

Application of UVC technology in an air purifier to improve the inactivation of pathogens

Santiago Linder Rubiños Jimenez¹; Victor León Gutierrez Tocas²; Antenor Leva Apaza³; Carlos Ernesto Cabrejo Culcas⁴; Niko Alain Alarcon Cueva⁵; Roberto Muñoz Pfuyo⁶

¹ Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, Perú, slrubinosj@untels.edu.pe

^{2, 3, 4, 5, 6} Universidad Nacional del Callao, Perú, vlgutierrez@unac.edu.pe, alevaa@unac.edu.pe, cecabrejoc@unac.edu.pe, naalarconc@unac.edu.pe, rmuñozp@unac.edu.pe

Abstract– Airborne diseases pose a significant risk to public health, especially in enclosed spaces with poor ventilation. In this context, the present research aimed to evaluate the application of UVC LED technology in an air purifier to improve the inactivation of pathogens. The proposed system integrated an ESP32 microcontroller, particulate matter and carbon monoxide sensor, and IoT connectivity for real-time data monitoring and storage via the Firebase platform. During the experimental phase, the survival of MS2, Q β , and ϕ X174 viruses was evaluated, determining inactivation rate constants and the doses required for their reduction. The results showed a significant decrease in viral load after exposure to UVC radiation, with ϕ X174 exhibiting greater sensitivity compared to the other microorganisms evaluated. Furthermore, the purifier stabilized air contaminant levels in a short time through the automatic activation of the ventilation and disinfection system.

Keywords– UVC LED, air purifier, pathogens, air quality.

Aplicación de la tecnología UVC en un purificador de aire para mejorar la inactivación de agentes patógenos

Santiago Linder Rubiños Jimenez¹; Victor León Gutierrez Tocas²; Antenor Leva Apaza³; Carlos Ernesto Cabrejo Culcas⁴; Niko Alain Alarcon Cueva⁵; Roberto Muñoz Pfuyo⁶

¹ Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, Perú, slrubinosj@untels.edu.pe

^{2, 3, 4, 5, 6} Universidad Nacional del Callao, Perú, ylgutierrez2@unac.edu.pe, alevaa@unac.edu.pe, cecabrejoc@unac.edu.pe, naalarconc@unac.edu.pe, rmuñozp@unac.edu.pe

Resumen: Las enfermedades transmitidas por el aire representan un riesgo significativo para la salud pública, especialmente en espacios cerrados con ventilación deficiente. En este contexto la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la aplicación de la tecnología UVC mediante leds en un purificador de aire para mejorar la inactivación de agentes patógenos. El sistema propuesto integró un microcontrolador ESP32, sensores de material particulado y monóxido de carbono, así como conectividad IoT para el monitoreo y almacenamiento de datos en tiempo real, mediante la plataforma Firebase. Durante la etapa experimental se evaluó la supervivencia de virus MS2, Qβ y φX174 determinándose constantes de velocidad de inactivación y dosis necesarias para su reducción. Los resultados evidenciaron una disminución significativa de la carga viral tras la exposición a radiación UVC destacándose una mayor sensibilidad del virus φX174 en comparación con los demás microorganismos evaluados. Asimismo, el purificador permitió estabilizar los niveles de contaminantes del aire en tiempo reducido mediante la activación automática del sistema de ventilado y desinfección.

Palabras clave: Led UVC, purificador de aire, agentes patógenos, calidad del aire.

I. INTRODUCCIÓN

Frente al peligro que representan las patologías de transmisión aérea, asegurar una ventilación adecuada en espacios cerrados es esencial para disminuir la densidad de agentes infecciosos, sobre todo en lugares muy concurridos. Pese a esto, ejecutar dicha acción no siempre es viable debido a que muchas edificaciones poseen infraestructuras de ventilación insuficientes o mal diseñadas, cuya mejora o actualización es complicada [1].

Como alternativa para mitigar el contagio, el uso de mascarillas ha demostrado su eficacia al restringir la dispersión de aerosoles. No obstante, la falta de compromiso a su uso facilita que el virus se propague en agrupaciones pequeñas y grandes [2]. Otra alternativa es utilizar purificadores con filtros HEPA en hogares para suprimir partículas nocivas y fomentar espacios saludables, aunque estos dispositivos no se enfocan específicamente en el peligro respiratorio que suponen los virus como el COVID-19 [3].

