

Prototipo de un monitor de ozono, basado en el método de absorción UV, fabricado con materiales impresos 3D y electrónica implementada en PSoC 5

G. Collazo Rodríguez, H. A. Moreno Casillas, F. G. Flores García, F. Valdés Perezgazga, and I. Hernández Jacquez

Tecnológico Nacional De México/Instituto Tecnológico De La Laguna,

Blvd. Revolución y, Av. Instituto Tecnológico de La Laguna s/n, Primero de Cobián Centro, 27000 Torreón, Coahuila, México.

Received 8 June 2023; accepted 28 September 2023

En este trabajo se presenta el diseño y la fabricación de un prototipo para medición de ozono, en el cual se utilizan materiales de fácil adquisición. El propósito de este diseño es proporcionar una alternativa robusta y menos costosa de fabricar un dispositivo de medición de ozono que puede ser extendida a otros gases. El método de medición se basa en la Ley De Beer-Lambert. Se utiliza un LED (light-emitting diode) UV como fuente y un fotodiodo como detector de luz. La muestra de aire interactúa con la luz en el interior de una celda de absorción, fabricada en una impresora 3D usando como material PLA (Polylactic Acid). La amplificación y el procesamiento de la señal, se realizaron mediante una tarjeta electrónica PSoC (Programable System on Chip). Se observó un buen comportamiento de todos los componentes, tanto electrónicos como impresos 3D. Se lograron realizar mediciones en un rango de 0 a 100 ppm con una exactitud de ± 5 ppm.

Descriptor: Ozono; Beer-Lambert; LED UV; Impresión 3D; PSoC 5.

In this work the design and manufacture of a prototype of an ozone measuring device is presented. One of the goals of this design is to develop an easy and fast way to manufacture these kind of devices, that might also be used for other gases. The method used to measure the ozone is the Beer's Lambert Law. Readily available materials are used. An UV LED was used as a source, and a photodiode as a detector. For the air-light interaction an absorption cell was necessary, it was made of Polylactic Acid and manufactured in a 3D printer. In the microcontroller the operational amplifiers and the signal processors were implemented in a PSoC 5. Good performance of all components, both electronic and 3D printed, was observed. Measurements were achieved in a range of 0 to 100 ppm with an accuracy of ± 5 ppm.

Keywords: Ozono; Beer-Lambert; LED UV; Impresión 3D; PSoC 5.

DOI: <https://doi.org/10.31349/RevMexFis.70.020901>

1. Introducción

Existen varios alótropos del oxígeno, uno de ellos es el ozono. Es una molécula formada por tres átomos de oxígeno, su símbolo químico es O_3 . Es un gas que a temperatura y presión ambiente presenta olor fuerte. A baja concentración es incoloro, pero al aumentarla se puede notar un ligero color azul [1, 2].

Debido a su composición química es un poderoso oxidante que reacciona con otros compuestos, causa deterioro en distintos materiales como el hule, pintura y telas [3].

Cuando el ser humano está expuesto a concentraciones mayores de 0.095 ppm el ozono puede provocar diferentes malestares, tales como tos, garganta irritada y agravamiento de asma, bronquitis y enfisema [4-8]. En la vegetación puede causar un desarrollo lento de la planta. Puede provocar aumento en la susceptibilidad a cualquier tipo de estrés y bajo rendimiento en la cosecha [9-11].

Es considerado uno de los microbicidas más eficaces, tiene acción sobre un gran número de bacterias, virus y hongos. Todos estos son responsables de problemas de salud en humanos. El ozono interfiere en el metabolismo de las células bacterianas, una cantidad suficiente de ozono provoca daños en las membranas celulares de tales organismos dando lugar a la destrucción y no reparación de estos [12-15].

Es una molécula no deseada en diferentes procesos, ya que es generada cuando hay fallas en los dispositivos eléctricos.

El ozono en la atmósfera es producido a partir de la interacción entre precursores y luz solar, tales precursores son los compuestos orgánicos volátiles y los óxidos de nitrógeno. Los generadores lo producen introduciendo oxígeno y haciéndolo pasar por medio de unos electrodos que generan una descarga eléctrica, la cual separa los dos átomos que forman el oxígeno diatómico y a su vez provoca que se unan de tres en tres formando una nueva molécula la cual es el O_3 [16-18].

