

Wireless CO₂ and ozone monitoring with IoT technology for indoor air quality

Ramón Chávez-Bracamontes * Fernando Mancilla-Peña *
Samuel Sepulveda-Rubio * Cynthia Mejía-Cárdenas *

* *Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán, (e-mail: ramon.cb@cdguzman.tecnm.mx). Av. Tecnológico 100, Mpio. de Zapotlán el Grande, Jalisco, México. C.P. 49000.*

Abstract: This article presents the development of a wireless sensing and control system for indoor air quality by measuring gases such as carbon dioxide, as well as the use of ozone as a biocide agent for environmental control in real time, respecting concentrations allowed by national and international environmental health standards. The developed system uses cutting-edge technology such as the Internet of Things and Cloud Computing that allows remote access to air quality measurements through mobile devices with the installation of the developed App, which has the capacity for registration and controlled access to users, auto-configuration of devices and data visualization in real time and historical record. The use of ozone as a biocide agent for environmental control was effective against the use of chemicals or other substances since it does not leave hazardous residues, inhibiting the generation of new colonies and keeping the areas under a disinfection control.

Keywords: Disinfection, Air quality planing and control, Condition monitoring, Internet of Things, Real time control of environmental systems, Wireless sensing and control systems.

1. INTRODUCCIÓN

En este artículo se propone un sistema que facilite a los usuarios información en tiempo real de los parámetros de calidad del aire en espacios interiores. Primeramente, se desarrolló un monitor inteligente en base a sensores de dióxido de carbono (CO₂) con capacidad de transmitir los datos de forma inalámbrica a través del protocolo WiFi y su almacenamiento y procesamiento en la nube, para su recuperación vía remota en dispositivos inteligentes. Posteriormente se automatizó un generador de ozono (O₃), el cual es controlado en tiempo real de forma remota empleando una plataforma que utiliza Internet de las Cosas (IoT). Los avances con la tecnología IoT y el cómputo en la nube han facilitado la implementación del monitoreo en tiempo real de la calidad del aire y sus contaminantes. El sistema desarrollado aplica O₃ de forma controlada para la sanitización de los espacios monitoreados, cuyo objetivo es mantener un nivel óptimo de la calidad del aire al disminuir los niveles de CO₂ y al mismo tiempo controlar la reproducción de microorganismos por el efecto biocida en la aplicación de O₃, logrando disminuir los riesgos sanitarios. En la sección 2 se aborda el estado del arte, en la sección 3 se describe los antecedentes y normativas. En la sección 4 se especifican los materiales y métodos empleados. En la sección 5 se presentan los resultados y su discusión, y finalmente en la sección 6 mostramos nuestras conclusiones.

2. ESTADO DEL ARTE

Derivado de la reciente pandemia causada por el COVID-19 y la relajación de los protocolos sanitarios que en su momento fueron implementados, se ha despertado la necesidad de tener mayor prevención sobre la calidad del aire en espacios cerrados, provocando que las personas sean más cautelosas al momento de estar en lugares con mala calidad del aire, y donde por necesidad pasan la mayor parte de su tiempo, ya sea en espacios con una mayor concentración de personas o con ventilaciones inadecuadas, exponiéndose con mayor probabilidad a la transmisión del virus SARS-CoV-2, que se transmite a través de los aerosoles que se generan en estos espacios (Villareal, 2020).

Según Somayya Madakam (2015), el IoT apunta a la transformación de unificar nuestro mundo en una estructura común manteniendo la información del estado de las cosas. Varias investigaciones de la aplicación del IoT a los sistemas de monitoreo de la calidad del aire han sido reportados por autores como Preethichandra (2013), quien describió un sistema de monitoreo basado en comunicación inalámbrica con protocolo Zigbee. Gauray (2018) desarrolló un sistema de monitoreo de la contaminación usando IoT, Zhao (2019) empleó múltiples interfases de comunicación en la detección de la calidad del aire, y JunHo (2020) propuso una plataforma basada en la integración de la nube y el IoT para el monitoreo

de la calidad del aire en interiores. La mayoría de trabajos reportados en la literatura solo se han enfocado al monitoreo alámbrico e inalámbrico sobre las condiciones de la calidad del aire, en el presente artículo, se propone además del uso de las tecnologías emergentes, la desinfección de los espacios monitoreados mediante la aplicación de O_3 , controlando las concentraciones establecidas por las normas ambientales como la NOM-172-SEMARNAT-2019.