Recientemente, el progreso tecnológico en la limpieza del aire ha posibilitado la inactivación de virus, respondiendo a una demanda actual [4]. Investigaciones sobre fotobiología han

analizado como la radiación ultravioleta, particularmente la UVC, afecta a diversos virus [5], posicionándose como una herramienta económica para combatir infecciones al neutralizar microbios en el aire [6]. Se ha verificado que la luz UVC logra erradicar el SARS-CoV-1 y otros coronavirus tras exponerlos por 9 minutos a 1940 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ [7]. Si bien los datos sobre partículas en aerosol todavía son escasos, se calcula que requieren dosis de desinfección inferiores a la de entornos líquidos [8]. Aunque la oferta comercial de purificadores con tecnología UV es amplia, muchos carecen de validaciones externas que confirmen su desempeño real [9]. Establecer normas de pruebas uniformes ayudará a garantizar la calidad y claridad para el consumidor. Bajo esta premisa, el presente estudio analiza un equipo de purificación con LED UVC en una cámara hermética controlada, buscando observar cambios en la pureza del aire y la existencia de patógenos.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Esquema general del purificador de aire

El circuito electrónico presentado corresponde al sistema purificador de aire, el cual se puede observar en la figura 1, este sistema integra dos sensores, uno de monitoreo de CO y el otro de calidad de aire, los cuales están unidos a una unidad de control, elementos de potencia para la activación correcta de ventilación y desinfección por luz UVC. El diseño está orientado a la detección de contaminantes gaseosos y material particulado, una vez obtenido los valores de los sensores estos se envían a la nube Firebase donde se almacenan y extraen desde un aplicativo. Si en caso los sensores detecten valores que superan los niveles previamente definidos se envía un mensaje de alerta.

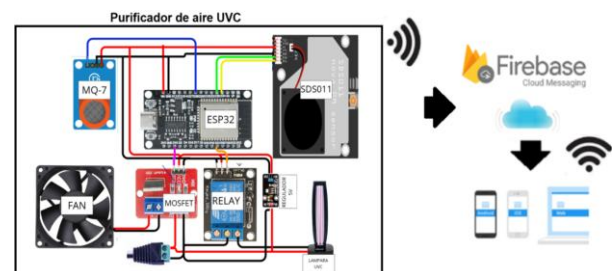


Figura 1. Esquema general del purificador de aire

B. Esquema mecánico del purificador de aire UVC

El dispositivo inicia su funcionamiento en la rejilla de entrada la cual permite el ingreso del aire del entorno y retiene partículas de Gran tamaño está rejilla fue fabricada en Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) material seleccionado por su resistencia mecánica bajo peso y facilidad de fabricación mediante impresión 3D. Posteriormente el aire atraviesa un filtro de polvo elaborado con fibra sintética de poliéster encargado de capturar partículas suspendidas como polvo polen y otros contaminantes sólidos presentes en el ambiente este material fue seleccionado debido a su alta eficiencia de filtración Y durabilidad luego el flujo de aire pasa por una rejilla generadora de turbulencia construida en ABS cuya función es distribuir el aire de manera uniforme para mejorar la exposición dentro del sistema de desinfección. El aire es conducido hacia la cámara UVC, la cual fue fabricada en aluminio anodizado, material que permite una adecuada reflectividad de la radiación ultravioleta y resistencia a la degradación provocada por la exposición continua a los rayos UVC. Dentro de esta cámara se instaló un conjunto de LEDs UVC montados sobre un disipador térmico de aluminio permitiendo una adecuada disipación del calor generado durante el funcionamiento del sistema.