Existen diferentes métodos para medir la concentración de ozono, uno de ellos es utilizar sensores electroquímicos, típicamente estos sensores tienen tres electrodos: electrodo de trabajo, electrodo de referencia y contraelectrodo. Mientras el sensor trabaja el gas entra a través de una membrana para interactuar con el electrodo de trabajo, la reacción resultante de esta interacción puede ser la oxidación o reducción. La reacción genera una corriente entre el electrodo de trabajo y contraelectrodo la cual es proporcional a la cantidad presente de gas [19, 20].

Por otra parte; la espectrofotometría es una técnica que permite determinar la concentración de cierta sustancia en una solución, se basa en la absorción de ondas electromagnéticas. La absorbancia es un concepto utilizado en física que describe cuanto se atenúa la luz al atravesar cierto ele-

mento o compuesto químico. La concentración de la sustancia está relacionada a la cantidad de luz absorbida. Cada sustancia tiene una longitud de onda a la cual absorbe más luz, en el caso del ozono esa longitud de onda es 254 nm [21-25].

1.1. Absorción ultravioleta

El método de absorción ultravioleta se basa en la característica del Ozono de absorber la luz ultravioleta de alrededor de 254 nm, consiste en hacer pasar aire y luz UV a través de una celda, después se va a comparar la intensidad de la luz de entrada con la de salida. Para realizar el análisis matemático y obtener la concentración de ozono presente en el aire se utiliza la Ley De Beer-Lambert [26]. Se realizan algunas operaciones para obtener el resultado en ppm, tal como se muestra en la Ec. (1).

$$C_{O_3} = \frac{10^6}{(\epsilon)(l)} * \frac{(273 + T)}{273} * \frac{1023}{P} * \ln\left(\frac{I_0}{I}\right), \quad (1)$$

donde C_{O_3} es la concentración de ozono en ppm. I la intensidad de la luz después de pasar por la muestra con ozono. I_0 la intensidad de la luz al pasar por una muestra sin ozono. P es la presión en hPa. T es la temperatura en °C y ϵ es el coeficiente de absorción del ozono a 254 nm ($308 \text{ atm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ a 273°K y 1013 hPa).

Una celda de absorción es un elemento con un conducto por el cual se hace pasar aire, en los extremos se colocan un emisor y un receptor de luz, teniendo así una interacción entre luz y la muestra de aire a analizar.

2. Materiales y métodos

2.1. Sistema de medición de ozono

El diagrama del sistema de medición de ozono, se presenta en la Fig. 1. Para el cálculo de la concentración de ozono, se necesitan dos muestras de aire. Una debe tener concentración cero y la segunda debe tener una concentración mayor de cero y dentro del rango de operación del equipo.

El sensor de presión se coloca en la misma tubería que conduce el aire, el de temperatura se posiciona en una base de la celda de absorción. (Fig. 1)

Este sistema, al tener solo una celda de absorción, necesita un arreglo de electroválvulas para poder generar las dos entradas de las muestras de aire requeridas. Una de ellas cuenta con un filtro que elimina el ozono presente en el aire que ingresa por ahí, por la otra entrada fluirá aire tal y como está en el ambiente. Según el tipo de muestra que se necesita para la medición se elegirá la entrada de aire correcta, esto se realiza activando o desactivando alguna(s) de las electroválvulas presentes en el sistema. El flujo de aire es generado por una bomba colocada en el otro extremo de la celda. Los LED's o Fotodiodos se montan en unas tapas que pueden unirse a los extremos de la celda. También se incluyen los aditamentos necesarios para colocar los sensores utilizados.

2.2. Celda de absorción

Este elemento se diseñó en SolidWorks (Dassault Systèmes SolidWorks Corp, Suresnes, Francia), (ver Fig. 2).

El conducto de la celda diseñada tiene un diámetro interior de 10 mm y uno exterior de 20 mm. En los extremos cuenta con pequeñas tuberías por las cuales entra y sale el aire.

Las piezas se fabricaron con una Impresora 3D Creality Ender 3 (Shenzhen Creality 3D Technology Co., Ltd, Shenzhen, China) usando material PLA producido por el mismo fabricante de la impresora, este material es de la serie CR, tiene un diámetro de 1.75 mm y una temperatura de impresión que oscila entre los 195°C a 220°C . La impresora se configuró con un ancho de línea de 0.4 mm, ancho de línea de capa inicial de 100 %, un grosor de pared de 0.8 mm, recuento de línea de 7 capas, temperatura de placa de 65°C , enfriamiento por capa de 12 segundos, soportes al 90 %, volumen de depósito por inercia de 0.64 mm^3 y densidad de relleno de 0 %.