Otros estudios relacionados con la calidad del aire realizados por la agencia de protección ambiental de Estados Unidos de Norteamérica (EPA, 2021), muestran que existe la posibilidad de que la propagación del COVID-19 también tenga lugar a través de partículas suspendidas en el aire en entornos cerrados. Zafra (2021) evaluó mediante la medición de CO_2 la calidad del aire en recintos como medida preventiva para disminuir los contagios por COVID-19 y resaltó que, si este gas se concentra en demasía, significa que el lugar no está bien ventilado existiendo en consecuencia un gran riesgo de contagio.

3. ANTECEDENTES Y NORMATIVAS

El CO_2 es un gas de efecto invernadero que en pequeñas cantidades es inofensivo y a medida que aumentan las concentraciones puede ser peligroso para la salud. De acuerdo con los parámetros establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para ambientes saludables debe ser menor de 1,000 ppm (esto equivale a 1.5 el aire ya respirado).

Aunque el CO_2 se produce tanto de forma natural como a través de las actividades humanas, no está clasificado como contaminante del aire. Sin embargo, en un espacio interior se trata como un contaminante porque la cantidad de oxígeno requerida para respirar se vuelve insuficiente a altas concentraciones de CO_2 . La cantidad de CO_2 en una cierta habitación es una medida del riesgo de contagio (Salud Geoambiental, 2022). La exposición a niveles elevados de CO_2 puede causar asfixia por desplazamiento de aire, incapacidad e inconsciencia, dolores de cabeza, vértigo y visión doble, incapacidad para concentrarse o convulsiones.

Por otro lado el O_3 es un gas altamente oxidante que tiene propiedades biocidas ya que destruye las bacterias, virus y demás microorganismos desde el núcleo, además de que el O_3 también tiene la propiedad de desodorizar y quitar malos olores del ambiente o lugar donde se esté utilizando, es por ello que cuando inició la pandemia de COVID-19 se incrementaron las investigaciones y la experimentación para su uso en dispositivos pesticidas. La OMS ha señalado que el O_3 es el desinfectante más potente contra el coronavirus (Zamora, 2020).

La norma oficial mexicana NOM-020-SSA1-2014 de salud ambiental establece los valores límite permisibles para la concentración de O_3 en el aire ambiente y los criterios para su evaluación. El promedio horario debe ser menor o igual a 0.095 ppm y la concentración del promedio móvil

de 8 horas de O_3 debe ser menor o igual a 0.070 ppm. La tabla 1 muestra una clasificación de diferentes intervalos de ozono y sus niveles de riesgo y calidad del aire (NOM-172-SEMARNAT-2019).

Tabla 1. Índice aire y salud para el ozono

Calidad del aire	Nivel de riesgo asociado	Intervalo de ozono (O_3) promedio de una hora (ppm)	Intervalo de ozono (O_3) promedio móvil de ocho horas (ppm)
Buena	Bajo	0.051	0.051
Aceptable	Moderado	>0.051 y 0.095	>0.051 y 0.070
Mala	Alto	>0.095 y 0.135	>0.070 y 0.092
Muy Mala	Muy Alto	>0.135 y 0.175	>0.092 y 0.114
Extremadamente Mala	Extremadamente Alto	> 0.175	> 0.114

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Sistema IoT para el monitoreo inalámbrico y control de la calidad del aire

El sistema IoT propuesto en este artículo (Fig. 1), tiene la finalidad de monitorear y controlar la calidad del aire en espacios interiores. Este sistema está formado por cuatro elementos principales, a) un sistema de monitoreo inalámbrico, b) una plataforma online con servicios en la nube administrados por las herramientas ThingSpeak y Firebase, c) un sistema de control automático de generación de ozono y d) una aplicación móvil para el registro de usuarios, visualización de datos en tiempo real y el registro histórico de las mediciones.