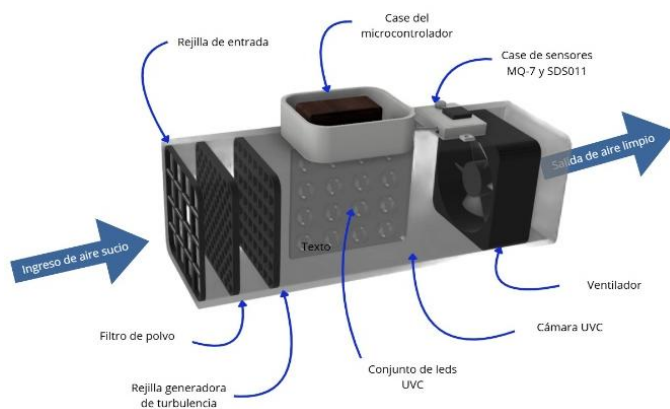


Figura 2. Partes mecánicas del purificador UVC

C. Analisis de hardware

- Microcontrolador ESP32

El sistema es controlado por el microcontrolador ESP32 de Expressif Systems este es una plataforma adecuada para sistemas de monitorización ambiental distribuida, debido aún a su buen balance entre capacidad de procesamiento, conectividad inalámbrica, eficiencia energética y bajo costo. Incorpora un procesador Xtensa de doble núcleo que opera 240 MHz, con 520 Kb de memoria SRAM y soporte para 16 MB de memoria flash externa, lo que permite ejecutar tareas de adquisición de sensores y comunicación de forma simultánea. Además, el ESP32 se integra con conectividad WIFI IEEE 802.11 b/g/n en la banda de 2.4 GHz y Bluetooth 4.2 /BLE, con un consumo aproximado de 160 miliamperios durante la transmisión y 30 en la recepción [10].

- Sensor SDS011

El sistema hace uso de un detector de calidad de ambiental SDS011, el cual puede registrar al mismo tiempo los niveles de partículas PM2.5 y PM10. Su espectro de detección abarca desde 0 hasta 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, contando con una precisión de 0.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. De igual manera, la unidad cuenta con una configuración que facilita la modificación de la frecuencia de actualización de las mediciones. El SDS011 presenta dos modalidades de transmisión: una conexión serial UART y una señal por modulación de ancho de pulso (PWM). En este montaje se utiliza el protocolo de comunicación serial UART, mediante el cual el controlador remite instrucciones al componente para recibir los datos de la densidad de partículas detectadas [11]. Los pines RX y TX del sensor SDS011 se conectan a los pines D35 y D34 del microcontrolador respectivamente. Asimismo, los pines de alimentación VCC y GND están conectados a línea de 5 voltios y a la tierra común del sistema, garantizando el suministro eléctrico adecuado para el funcionamiento del sensor.

- Sensor MQ-7

Para la identificación del monóxido de carbono (CO), se hace uso del sensor MQ-7, cuya alta sensibilidad a este compuesto es perfecto para el sistema. Este sensor utiliza dióxido de estaño (SnO_2) como elemento detector, el cual muestra una muy baja conductividad en ambientes libres de CO. Su operatividad se fundamenta en fases térmicas: detecta el CO en una etapa de baja temperatura con un calentamiento de 1.5 V y, luego, limpia los gases retenidos a una temperatura superior aplicando 5 V. Estas variaciones de conductividad del elemento detector se convierten mediante un arreglo electrónico, en una señal de salida acorde a la densidad del gas detectado. Por su gran sensibilidad al CO y precio económico, el MQ-7 es idóneo para múltiples proyectos destinados al monitoreo de calidad ambiental, donde la detección del CO sea de gran importancia [12]. El pin de salida de datos del sensor MQ-7 se conectan al pin D26 del microcontrolador, el cual opera como una entrada analógica. El microcontrolador se encarga de interpretar las variaciones de la señal del sensor y calcular los valores de concentración de monóxido de carbono, luego de realizada la calibración correspondiente. Los pines restantes VCC y GND se conectan a la línea alimentación de 5v y a la tierra común del sistema respectivamente.

- Led UVC

El empleo de mercurio en las lámparas UV ha provocado inconvenientes ecológicos y un precio elevado. Esta situación a impulsado a científicos a nivel global emplear dispositivos libres mercurio para los procesos de esterilización. A diferencia de una lámpara UV convencional, que posee entre 20 a 200 mg de mercurio, los emisores LED UV carecen de él. Sumado a esto, respecto a los sistemas tradicionales tanto el consumo energético como la producción de calor de los LEDs son notablemente más bajos [13]. El sistema utiliza un circuito de control automático para controlar tres módulos de iluminación

LED. El LED es fabricado por SEOUL VIOSYS. Las especificaciones del LED CA3535-CUD7GF1A son: longitud de onda máxima de 275 nm, voltaje de 6,0 V, corriente de 30 mA, etc. El circuito de control automático de potencia constante puede controlar de forma estable la salida de potencia, de modo que la potencia eléctrica se puede controlar de forma muy estable y la potencia óptica alcanza un estado estable a diferentes alturas y en diferentes momentos [14]. Los leds UVC, se encargan de la desinfección del aire. Este led UVC es controlada a través de un módulo relé SDR-05VDC-LS-C. Este dispositivo permite aislar eléctricamente el circuito del circuito de control de potencia, esto disminuye los riesgos para el microcontrolador, El relé es activado por el pin digital D21 del ESP32, cerrando el circuito de alimentación de la lámpara UVC, únicamente cuando se cumplan las condiciones de activación configuradas en el sistema, usar este método de control proporciona robustez y seguridad en la función adecuada del sistema.