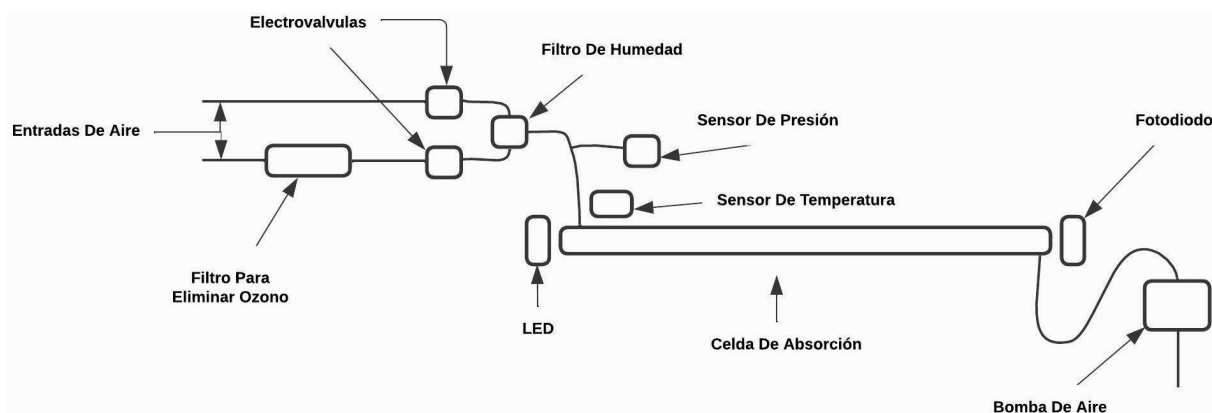


FIGURE 1. Diagrama del sistema de medición de ozono desarrollado.

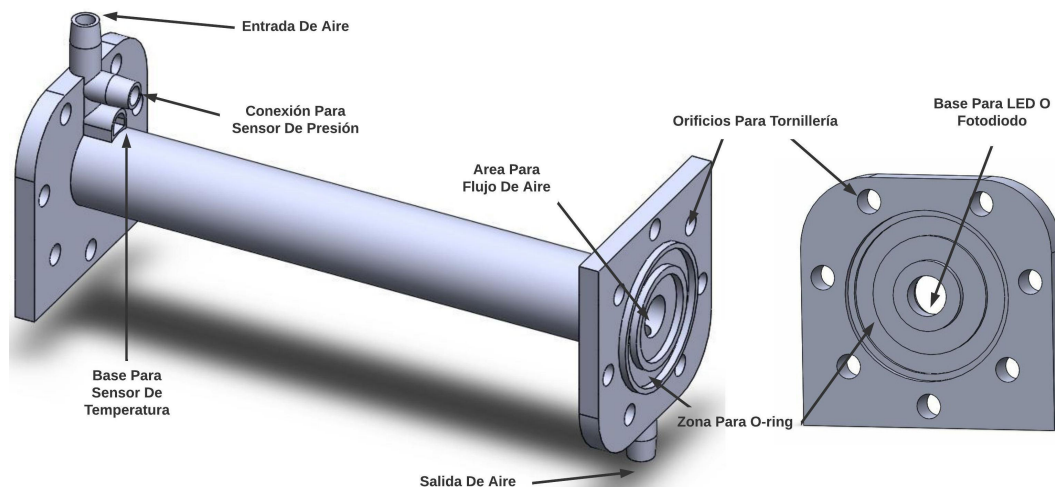


FIGURE 2. Diseño 3D de la celda de absorción.

2.3. Componentes electrónicos

Se utilizan sensores y elementos para poder obtener las variables descritas en la ley de Beer-Lambert, estos componentes son:

2.3.1. Sensores

Sensor analógico de presión absoluta MPX5100AP (NXP Semiconductors, Eindhoven, Países Bajos) el cual puede realizar mediciones de 15 a 700 KPa entregando 6.4 mV/KPa.