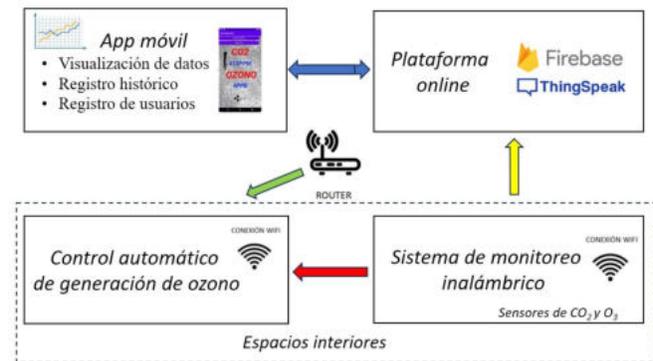


Fig. 1 Sistema IoT para monitoreo y control de calidad del aire en interiores

El funcionamiento del sistema IoT requiere un Punto de Acceso WiFi para que el sistema de monitoreo inalámbrico transmita la medición de la concentración de gases del ambiente en espacios interiores. Los sensores de CO_2 y O_3 que forman parte del sistema de monitoreo inalámbrico son conectados a un microcontrolador de 32 bits de la familia ESP32 para acondicionar los datos y transmitir la información vía protocolo Wi-Fi hasta la plataforma online, donde se procesan y se almacenan en bases de datos para su posterior visualización y/o registro.

Para regular las concentraciones de CO₂ y mejorar la calidad del aire se implementó el sistema de control automático de generación de O₃, que además de reducir los niveles de CO₂ permite la desinfección de los espacios donde se lleve a cabo el monitoreo y mantener los niveles óptimos de CO₂, mejorando la calidad del aire dentro de los límites permitidos por las normas ambientales NOM-172-SEMARNAT-2019.

Se desarrolló una App utilizando Android Studio para que a través de dispositivos inteligentes como celulares o tabletas se pueda visualizar los datos en tiempo real, su registro histórico y control de acceso a usuarios autorizados.

4.2 Sistema de monitoreo inalámbrico

La Fig. 2 contiene el diagrama esquemático del sistema de monitoreo inalámbrico de CO₂ y O₃. El microcontrolador ESP32 es el elemento principal, el cual cuenta con dos núcleos de CPU (Xtensa LX6 de 32 bits de bajo consumo) con frecuencias de reloj de CPU ajustable de 80 MHz a 240 MHz, 520 KB de memoria SRAM en chip y 4 MB de memoria flash y una interfaz inalámbrica Wi-Fi.

Este sistema de monitoreo requiere acceder a una red a través de un punto de acceso Wi-Fi conectado a internet para poder enviar datos a la nube. El sistema se programó para enviar muestras cada 15 segundos a la nube, existiendo una latencia debido a que depende de la infraestructura del internet. Sin embargo, por las características del proceso de medición de los gases no es necesario tener tiempos de muestreo por debajo de los 15 segundos.