- Motor

Para el retiro y recambio del aire al identificar altas concentraciones de contaminantes, el dispositivo emplea un ventilador del modelo AMIS-30522, el cual integra un motor de corriente continua (CC) sin escobillas, Frente a motores de CC más convencionales esta variante de motor CC ofrece una operación silenciosa, una larga durabilidad y un reducido gasto energético [15]. Debido a que el motor demanda una corriente superior a la que puede suministrar directamente el ESP32, se utiliza un módulo mosfet IRFZ44N como interfaz de potencia. El mosfet es controlado mediante una señal digital proveniente del pin D15 del microcontrolador, permitiéndola encendido y apagado del motor de forma segura. La alimentación del ventilador se realiza mediante una fuente general, mientras que la tierra del módulo mosfet se mantiene en común con la del ESP32 para asegurar el correcto control de la señal.

D. Análisis de software

- Python

En el desarrollo de este prototipo, se empleó el lenguaje Python con el fin de crear el software que ejecutara el microcontrolador. Python se define como un lenguaje de programación interpretado, versátil y de alto nivel, además, es compatible con múltiples enfoques de programación, tales como orientado a objetos, procedimental, funcional y estructurado.

Se eligió Python debido a su extensa disponibilidad de librerías. La información registrada por los sensores se envía a un servicio en la nube; específicamente, mediante el uso de la librería paho-mqtt, los datos de los sensores son cargados en la plataforma Firebase [16]. Todo este conjunto de herramientas puede instalarse como paquetes de Python descargables desde sus repositorios. La gestión de las librerías se efectúa a través de las clases de modelo y de inferencia, donde la configuración del modelo esta sujeta a los algoritmos seleccionados.

Posteriormente, en la figura 3 se detallan los recursos de software aplicados en el prototipo [17].



Figura 3. Librerías empleadas en el desarrollo del software

- Firebase

Firebase constituye un entorno de desarrollo que suministra a los programadores múltiples utilidades y prestaciones para el despliegue de aplicaciones móviles y web. Firebase se emplea como un sistema de almacenamiento de datos en tiempo real para guardar y obtener información, garantizando un sincronización veloz y segura entre el servidor y los dispositivos, Esta interfaz esta proyectada para ser sencilla y provee recursos de representación visual tales como diagramas y cuadros, para exhibir la evolución de los datos, con ello facilitar el seguimiento por parte de los interesados [18].

E. Diagrama de flujo

El sistema inicia su funcionamiento con la activación del esp32, el cual procede a leer los valores actuales registrados por los sensores instalados. Una vez obtenidos los datos, el sistema evalúa si los valores se encuentran dentro de los rangos normales. Si los valores son normales, el sistema continúa monitoreando de manera constante sin realizar ninguna acción adicional. En caso de detectarse concentraciones elevadas de monóxido de carbono (CO) o niveles altos de material particulado (PM2.5 o PM10), el sistema ejecuta una acción de alerta enviando una notificación mediante mensajería instantánea al usuario. Posteriormente el sistema verifica si el usuario responde a la alerta si el usuario responde este puede activar manualmente el ventilador y la lámpara uvc para iniciar el proceso de ventilación y desinfección del ambiente si el usuario no responde en un lapso de 5 minutos el sistema activa automáticamente el ventilador y los Leds UVC, una vez activados estos dispositivos el ESP32 continúa realizando lecturas de los sensores para verificar el estado del ambiente si los valores medidos retornan a niveles normales el sistema

procede a desactivar el ventilador y la lámpara USB regresando al ciclo continuo de monitoreo.