Sensor digital de temperatura con comunicación One Wire modelo DS18B20 (Maxim Integrated Products, Inc., San José, California, Estados Unidos).

2.3.2. Fuente y detector de luz

LED ultravioleta GL255-T0397E con encapsulado TO-39 (Changsha Greenergy Lighting Co., Ltd., Hunan, China), emite luz con una longitud de onda entre 250 y 260 nm con un pico en 255 nm, tiene un lente esférico que colima la luz en un haz con un ángulo de apertura de 7°. En el caso de este trabajo el LED tiene un consumo de 0.027 A.

Fotodiodo tipo Schottky GUV-C-T20GD-U con encapsulado TO-39 (Genicom, Daejeon, Korea). Está fabricado a base de nitruro de aluminio y galio, tiene un área activa de 6.894 mm².

2.3.3. Microcontrolador

Tarjeta de desarrollo CY8CKIT-059 PSoC5 LP con el microcontrolador CY8C5888LTI-LP097 (Infineon Technologies AG, Munich, Alemania).

2.4. Programación

La programación (Fig. 3), se realizó en el software PSoC Creator 4.4 (Infineon Technologies AG, Munich, Alemania),

el cual contiene distintos bloques que ayudan a realizar el proceso de manera más ágil.

La obtención de datos del sensor MPX5700AP se realiza mediante un bloque ADC (Analog-to-digital converter) de secuenciación de aproximación sucesiva, el cual se programa con una resolución de 12 bits, una referencia interna de voltaje, un modo de muestreo “Free Running” y un reloj de 1.1 MHz. El sensor de temperatura DS18B20 se conecta a un pin bidireccional, que requiere una resistencia desde el pin de alimentación al de señal, con cualquier otro microcontrolador esta resistencia se debe colocar externamente, cuando se utiliza un PSoC es posible asignar una resistencia pull-up internamente.

La adquisición de la señal entregada por el fotodiodo, se hace por medio de un amplificador de transimpedancia, el cual convierte la corriente de llegada a tensión, se programa con una resistencia de retroalimentación de 1000 KOhms y un capacitor de 4.6 pF, esta señal se dirige a un amplificador operacional en modo seguidor para después entrar a un amplificador de ganancia programable, finalizando con otro amplificador en modo seguidor. Todos estos bloques se configuran con una potencia alta, a los de transimpedancia y ganancia programable se les establece un voltaje de referencia externo conectado a Vss. Para eliminar ruido externo la señal se conecta a un filtro notch, después se conecta a un amplificador operacional en modo seguidor.

Para finalizar, la señal se conecta a un ADC Delta Sigma con un voltaje de referencia Vdda/4, resolución de 20 bits, modo de conversión continuo y una tasa de conversión de 8 SPS (Samples per second).

La visualización de los datos se realiza de dos maneras, mediante el uso de una pantalla LCD (liquid-crystal display) y a través de comunicación serial con una computadora.

El control de la bomba y solenoides se realiza mediante los pines digitales.

