius % de HR	Digital	+5V, GND, Data
LDR5528	Intensidad luminosa	Analógico	ADC: +3.3V, GND en divisor de voltaje
MC-38	ON (cerrada) OFF (Abierta)	Digital	GPIO, Resistor a GND
PMS7003	ug/cm ³ de polvo	Serie	TX, RX, +5V, GND
mh-z19b	ppm de CO_2	Serie	TX, RX, +5V, GND

Con respecto al sensor que mide el CO_2 , se implementó el denominado MH-Z19B, que se muestra en la Fig. 3. La conexión de ambos sensores con el ESP32 se hace mediante comunicación serie a nivel TTL; lo cual se resolvió configurando en el ESP32 el puerto serie RX2/TX2 por hardware.



Fig. 3. Sensor de CO_2 conocido como el MH-Z19B .

Con respecto a la alimentación eléctrica, se optó por conexión emplear un convertidor AC/DC de 120V/12V, y dos en paralelo de 5 volts y 1 A máx., para obtener una corriente máxima de 2A. Con lo que se aprovechó el voltaje de +5V DC para energizar al ESP32 y a los sensores, excepto el sensor de luz dado que se alimentó con +3.3V DC obtenido del regulador a bordo del mismo módulo ESP32.

Mensaje de datos codificados en JSON

El software del Nodo Beta adquiere los valores de los sensores cada 30 segundos y crea un mensaje con los datos usando codificación JSON (*JavaScript Object Notation*), donde en su forma más simple, los datos se expresan entre llaves {} en pares tipo clave:valor (*key:value*), separados por comas [29]. Un ejemplo de un mensaje generado por el **Nodo Beta** cuyo número de nodo es 010002 es el siguiente:

```
{"n": "010002",
"ToC": 22, "RH": 56, "Lux": 1600, "state": 1,
"CO2": 2300, "dust": 30}
```

En el mensaje el valor de CO_2 están expresado en ppm de bióxido de carbono.

3. THINGSBOARD (TB): PLATAFORMA DE IoT

Para visualizar los datos generados por los nodos del Smart IoT Campus, se aprovecha la plataforma de IoT en la nube llamada Thingsboard [30]; dicho sistema se dedica a la gestión

de dispositivos remotos, así como en la recopilación de datos que envían, su posible procesamiento y en la visualización de la información en tableros virtuales para los usuarios finales. Existen tres tipos de Thingsboard: (1) TB Community, (2) TB Professional, y (3) TB Cloud. Aquí se aprovecha el servicio gratuito que ofrece Thingsboard Community, cuyo propósito es académico, de entrenamiento y de evaluación. Y a pesar de las limitaciones de TB Community, comparada con las otras versiones de TB, tiene todos los elementos básicos para gestionar dispositivos de IoT, y desarrollar tableros o dashboards hechos a la medida de la aplicación.

La Figura 4 se muestra la arquitectura básica de ThingsBoard, plataforma capaz de recibir telemetría a través de varios protocolos [31]. En este estudio se emplea MQTT (“Message Queuing and Telemetry Transport”) debido a su bajo consumo de ancho de banda y su enfoque en conexiones estables para comunicación máquina a máquina [32].

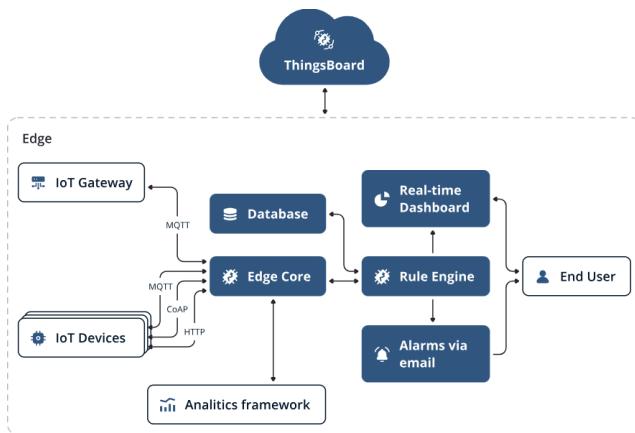


Fig. 4. Arquitectura de Thingsboard.