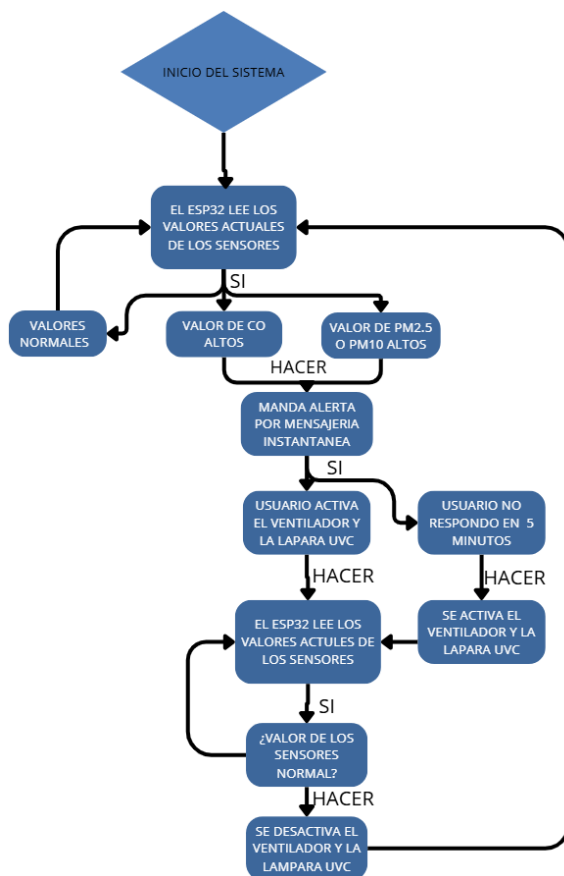


Figura 4. Diagrama de flujo

F. Etapa experimental

Durante la etapa de nebulización se activó el purificador de aire junto con un módulo de leds UVC con el fin de generar convección forzada y evitar la deposición de aerosoles en el fondo de la cámara. El aire fue recirculado de manera continua durante el proceso de tratamiento con radiación UVC. Una vez concluida la nebulización, el nebulizador ultrasónico Omron NE-C28 fue apagado y el aire que contenía las partículas microbianas fue sometido a irradiación mediante el sistema de purificación durante un tiempo máximo de 10 minutos manteniéndose el ventilador en operación constante (Ver la figura 5).

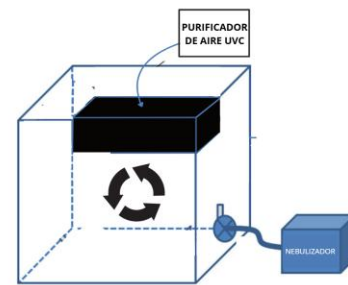


Figura 5. Diagrama esquemático del sistema de desinfección de aire tipo cámara que utiliza purificador de aire UVC para nebulización

Posteriormente, la mezcla de aire tratado y microorganismos fue extraída de la cámara de desinfección hacia un sistema de muestreo de aire, constituido por un impinger de vidrio SKC Biosampler de 20 mL y una bomba de muestreo de aire AKC AirCheck Touch. La presión negativa se ajustó aproximadamente 650 mmHg, lo que permitió obtener un caudal de muestreo entre 36 y 40 L/min. El impinger contenía 10 mL de agua estéril nebulizada, utilizada para la captación y resuspensión de los microorganismos presentes en el aire. Luego de un tiempo de muestreo de 5 minutos, se realizaron diluciones seriadas decimales empleando 9 mL de agua estéril (Ver figura 6).

Entre cada proceso de nebulización, tratamiento e identificación microbiológica, se efectuó la descontaminación del interior y exterior de la cámara mediante la pulverización de alcohol etílico al 70% marca Merck. El desinfectante fue retirado utilizando toallitas estériles Kimtech Science (Kimberly-Clark) y posteriormente la cámara fue colocada dentro de una campana de extracción Thermo scientific Herasafe KS durante 10 minutos para facilitar la evaporación completa del alcohol residual.

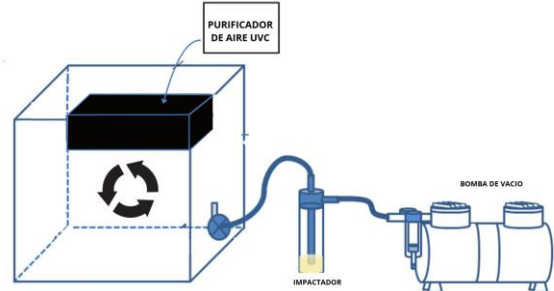


Figura 6. Muestreo de aire

III. RESULTADOS

A. Inactivación de los agentes patógenos

Con el fin de asegurar la efectividad en la dispersión de los microorganismos, se examinaron las concentraciones virales tras el procedimiento de nebulización sin emplear radiación UVC (tabla 1), buscando determinar el periodo de exposición ideal para cada microorganismo.