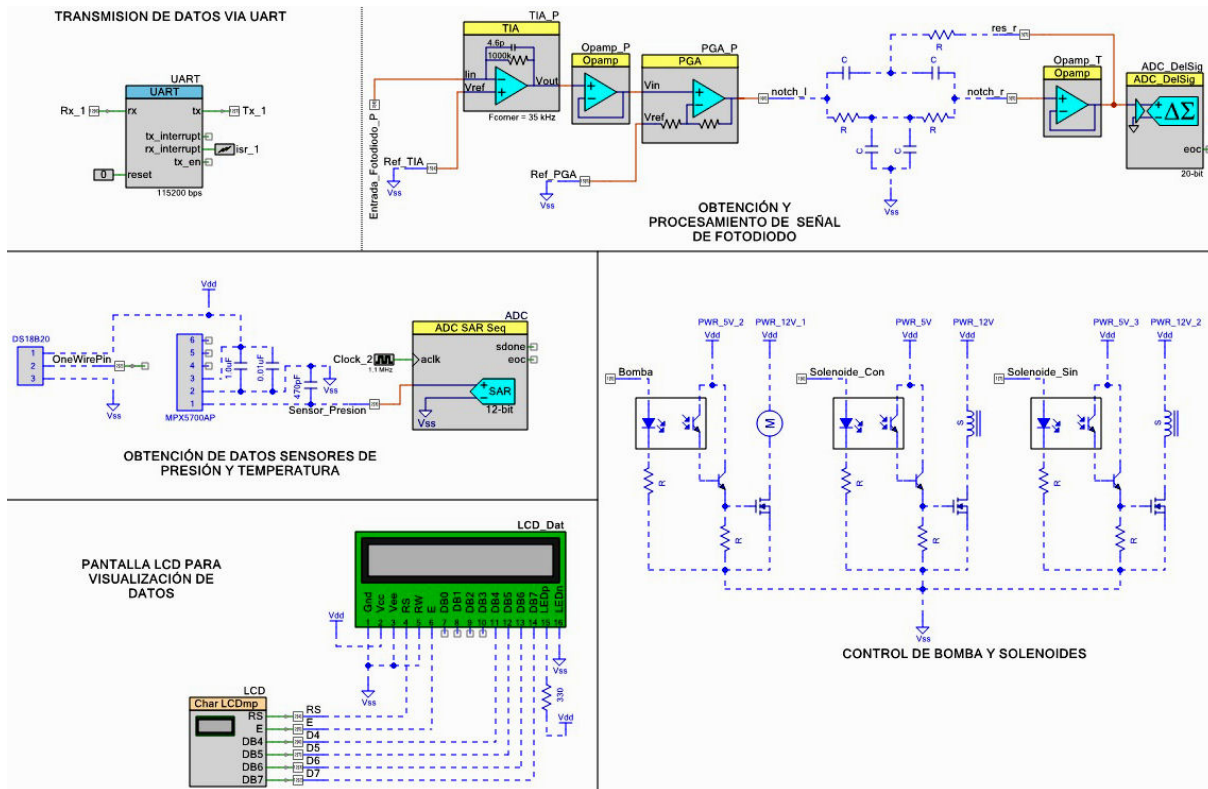


FIGURE 3. Configuración de componentes en software PSoC creator.

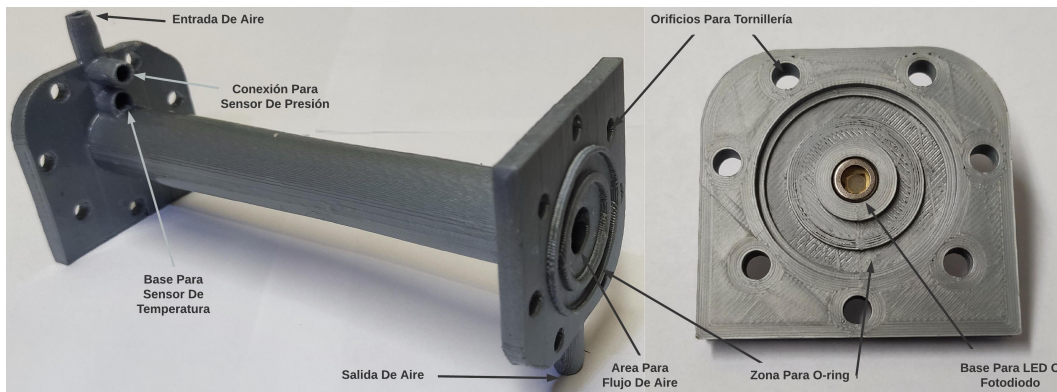


FIGURE 4. Celda de absorción impresa en 3D.

3. Resultados

3.1. Impresión 3D

La celda de absorción (Fig. 4) cuenta con la solidez necesaria para que la luz del exterior no entre a la zona de flujo del aire.

Tanto el LED como el fotodiodo asientan perfectamente en las bases sin tener movimiento alguno, lo cual evitará problemas relacionados a que el haz de luz no esté dirigido hacia el receptor de luz.

Debido a las facilidades que brinda la impresión 3D se pudo integrar una conexión para el sensor de presión evitando el uso de coples externos, también el sensor de temperatura

se pudo integrar en un lugar especial y no requirió un soporte especial para sostenerlo.

En pruebas iniciales se pudo detectar que existían pequeñas filtraciones de aire hacia dentro de la celda. Se aplicó un sellador para eliminar esas filtraciones.

3.2. Adquisición de datos

Una parte muy importante del prototipo es la lectura de la corriente proveniente del fotodiodo, ya que a partir del valor de esta señal se realizan los cálculos de la Ley de Beer Lamberth.