ThingsBoard facilita la creación de tableros virtuales en tiempo real (“Real-Time Dashboards”), permitiendo a los usuarios monitorear variables ambientales de forma interactiva. Además, cuenta con un motor de reglas (“Rule Engine”), que permite definir flujos lógicos basados en las variables medidas. Esto posibilita el envío automático de alertas (“Alarms”) a los usuarios mediante correo electrónico,

mejorando la gestión y respuesta ante cambios en las condiciones monitoreadas.

Tablero del Nodo Beta del Smart IoT Campus

El tablero del Nodo Beta, mostrado en la Figura 6, presenta los valores medidos de temperatura, humedad relativa, actividad de lámparas y estado de la puerta. Además, muestra los niveles de polvo y CO₂ en el aire, tanto en valores numéricos absolutos como en una escala relativa al nivel de riesgo. Para la medición de CO₂, se utilizó la clasificación de rangos descrita en la Tabla 2. Asimismo, el tablero del Nodo Beta permite la integración de código en JavaScript, lo que posibilita modificar la apariencia de la etiqueta de TB y permite configurar las condiciones de presencia de CO₂ en el Dashboard mediante su función de posprocesamiento, como se muestra en la Figura 5.

Usar función de post-procesamiento de datos

```
function (time, value, prevValue, timePrev, prevOrigValue) {
```

```
1 if (value < 1000) {  
2   return 'Normal';  
3 } else if (value < 2000) {  
4   return 'BAJO';  
5 } else if (value < 3000) {  
6   return 'ALTO';  
7 } else if (value < 4000){  
8   return 'EXCESO';  
9 }  
10 }
```

Fig. 5. Función de posprocesamiento de la etiqueta de CO₂ de TB.

En el tablero de la Fig. 6 se puede modificar fácilmente el rango de tiempo oprimiendo el ícono de forma de reloj, lo que abre una ventana de selección de tiempo en minutos, horas, y días; de la misma manera se pueden seleccionar rangos de fecha y hora.

6. RESULTADOS

A partir de las mediciones de varias semanas, se observó que los valores de CO₂ presentaron variaciones significativas a lo largo del día. Durante las primeras horas de la mañana, cuando la ocupación del laboratorio era mínima, los niveles de CO₂ se mantuvieron por debajo de las 1,000 ppm. Sin



Fig. 6. Panel del Laboratorio 1, mediciones hechas por el Nodo Beta.

embargo, a medida que avanzaba el día y el número de personas en el aula aumentaba, se registró un incremento constante, alcanzando picos de hasta 3,900 ppm en horarios de mayor concurrencia. Como ejemplo específico, en la Fig. 7 se muestran las mediciones históricas de CO₂ registradas durante cinco días en el Laboratorio de Computación. Los datos indican altos niveles de CO₂, superando las 3,000 ppm en tres ocasiones, lo que representa un riesgo ALTO según la Tabla 2. Las clases tienen una duración de una a dos horas, y en ocasiones tres horas, y se observa que la mayor actividad y ocupación del laboratorio ocurre por la mañana y medio día (antes de las 3pm), en comparación con las clases vespertinas, con una ocupación de 20 a 30 personas.

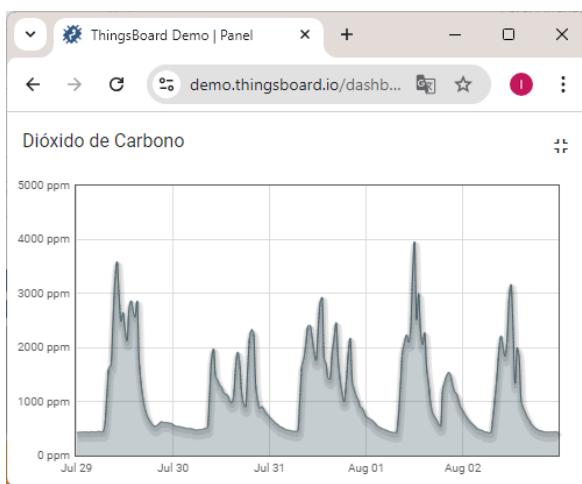


Fig. 7. Se midieron valores pico de CO₂ que pasaron las 3000 ppm el 29 de julio, y el 1 y 2 de agosto.