Este análisis es necesario puesto que las dimensiones de las partículas repercuten notablemente en el rendimiento de la

nebulización. En el caso de los virus MS2, Q β y ϕ X174, se observó una subida paulatina de la carga viral al prolongar el tiempo de nebulización hasta los 10 minutos; superando este lapso, no se percibieron aumentos con relevancia estadística ($P > 0,05$).

TABLA I
POBLACIONES SUPERVIVIENTES DE VIRUS SOMETIDOS A TONIFICACIÓN Y CIRCULACIÓN SIN IRRADIACIÓN UVC-LED

Parámetro	SUPERVIVENCIA DE LA POBLACIÓN DE MICROORGANISMOS EN RELACIÓN CON EL TIEMPO DE NEBULIZACIÓN SIN TRATAMIENTO CON LED UV (log PFU/vol)				
VIRUS	0 min	1 min	3 min	5 min	10 min
MS2	8.45 $\pm$ 0.51 A	7.96 $\pm$ 0.36 A	7.88 $\pm$ 0.21 A	8.01 $\pm$ 0.38 A	8.00 $\pm$ 0.43 A
Q β	7.09 $\pm$ 0.06 A	6.84 $\pm$ 0.43 A	6.88 $\pm$ 0.52 A	6.92 $\pm$ 0.47 A	6.91 $\pm$ 0.63 A
ϕ X174	4.95 $\pm$ 0.11 A	5.07 $\pm$ 0.13 A	5.15 $\pm$ 0.26 A	5.03 $\pm$ 0.24 A	5.09 $\pm$ 0.31 A

^aLog UFP por unidad de volumen de la cámara (22 litros).

^bLos datos representan las desviaciones estándar medias de tres réplicas. Los valores seguidos de las mismas letras mayúsculas dentro de las filas no presentan diferencias significativas ($p > 0.05$).

El cálculo del coeficiente de tasa de inactivación. Tanto la constante de velocidad de inactivación (K) como el grado de disminución conseguido tras suministrar una dosis unitaria de 1 mJ/cm² se establecieron empleando las pendientes de las ecuaciones de regresión lineal en escala logarítmica; dichos resultados se detallan en la tabla 2.

TABLA II
CONSTANTE DE TASA DE INACTIVACIÓN Y VALORES D_{5D} CALCULADOS PARA VIRUS TRAS LA IRRADIACIÓN CON LED UVC

VIRUS	CONTANTE DE TASA DE INACTIVACION K(cm ² /mJ) ^b	D _{5d} ^c
MS2	0.25 $\pm$ 0.06 D	52.37 $\pm$ 9.72 A
Q β	0.38 $\pm$ 0.08 D	43.21 $\pm$ 5.09 B
ϕ X174	1.94 $\pm$ 0.17 C	5.80 $\pm$ 0.36 DE

^aLos datos representan las desviaciones estándar $\pm$ medias de tres réplicas. Los valores seguidos de las mismas letras dentro de las columnas no presentan diferencias significativas ($P > 0.05$).

^bk se determinó a partir de la primera etapa lineal de las líneas de población supervivientes aplicadas al logaritmo de cola lineal.

^cD_{5d} Los valores indican las dosis de UV necesarias para una reducción de 5 logaritmos obtenida a partir de la ecuación del modelo de Weibull.

Para los virus MS2, Q β y ϕ X174 se determinaron constantes de activación de k de 0.25, 0.38 y 1.94 cm²/mJ, respectivamente, observándose que ϕ X174 presentó la mayor sensibilidad a la radiación UV entre los microorganismos evaluados. Dicha tendencia concuerda con las investigaciones anteriores acerca de la disminución de la capacidad infecciosa viral a través de la esterilización de aire y agua con tecnología LED UVC, en las cuales el virus ϕ X174 exhibió una vulnerabilidad mayor con respecto al virus MS2.

B. Calidad del aire

Los valores de los sensores son medidos y visualizados a través de la interfaz gráfica, en este caso notamos que a las

12:30 el valor del PM10 sobrepasó el valor umbral de seguridad. El purificador de aire se activó y pudo estabilizarlo mejorando también el PM2.5 en un tiempo de 15 min. En el caso del CO el cambio fue más brusco, pero también se pudo normalizar. La detección ocurre en tiempo real Como se puede ver en la figura 7.