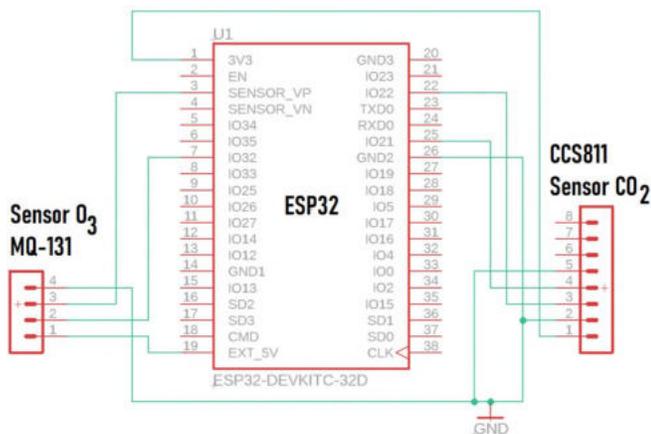


Fig. 2 Diagrama esquemático del sistema de monitoreo

Para realizar acciones de monitoreo de gases como el CO₂ fue necesario seleccionar un sensor con características de muy bajo consumo energético, siendo el sensor CCS811 de la compañía AMS quien ofrece muy buenas características (ScioSence, 2022). Este sensor de gas está construido con metal óxido (MOX), además de un microcontrolador y un convertidor analógico a digital (ADC). La comunicación

es digital a través de interfaz I²C. El rango de operación es de 400 ppm a 8192 ppm.

Para la medición de ozono se utiliza el sensor MQ-131 que pertenece a una familia de dispositivos diseñados para detectar la presencia de distintos componentes químicos en el aire. Está compuesto por un sensor electro-químico que varía su resistencia al estar en contacto con el O₃. Es un dispositivo con alta inercia, debido a que su respuesta necesita tiempos largos para estabilizarse tras un cambio de concentración de O₃. Para su operación requiere de un calentador para elevar la temperatura del sensor, y que sus materiales adquieran la sensibilidad, mientras el calentador no alcance la temperatura de funcionamiento (Llamas, 2016).

4.3 Plataformas online

La información generada por los sensores de forma inalámbrica vía Wifi debe ser almacenada y procesada en la nube. Existe una gran variedad de servicios, de los cuales se seleccionó el Firebase, que es una plataforma de servicios en la nube creada por Google, cuya función principal es el desarrollo de Apps de gran calidad. Una gran ventaja de esta plataforma es la disponibilidad para su uso en diferentes sistemas operativos como iOS, Android y web (Pérez, 2016).

Otra de las plataformas que se emplea para el almacenamiento de grandes volúmenes de datos generados por el sistema de monitoreo es la plataforma denominada ThingSpeak (Damián, 2020), la cual es una API y aplicación de código abierto para el IoT, permitiendo almacenar y recopilar datos de objetos conectados a través del protocolo HTTP a través de Internet o de una red local. ThingSpeak puede integrarse con sistemas embebidos de Arduino, Raspberry Pi, ioBridge / RealTime.io, Electric Imp, aplicaciones móviles/Web, redes sociales y análisis de datos con MATLAB.

Ambas plataformas tienen versiones gratuitas que permiten un reducido número de recursos pero que en nuestro caso satisfacen las necesidades para este proyecto, sin embargo, se pueden adquirir versiones sin límite de recursos mediante el pago de una licencia anual logrando así expandir las capacidades de almacenamiento y aumento en la velocidad de transmisión de la información.

4.4 Sistema de control automático de generación de O₃

El objetivo de este mecanismo de control es reducir la concentración de CO₂ y la limpieza del aire ambiente de microorganismos contaminantes a la salud humana, manteniendo las concentraciones dentro de los límites establecidos por las normas ambientales.

El ozono es un agente biocida con alta capacidad de oxidación, es por ello la necesidad de tener un control estricto del nivel de concentración de O₃ generado. Además, al aplicar O₃ a un ambiente con altas concentraciones de CO₂, éste comienza a disminuir gradualmente.

El sistema de control automático toma su referencia de los límites de CO₂ permitidos en espacios interiores y los compara con las concentraciones de CO₂ monitoreadas de forma inalámbrica, accediendo a los datos en tiempo real a través de los servicios de la plataforma Firebase y actuando sobre la generación de O₃ mediante un control ON-OFF. En la Fig. 3 se muestra la etapa de control con tecnología inalámbrica para el generador de O₃ comercializado por la empresa BIO-INOCUOM modelo INOXB1C1G, permitiendo así la gestión de acciones de control mediante un sistema embebido comercial ESP32 que utiliza el protocolo Wifi para comunicarse a la plataforma ThinkSpeak.