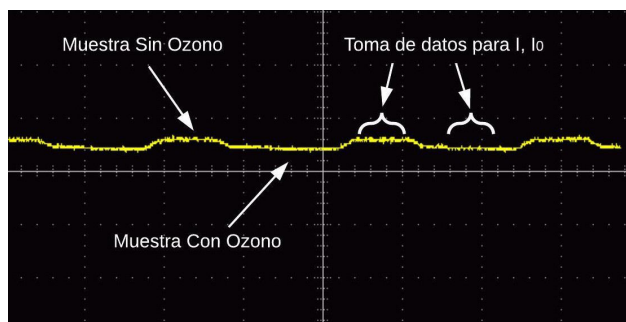


FIGURE 5. Señal entregada por el fotodiodo después de pasar por los respectivos amplificadores.

En la Fig. 5, están presentes las dos señales que se obtienen de las muestras de aire (concentración cero y muestra con ozono). Se puede observar como la señal obtenida del fotodiodo decrece cuando hay presencia de la molécula que se desea medir. La señal no tiene atenuaciones cuando se está tomando la muestra cero.

Los valores presentes en esa señal son leídos y guardados en variables que serán utilizadas como I e I_0 . Se aprecia que la diferencia de amplitudes de señal entre ambas muestras no se da inmediatamente, así que en el algoritmo del microcontrolador se le debe de asignar un tiempo de espera para poder empezar a tomar los datos.

3.3. Medición de ozono

Las pruebas para la medición de ozono se hicieron utilizando un generador de ozono modelo MP Series 1000 descarga corona (A2Z Ozone, Inc., Louisville, Kentucky, Estados Unidos) el cual puede regular por medio de un selector manual la cantidad de ozono que entrega y un medidor de ozono Modelo 202 Ozone Monitor (2B Technologies, Boulder, Colorado, Estados Unidos).

El sistema entrega lecturas cada 2.4 segundos por medio de comunicación serial (Fig. 6), por lo cual puede leer cambios rápidos en la concentración de ozono y entregar la lectura de ese cambio, si se desea este tiempo puede reducirse, así como también se puede programar para realizar promedios cada determinado número de muestras.

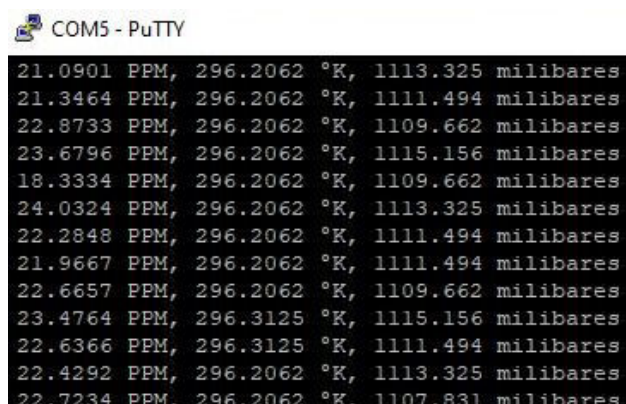


FIGURE 6. Lectura de mediciones en un monitor serial.

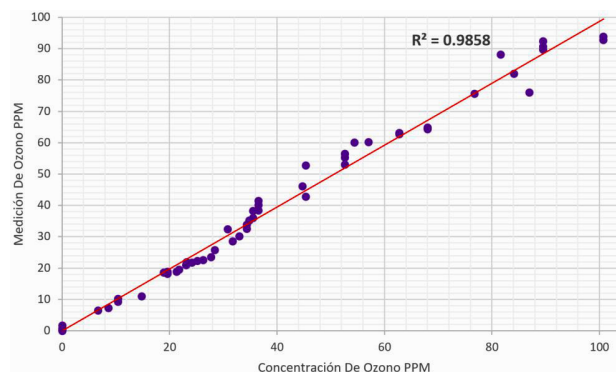


FIGURE 7. Datos de salida del sistema diseñado en función de la concentración de ozono.

El amplificador de ganancia programable y el ADC delta sigma fueron configurados de dos maneras diferentes. En la primera opción al amplificador programable se ajustó una ganancia de 16 y al ADC un rango de entrada de V_{ssa} a 1.2 V, para la segunda opción se asignó una ganancia de 50 y rango de entrada de V_{ssa} a V_{dda} . En el primer caso se logró realizar mediciones de ozono de hasta 60 ppm, mientras que en el segundo se pudieron medir un máximo de 100 ppm.