Otro caso que permite una comparación contrastante se muestra en Fig. 8, donde se presenta la gráfica histórica de dos semanas de mediciones de CO₂. Durante la primera semana, el laboratorio se utilizó para la aplicación del examen de admisión, tanto en el turno matutino como en el vespertino.

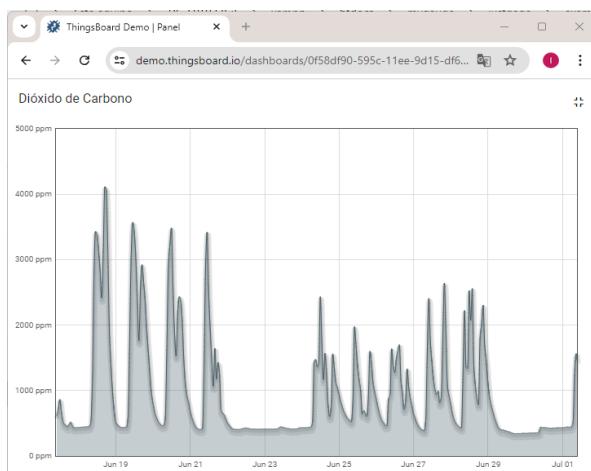


Fig. 8. Comparación de dos semanas de mediciones de CO₂. Durante exámenes de admisión y después clases normales.

La duración del examen fue de cuatro horas y media, lo que significó que la mayoría de los presentes permanecieron en el aula durante tres horas o más, sin ventilación. En contraste, durante la segunda semana de la Fig. 8, se realizaron mediciones en clases normales, donde la mayor ventilación resultó en niveles significativamente más bajos de CO₂. Durante la aplicación del examen de admisión, se observó que los niveles de CO₂ superaron las 3,000 ppm, alcanzando casi 4,000 ppm en uno de esos días, situándose en el nivel de EXCESO, lo que pudo haber afectado negativamente el rendimiento de los estudiantes.

Una vez identificada la necesidad de ventilar el laboratorio y tomando medidas correspondientes, los niveles de CO₂ disminuyeron notablemente. En la Fig. 9 se muestra que, cuatro días después de aplicar criterios para mejorar la calidad del aire, los niveles de CO₂ se redujeron a niveles normales, subiendo solo ocasionalmente a 2000 ppm, lo cual es aceptable.

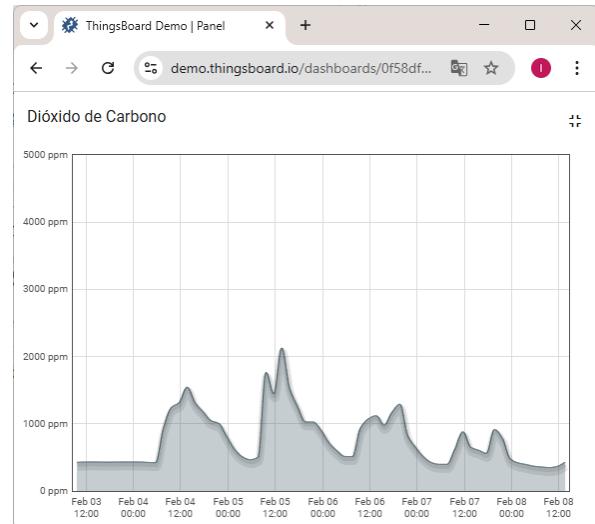


Fig. 9. Los niveles de CO₂ disminuyeron una vez que se tomó conciencia de ventilar.