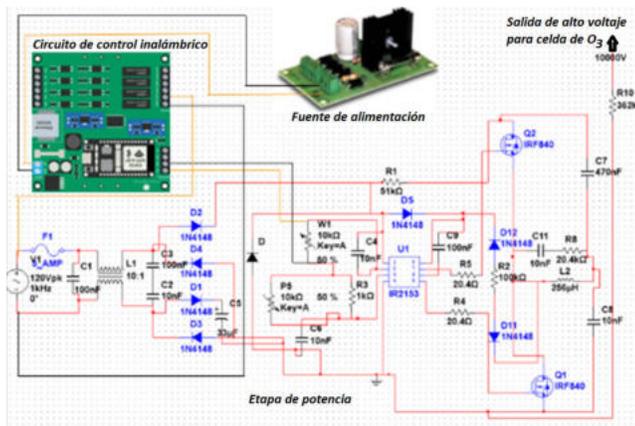


Fig. 3 Sistema de control automático de generación de O₃
4.5 Aplicación móvil

El uso de dispositivos móviles como celulares, tabletas o laptop para acceder a la información almacenada en la nube es de vital importancia. Para ello fue necesario la programación del sistema embebido empleando el conocido entorno de desarrollo de Arduino y la programación de la App a través del entorno de desarrollo de Android Studio. La App se programó con el fin de que los usuarios del sistema puedan registrar el acceso al sistema, visualizar los datos en tiempo real, y además tener acceso al registro histórico de las mediciones.

En la Fig.4 se muestran las interfaces gráficas de la App desarrollada para monitoreo remoto, permitiendo acceder a los datos de las mediciones de calidad del aire. La Fig. 4a refiere a la pantalla de registro para nuevos usuarios, la cual controla el acceso al sistema. Esta interfaz obtiene los datos accediendo a la plataforma de Firebase de Google donde se mantiene una base de datos con el registro de los usuarios que tienen derecho a acceder al ecosistema de monitoreo. La interfaz de la Fig. 4b es la pantalla mostrada a los usuarios para que puedan iniciar sesión si anteriormente ya han sido registrados en la aplicación móvil. Una vez que se tiene iniciada la sesión con las credenciales de usuario y contraseña, se continúa a la interfaz gráfica que se muestra en la Fig. 4c donde se observan en tiempo real las mediciones que se están llevando a cabo a través del sistema de monitoreo.

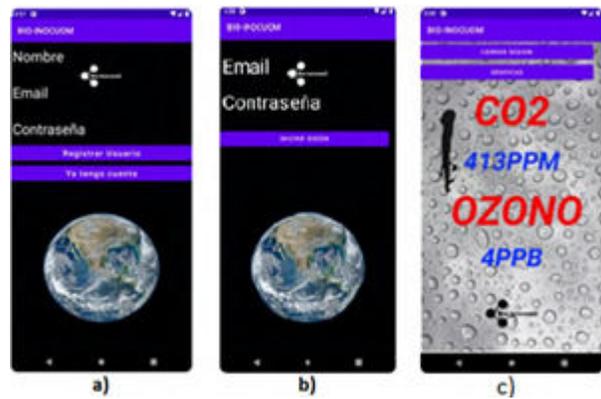


Fig. 4 App BIO-INOCUOM a)registro de usuarios, b)inicio de sesión, c)acceso a datos