Se realizaron múltiples pruebas en las cuales la concentración de ozono se fue aumentando y manteniéndolo durante cierto tiempo desde 0 ppm a 150 ppm, con esto se comprobó la precisión del sistema, en todas ellas se tuvieron resultados semejantes. Cada prueba constó de más de 50 mediciones en concentraciones diferentes.

En la Fig. 7, se presentan los resultados de una de las pruebas, se realiza una comparativa entre los valores de ozono obtenidos por el medidor comercial y los correspondientes al prototipo diseñado en este trabajo. Estas mediciones son las correspondientes a la segunda configuración del programa. Se obtuvieron lecturas similares con ambos monitores.

El prototipo diseñado presentó una sensibilidad de 0.01 ppm. La linealidad entre las mediciones de ozono fue confirmada con una correlación $R^2 = 0.9858$. En promedio, en todas las mediciones de la prueba se tuvo una precisión de ± 2.5 ppm. Al superar las 100 ppm, el sistema dejó de detectar los aumentos de concentración, debido a que el ozono absorbió toda la luz UV presente en la celda y el fotodiodo no detectaba luz alguna.

4. Conclusiones y discusión

El sistema puede ser utilizado en aplicaciones en donde se necesiten controlar y medir concentraciones de ozono dentro del rango alcanzado (0 – 100 ppm).

Debido a los materiales utilizados es mucho más fácil y barato la fabricación de monitores.

Se encontró que el uso de un LED UV da varias ventajas comparado con las lámparas de mercurio o deuterio que utilizan otros medidores comerciales. Entre estas ventajas están:

- No son necesarios filtros ópticos, ya que tienen un pico de emisión de longitud de onda muy pequeño el cual es $\pm 5\text{nm}$.
- Vienen equipados con un lente colimador, por lo cual tampoco se necesitan añadir elementos que ayuden a la transmisión de la luz a través de la celda.
- El sistema de este proyecto pudo realizar mediciones inmediatamente después de ser encendido ya que no necesita tiempo de calentamiento.
- Requiere bajos niveles de voltaje de alimentación.
- Tiene una vida 3 veces más larga que las otras lámparas.

La impresión 3D es una buena opción para fabricar la celda, se pueden probar con diferentes materiales, esto con el fin

de utilizar el sistema en diferentes ambientes y verificar su resistencia ante diferentes condiciones. También se pueden probar otras técnicas de impresión para eliminar el problema de filtraciones de aire del exterior.

Se pueden modificar algunas configuraciones del trabajo esto con tal de medir rangos de ozono en partes por billón, las cuales son necesarias para el monitoreo ambiental, inclusive aumentar el límite de medición hasta 1000 ppm. Estas modificaciones en el sistema son:

- Longitud de la celda de absorción.
- Ganancia de amplificadores.
- Filtros para ruido electrónico.
- ADC con un número más grande de bits.