El análisis de tendencias muestra que, en días donde las clases se llevaron a cabo sin interrupciones prolongadas, los niveles de CO₂ se mantuvieron elevados por más tiempo, lo que sugiere una acumulación progresiva debido a la falta de renovación del aire.

Asimismo, al correlacionar los datos de CO₂ con la temperatura y humedad relativa, se identificó que en días con temperaturas más bajas, la dispersión del gas se redujo significativamente. Este fenómeno es consistente con estudios previos que indican que, en ambientes con ventilación pasiva deficiente, el CO₂ tiende a permanecer más tiempo en suspensión. Finalmente, el impacto de la ventilación controlada fue evidente cuando, al implementar períodos de ventilación de 10 minutos entre clases, los niveles

promedio de CO₂ disminuyeron en un 42%, manteniéndose en un rango seguro según las normativas establecidas por la EPA y la NOM-025-STPS-2008. Esto refuerza la importancia de establecer estrategias basadas en datos para optimizar la calidad del aire en espacios cerrados.

7. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Este estudio sobre la medición de CO₂ en un laboratorio de cómputo de la Universidad Tecnológica de Tijuana, ha permitido cuantificar la acumulación de dicho gas en un ambiente cerrado y evaluar su presencia en la calidad del aire y el bienestar de los usuarios. Se registraron niveles de CO₂ superiores a 3,000 ppm en múltiples ocasiones durante las horas pico de ocupación, alcanzando un máximo de 3,900 ppm en un día de aplicación de exámenes de admisión. Estos valores exceden el umbral recomendado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), que sugiere mantener niveles por debajo de 1,000 ppm para evitar efectos adversos en la salud y el desempeño cognitivo. De manera similar, la Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en ambientes laborales, indicando que la concentración de CO₂ en interiores no debe superar las 5,000 ppm para evitar efectos adversos en la salud ocupacional.

El análisis continuo de los datos obtenidos indica que la falta de ventilación contribuye significativamente a la acumulación de CO₂. En comparación con los valores promedio registrados durante sesiones con ventilación controlada (aprox. 850 ppm), los niveles observados en espacios cerrados representan un incremento de hasta un 358%. Estudios previos han demostrado que exposiciones prolongadas a concentraciones superiores a 2,500 ppm pueden reducir la capacidad de concentración y toma de decisiones en un 12%, lo que resalta la importancia de una gestión adecuada de la ventilación en espacios educativos.

Otro hallazgo relevante es que el uso del aire acondicionado no contribuyó a la reducción de los niveles de CO₂, sugiriendo que el sistema de climatización del laboratorio no incluye mecanismos de renovación de aire. Esto concuerda con investigaciones previas que indican que la recirculación de aire sin filtración eficiente puede mantener concentraciones elevadas de CO₂ y otros contaminantes.

Para abordar estos desafíos, se recomienda la implementación de estrategias de ventilación activa basadas en datos en tiempo real. Una posible solución es el desarrollo de un nodo IoT de alertas que, basado en los valores de CO₂ reportados por el Nodo Beta, envíe notificaciones visuales y sonoras para indicar cuándo es necesario ventilar el espacio. Adicionalmente, se sugiere explorar la integración de sistemas de ventilación forzada con filtración de aire y el uso de

algoritmos de aprendizaje automático para predecir patrones de acumulación de CO₂ en función de la ocupación del aula.

Como trabajo futuro, se planea extender el monitoreo a múltiples espacios dentro del campus universitario para evaluar la variabilidad de los niveles de CO₂ en diferentes entornos y su correlación con factores como la densidad de ocupación, la temperatura y la humedad relativa. Además, se explorará la posibilidad de incorporar sensores adicionales para medir otros contaminantes del aire, como compuestos orgánicos volátiles (VOCs) y material particulado, aunque ya se mide a PM2.5, se puede extender a partículas mayores como PM10, con el objetivo de obtener una caracterización más completa de la calidad del aire en entornos educativos, sobre todo en laboratorios donde hay equipos electrónicos y de computación.