5. RESULTADOS

Al finalizar la etapa de diseño y construcción del sistema de monitoreo inalámbrico de gases de CO₂ y O₃ descrito en la sección 2 se realizaron una serie de pruebas para validar el correcto funcionamiento del sistema. El primer experimento que se realizó fue exponer durante una hora de muestreo el monitor inalámbrico en un espacio cerrado de 8m³ con una persona en su interior y se aplicó O₃ con un generador de 1g/hr, con la finalidad de observar el comportamiento del CO₂. En la Fig. 5 se muestran los resultados medidos en un periodo de 1 hora, observándose un comportamiento inverso entre los niveles de CO₂ y O₃, esto nos confirmó que a medida que se aplica el O₃, la concentración de CO₂ disminuye y este hallazgo nos permitió definir que la medición del CO₂ nos podría ser útil como una alternativa en el control del ozono.

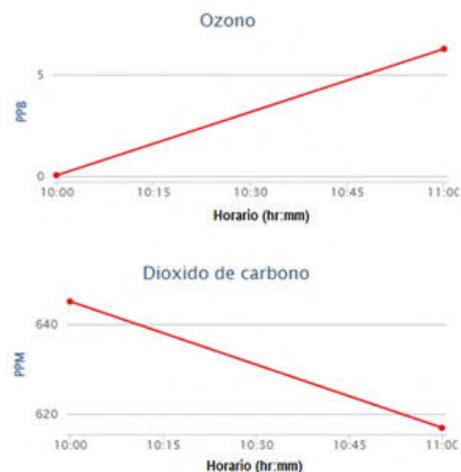


Fig. 5 Relación de CO₂ vs. O₃.

Un segundo experimento consistió en monitorear el CO₂ continuamente en un laboratorio de cómputo de 100m³, durante un periodo de cuatro semanas, en donde acudían alumnos solo en días hábiles regularmente con flujos de

entrada y salida constantes. En la Fig. 6 podemos observar un comportamiento en las concentraciones de CO₂ muy similar durante cada semana, alcanzando concentraciones de CO₂ de hasta 3000 ppm en periodos muy cortos, teniendo valores promedio de 1000 ppm, que es una concentración típica en ambientes interiores con gran concentración de personas. También podemos observar que se mantenían en niveles bajos en los sábados y domingos cuando no había acceso a los alumnos. Estos resultados demostraron un correcto funcionamiento del sistema de monitoreo inalámbrico y registro de datos de CO₂.

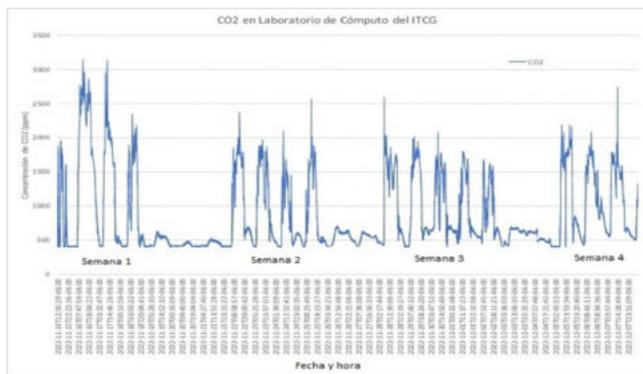


Figura 6. Registro de concentración de CO₂ durante 4 semanas

Una vez validado la operación del monitoreo inalámbrico de CO₂ se realizó un tercer experimento con la finalidad de verificar el poder de desinfección con la aplicación controlada de ozono. Se aplicó el gas O₃ en forma aérea a una área de cubículos de alumnos con un espacio interior de 250m³. Se prepararon las condiciones de experimentación necesarias para realizar una serie de pruebas microbiológicas para validar el grado de desinfección. Durante un periodo de cuatro horas se registró el comportamiento de la concentración de CO₂ y O₃ a la zona bajo prueba. En la Fig. 7 se puede observar el comportamiento del CO₂ con dos de los monitores colocados en áreas de prueba diferentes durante el periodo de experimentación. Los primeros 30 minutos a partir de las 14:30 hrs fue la preparación de los espacios y colocación de cajas Petri de vidrio con microorganismos expresados en diferentes medios de cultivo para bacterias y hongos-levaduras.