1. F. Sánchez C, Consideraciones sobre la capa de ozono y su relación con el cáncer de piel, *Rev. Med. Chil.* **134** (2006) 1185, <https://doi.org/10.4067/S0034-98872006000900015>.
2. Dirección De Monitoreo Atmosferico De La CDMX, ¿Qué es Ozono? (2016).
3. C. J. Weschler, Ozone in indoor environments: Concentration and chemistry, *Indoor Air* **10** (2000) 269, <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2000.010004269.x>.
4. S. I. Sousa, M. C. Alvim-Ferraz, and F. G. Martins, Health effects of ozone focusing on childhood asthma: What is now known - a review from an epidemiological point of view, *Chemosphere* **90** (2013) 2051, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.10.063>.
5. S. K. Sahu, et al., Ozone pollution in China: Background and transboundary contributions to ozone concentration and related health effects across the country, *Science of the Total Environment* **761** (2021), <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144131>.
6. M. Arjomandi, et al., Effect of ozone on allergic airway inflammation, *Journal of Allergy and Clinical Immunology: Global* **1** (2022) 273, <https://doi.org/10.1016/j.jacig.2022.05.007>.
7. Y. Niu, et al., Long-term exposure to ozone and cardiovascular mortality in China: a nationwide cohort study, *The Lancet Planetary Health* **6** (2022) e496, [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(22\)00093-6](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00093-6).
8. S. M. Holm and J. R. Balmes, Systematic Review of Ozone Effects on Human Lung Function, 2013 Through 2020, *Chest* **161** (2022) 190, <https://doi.org/10.1016/j.chest.2021.07.2170>.
9. M. Otieno, et al., Interactive effects of ozone and carbon dioxide on plant-pollinator interactions and yields in a legume crop, *Environmental Advances* **9** (2022), <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100285>.
10. C. P. Leisner and E. A. Ainsworth, Quantifying the effects of ozone on plant reproductive growth and development, *Global Change Biology* **18** (2012) 606, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02535.x>.
11. A. J. Holder and F. Hayes, Substantial yield reduction in sweet potato due to tropospheric ozone, the dose-response function, *Environmental Pollution* **304** (2022), <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119209>.
12. F. El-Athman, et al., Pool water disinfection by ozone-bromine treatment: Assessing the disinfectant efficacy and the occurrence and in vitro toxicity of brominated disinfection byproducts, *Water Research* **204** (2021), <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117648>.
13. S. Albert *et al.*, Assessing the potential of unmanned aerial vehicle spraying of aqueous ozone as an outdoor disinfectant for SARS-CoV-2, *Environmental Research* **196** (2021), <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110944>.
14. G. Moore, C. Griffith, and A. Peters, Bactericidal properties of ozone and its potential application as a terminal disinfectant, *Journal of Food Protection* **63** (2000) 1100, <https://doi.org/10.4315/0362-028X-63.8.1100>.
15. G. Ghanizadeh, *et al.*, Heterogeneous catalytically ozonation as a novel disinfectant for inhibition of *Legionella pneumophila* virulence, *Gene Reports* **17** (2019), <https://doi.org/10.1016/j.genrep.2019.100534>.
16. B. Mennad, *et al.*, Effect of the anode material on ozone generation in corona discharges, *Vacuum* **29** (2014) 29, <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2013.12.005>.
17. H. Itoh *et al.*, Investigation of ozone loss rate influenced by the surface material of a discharge chamber, *Ozone: Science and Engineering* **26** (2004) 487, <https://doi.org/10.1080/01919510490507847>.
18. M. L. Riley, S. Watt, and N. Jiang, Tropospheric ozone measurements at a rural town in New South Wales, Australia, *Atmospheric Environment* **281** (2022), <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119143>.

19. A. Ripoll *et al.*, Testing the performance of sensors for ozone pollution monitoring in a citizen science approach, *Science of the Total Environment* **651** (2019) 1166, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.257>.
20. X. Pang *et al.*, Electrochemical ozone sensors: A miniaturised alternative for ozone measurements in laboratory experiments and air-quality monitoring, *Sensors and Actuators, B: Chemical* **240** (2017) 829, <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.09.020>.
21. Y. Aoyagi *et al.*, High-Sensitivity Ozone Sensing Using 280 nm Deep Ultraviolet Light-Emitting Diode for Detection of Natural Hazard Ozone, *Journal of Environmental Protection* **03** (2012) 695, <https://doi.org/10.4236/jep.2012.38082>.
22. L. De Maria and G. Rizzi, Ozone sensor for application in medium voltage switchboard, *Journal of Sensors* **2009** (2009) 1297, <https://doi.org/e10.1155/2009/608714>.
23. M. Degner *et al.*, UV LED-based fiber coupled optical sensor for detection of ozone in the ppm and ppb range, *Proceedings of IEEE Sensors (2009)* **95**, <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2009.5398230>.
24. S. O'Keeffe, C. Fitzpatrick, and E. Lewis, An optical fibre based ultra violet and visible absorption spectroscopy system for ozone concentration monitoring, *Sensors and Actuators, B: Chemical* **125** (2007) 372, <https://doi.org/10.1016/j.snb.2007.02.023>.
25. M. Degner, *et al.*, High resolution led-spectroscopy for sensor application in harsh environment, *Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings (2010)* 1382, <https://doi.org/10.1109/imtc.2010.5488239>.
26. S. Khan, D. Newport, and S. L. Calvé, Gas detection using portable deep-uv absorption spectrophotometry: A review, *Sensors (Switzerland)* **19** (2019), <https://doi.org/10.3390/s19235210>.