Este trabajo refuerza la importancia del monitoreo continuo de la calidad del aire en espacios cerrados, y sugiere que el uso de tecnologías de IoT permiten soluciones eficientes de recabar información en tiempo real para mejorar la salud y el desempeño académico de los estudiantes en instituciones educativas.

6. REFERENCIAS

- [1] J. Smith, "An IoT-based Smart Campus Monitoring System," in 2022 IEEE International Conference on Smart Internet of Things (SmartIoT), 2022, pp. 1-5.
- [2] J. W. Alvarado, "Automatización de edificios: fundamentos y tendencias," in IEEE Region 9 Women in Engineering, 2021.
- [3] M. Johnson, "Integración de medidores de energía IoT a un Sistema de Gestión de Edificio tradicional," in 2020 IEEE Congreso Bienal de Argentina (ARGENCON), 2020, pp. 1-6.
- [4] A. Brown, "Descripción de un sistema IoT para la medición y registro de la calidad del aire," in 2020 IEEE Congreso Bienal de Argentina (ARGENCON), 2020, pp. 1-4.
- [5] R. Lee, "Internet of Things (IoT) Heterogeneous Integration Roadmap," in IEEE Heterogeneous Integration Roadmap, 2020, pp. 1-17.
- [6] M. Di Renzo, "El proceso de contaminación del aislamiento eléctrico externo," in IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2024, pp. 1-9.
- [7] D. C. Kyritsis, "Combustion Process and CO₂ Emissions," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 24, no. 2, pp. 345-352, June 2009.
- [8] M. Sorey, "Seismic image of a CO₂ reservoir beneath a seismically active volcano," in Geophysical Journal International, vol. 133, no. 1, pp. F7-F10, April 1998.
- [9] D. Schneider, "Cement, Steel, and Natural Gas Are Major Greenhouse Gas Emitters, Too," in IEEE Spectrum, June 2018.