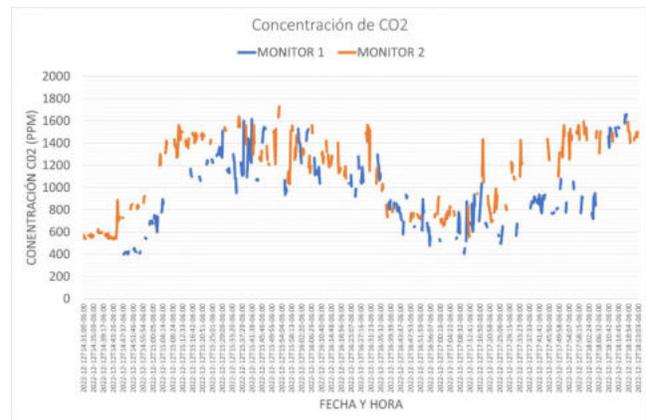


Fig. 7 Concentración de CO₂ en experimento 3

El comportamiento ascendente de las concentraciones de CO₂ durante la primera hora, fue generado por la exhalación de 10 personas que estuvieron en el área de experimentación, siendo de 400 a 1600 ppm. Posteriormente se aplicó el Ozono en forma aérea con un generador de O₃ de 3g/Hr durante los siguientes 30 minutos dejó de aumentar el nivel CO₂ debido a la aplicación del ozono como se describió en el primer experimento. Posteriormente se dejó durante 1 hora libre de personas el espacio bajo pruebas y el comportamiento fue descendente a valores entre 400 y 800 ppm del CO₂. Y finalmente en la última hora de experimentación se detuvo la aplicación de ozono y el comportamiento del CO₂ volvió a ser como en la primera hora por la influencia de las personas en el área.

Los resultados de la desinfección por la aplicación de ozono requirieron de un análisis microbiológico de 3 días los cuales serán reportados en otro artículo con el nivel de detalle requerido.

El monitoreo de O₃ que se observa en la Fig. 8 demuestra que durante a experimentación no se rebasaron los límites permisibles por las normas oficiales estando por debajo de 10 ppb, no representando riesgo para las personas que se encontraban en el lugar.

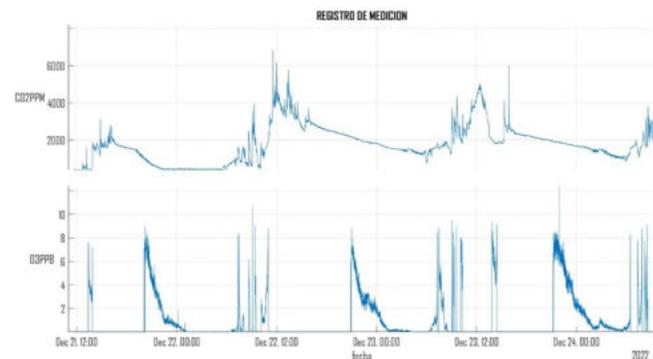


Fig. 8 Mediciones de O₃ con monitor inalámbrico

6. CONCLUSIONES

Nosotros hemos implementado un sistema de control de la calidad del aire en espacios interiores, mediante un monitoreo inalámbrico del CO₂ y O₃, empleando el ozono como agente biocida para control ambiental. Mediante el análisis microbiológico realizado se comprobó la eficacia del empleo de ozono, que si bien no anula a las colonias ya expresadas, si las detiene en su crecimiento en cierto grado, ya que desde el momento de la desinfección hasta los 3 días posteriores al experimento 3, el número de colonias no se intensificó en las cajas Petri, al no observarse la generación de nuevas colonias de microorganismos; además se observó, el frenando o desaceleración del crecimiento de las colonias ya existentes, inhibiendo la generación de nuevas colonias y manteniendo las áreas bajo un control de desinfección durante el tiempo de aplicación y una hora posterior a la misma. Si bien el ozono es un gran agente desinfectante oxidante, no anula estos tipos de colonias de microorganismos ya expresados y con crecimiento afectivo cuando se aplica en el ambiente de manera aérea, pero si inhibe la generación de nuevas colonias manteniendo las áreas bajo un control de desinfección controlado por el ozono aplicado. El sistema implementado utiliza tecnologías emergentes y de muy bajo consumo energético siendo viable en aplicaciones portátiles. La App desarrollada permite el acceso remoto a las mediciones de la calidad del aire a través de dispositivos móviles con capacidad de registro y acceso a usuarios autorizados a través de la visualización de datos en tiempo real y registro histórico.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología CONAHCYT por el apoyo a becarios y al Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán por el apoyo al proyecto financiado 16971 de la Convocatoria de Proyectos de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación 2023.

REFERENCIAS

- Damián, J. (2020). Thingspeak, plataforma gratuita para la internet de las cosas, [en línea], electrogeek, disponible en: <https://www.electrogeekshop.com/thingspeak-plataforma-gratuita-para-la-internet-de-las-cosas/>.
- EPA (2021). El aire en espacios cerrados y el coronavirus (covid-19), [en línea], disponible en: <https://espanol.epa.gov/cai/el-aire-en-espacios-cerrados-y-el-coronavirus-covid-19>.
- Gauray Rout, S.K. (2018). Pollution monitoring system using iot. *ARPN Journal of Engineering and Applied Science*, 13(3), 2126–2123.
- JunHo, B. (2020). Development of an iot-based indoor air quality monitoring platform. *Journal of Sensors*, 14.
- Llamas, L. J. (2016). Ingeniería, informática y diseño, [en línea], disponible en: <https://www.luisllamas.es/arduino-detector-gas-mq/>.
- NOM (2019). Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de calidad del aire y riesgos a la salud. *NOM-172-SEMARNAT-2019*.
- Pérez, M. (2016). Firebase, qué es y para qué sirve la plataforma de google, [en línea], disponible en: <https://www.iebschool.com/blog/firebase-que-es-para-que-sirve-la-plataforma-desarrolladores-google-seo-sem/>.
- Preethichandra, D.M.G. (2013). Desing of a smart indoor air quality monitoring wireless sensor network for assisted living. *IEEE*, 1306–1310.
- Salud Geoambiental (2016). Instituto para la salud geoambiental, [en línea], disponible en: <https://www.saludgeoambiental.org/dioxido-carbono-co2/>.
- ScioSence (2022). Ultra-low power digital gas sensor solution for monitoring indoor air quality”, environmental sensors, [en línea], disponible en: <https://www.sciosence.com/products/environmental-sensors/ccs811-gas-sensor-solution>.
- Somayya-Madakam, R.R.S.T. (2015). Internet of things (iot): A literature review. *Journal of Computer and Communications*, 3(5), 10.
- Villareal, A. (2020). 48 horas con un medidor de co2, [en línea], disponible en: <https://www.elconfidencial.com/tecnologia/ciencia/2020-11-18/covid-19-medidor-co2-48horas-2836300/>.
- Zafra, M. (2021). No respire el aire de otro: cómo esquivar el coronavirus en interiores, [en línea], disponible en: <https://elpais.com/especiales/coronavirus-covid-19/como-esquivar-el-coronavirus-en-interiores/>.
- Zaho, W.S.L. (2019). Desing and implementation of an iot based indoor air quality detector whit multiple communication interfaces. *IEEE Internet of Things Journal*, 2327–4662.
- Zamora, S. (2020). El ozono es el desinfectante más potente contra el coronavirus y todo tipo de microorganismos según la oms, [en línea], disponible en: <https://www.quimicaysociedad.org/el-ozono-es-el-desinfectante-mas-potente-contra-el-coronavirus-y-todo-tipo-de-microorganismos-segun-la-oms/>.