- [10] L. Ott, "Atmospheric CO₂ and COVID-19 Lockdown: Changes in Emissions," IEEE Xplore, 2020.
- [11] J. Smith, "Indoor Air Quality and COVID-19: The Role of CO₂ as an Indicator," IEEE Transactions on Environmental Engineering, vol. 30, no. 4, pp. 123-130, April 2021.
- [12] A. Smith and B. Johnson, "Impact of Elevated CO₂ Levels on Human Performance and Health," International Journal of Environmental Health, vol. 37, no. 2, pp. 98-105, Feb. 2023.
- [13] C. M. Duarte, Ł. Jaremko, and M. Jaremko, "Hypothesis: Potentially Systemic Impacts of Elevated CO₂ on the Human Proteome and Health," Frontiers in Public Health, vol. 8, 2020. [En línea].
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpubh.2020.543322> /full. [Último acceso: 30 de enero, 2025].
- [14] R. Greene, M. Eftekhari, D. Clements-Croome, and G. Georgiou, "Measurements of CO₂ levels in a classroom and its effect on the performance of the students," CIBSE ASHRAE Technical Symposium, Imperial College, London, 2012. [En línea].
https://repository.lboro.ac.uk/articles/conference_contribution/Measurements_of_CO2_levels_in_a_classroom_and_its_effect_on_the_performance_of_the_students/9430832. [Último Acceso: 29 de enero, 2025].
- [15] L. Morawska and J. Cao, "Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality," Environment International, vol. 139, pp. 105730, June 2020.
- [16] E. Monroe, N. Shetty, y R. Chakrabarty, "Development of Airborne SARS-CoV-2 Detection Devices," Neuroscience Research, vol. 1, no. 1, pp. 45-50, Feb. 2025. [En línea].
<https://neuroscienceresearch.wustl.edu/washington-university-researchers-to-design-detectors-of-airborne-sars-cov-2/>
- [17] A. Brown, "CO₂ Levels and COVID-19 Transmission in Enclosed Spaces". IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 68, no. 9, pp. 1234-1240, September 2021.
- [18] M. Johnson, "Impact of Elevated CO₂ Levels on COVID-19 Spread in Indoor Environments," IEEE Transactions on Medical Imaging, vol. 39, no. 11, pp. 3456-3463, November 2020.
- [19] D. Zhang, E. Ding, and P. M. Bluyssen, "Guidance to assess ventilation performance of a classroom based on CO₂ monitoring," Indoor and Built Environment, vol. 31, no. 4, pp. 1107-1126, 2022. [En línea].
<https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1420326X211058743>. [Último acceso: 30 de enero, 2025].
- [20] A. Smith, "Harmful effects of carbon dioxide (CO₂) on human cognitive function," Journal of Environmental Health, vol. 45, no. 3, pp. 123-130, 2022.
- [21] César Ortega-Corral, Florencio López-Cruz, María del Carmen Vargas-García. "Smart IoT Campus: Creación de un ecosistema de Internet de las Cosas en el edificio Docencia 1 de la UT de Tijuana usando ThingsBoard".
- [22] Espressif Systems, "ESP32-DevKitC V4 Getting Started Guide," Espressif Systems Documentation, 2023. [En línea]: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/get-started/index.html>. [Último acceso: el 10 de enero, 2025].
- [23] IEEE Standards Association, "IEEE Draft Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors, Actuators, and Devices – Message Queue Telemetry Transport (MQTT) for Networked Device Communication," IEEE Standard P1451.1.6, 2024. [En línea] <https://standards.ieee.org/ieee/1451.1.6/11619/>. [Último acceso: el 11 de enero, 2025].
- [24] Adafruit Industries, "DHT22 Temperature and Humidity Sensor Datasheet," Adafruit Documentation, 2023. [En línea]. https://www.mouser.com/catalog/specsheets/Soldered_101270%20dht22%20temperature%20and%20humidity%20sensor.pdf. [Último acceso: 27 de enero, 2025].
- [25] Altronics, "CdS Photoconductive Cells GL5528 Datasheet," Altronics Documentation, 2023. [En línea]. https://altronics.cl/uploads/lidr_5528.pdf. [Último acceso: 27 de enero, 2025].
- [26] Components101, "MC-38 Magnetic Switch Sensor Datasheet," Components101 Documentation, 2023. https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/MC38-Datasheet.pdf. [Último acceso: 27 de enero, 2025].
- [27] Plantower, "PMS7003 Series Data Manual," Plantower Documentation, 2023. [En línea] https://www.mouser.com/datasheet/2/1398/Soldered_108978_pms7003_sensor_pm10_pm25-3532590.pdf. [Último acceso: 7 de enero, 2025].
- [28] Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd., "MH-Z19B Infrared CO₂ Sensor Module Datasheet," Winsen Documentation, 2023. [En línea]. <https://www.winsen-sensor.com/d/files/MH-Z19B.pdf>. [Último acceso: 7 de enero, 2025].
- [29] G. K. Dennis, "Understanding JSON Schema," json-schema.org, 2023. [En línea] <https://json-schema.org/UnderstandingJSONSchema.pdf>. [Último acceso: 8 de enero, 2025].
- [30] ThingsBoard, "Working with IoT dashboards," ThingsBoard Documentation, 2023. [En línea]. <https://thingsboard.io/docs/user-guide/dashboards/>. [Último acceso: 29 de enero. 14, 2025].
- [31] ThingsBoard, "ThingsBoard Architecture, " ThingsBoard Documentation, 2023. [En línea] <https://thingsboard.io/docs/reference/architecture/> [Último acceso: 29 de enero, 2025].
- [32] ThingsBoard, "Device Connectivity Protocols," ThingsBoard Documentation, 2023. [En línea] <https://thingsboard.io/docs/reference/protocols/> [Último acceso: 29 de enero, 2025].