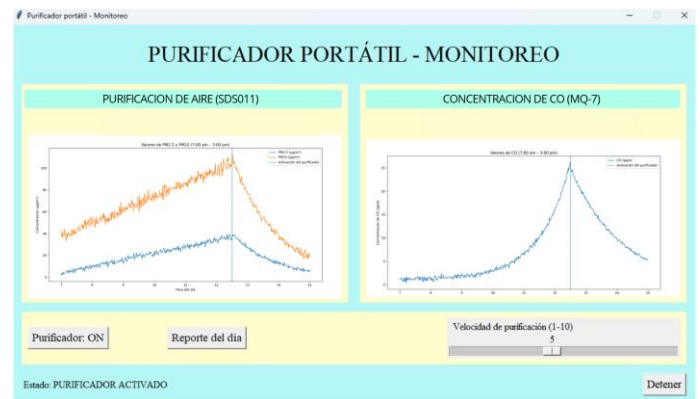


Figura 7. Medición del PM y del CO

V. CONCLUSIONES

Se determinó que la eficiencia del proceso de inactivación depende de las características propias de cada microorganismo observándose una mayor susceptibilidad del virus ϕ X174 frente a la radiación UVC. En comparación con los virus MS2 y Q β . Estos resultados son consistentes con investigaciones previas relacionadas con la desinfección mediante radiación ultravioleta, lo que valida la confiabilidad del sistema implementado.

Por otro lado, la integración de sensores del material particulado (PM2.5 y PM10) y monóxido de carbono permitió monitorear en tiempo real las condiciones ambientales, logrando activar automáticamente los sistemas de ventilación y desinfección cuando se detectaron niveles contaminantes superiores a los valores establecidos. Esta automatización contribuyó a la estabilización de los parámetros de calidad del aire en tiempos reducidos evidenciando la eficiencia operativa del prototipo desarrollado.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a la Universidad Nacional del Callao en virtud de las lecciones aprendidas y las valiosas sugerencias y recomendaciones que nos ha proporcionado.

REFERENCIAS

- [1] S. Kapse *et al.*, "Conceptual Design of a UVC-LED Air Purifier to Reduce Airborne Pathogen Transmission—A Feasibility Study," *Fluids*, vol. 8, no. 4, Apr. 2023, doi: 10.3390/fluids8040111.
- [2] H. Garg *et al.*, "UVC-Based Air Disinfection Systems for Rapid Inactivation of SARS-CoV-2 Present in the Air,"

- Pathogens*, vol. 12, no. 3, Mar. 2023, doi: 10.3390/pathogens12030419.
- [3] O. Kocak and U. Bunyatova, "Integrating smart air purifiers in building controls: A conceptual approach to infection and energy management," *Energy Reports*, vol. 13, pp. 2545–2554, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.egy.2025.01.072.
- [4] A. Tiwari, M. Awasthi, A. Chauhan, D. Tiwari, and Mr. S. Kumar, "Fabrication And Testing of Advance Air Purifier with Viral Filter," *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 13, no. 5, pp. 5746–5753, May 2025, doi: 10.22214/ijraset.2025.71491.
- [5] G. R. Allen, K. J. Benner, and W. P. Bahnfleth, "Inactivation of Pathogens in Air Using Ultraviolet Direct Irradiation Below Exposure Limits," *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 126, 2021, doi: 10.6028/jres.126.052.
- [6] S. Park, R. Mistrick, and D. Rim, "Performance of upper-room ultraviolet germicidal irradiation (UVGI) system in learning environments: Effects of ventilation rate, UV fluence rate, and UV radiating volume," 2022.
- [7] C. S. Heilingloh *et al.*, "Susceptibility of SARS-CoV-2 to UV irradiation," *Am. J. Infect. Control*, vol. 48, no. 10, pp. 1273–1275, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.ajic.2020.07.031.
- [8] J. M. F. Zhang *et al.*, "Development of an air purifier with UVC radiation and HEPA filter in the context of COVID-19," *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, vol. 27, no. 6, pp. 1113–1122, 2022, doi: 10.1590/S1413-415220220114.
- [9] P. Li *et al.*, "Evaluation of an Air Cleaning Device Equipped with Filtration and UV: Comparison of Removal Efficiency on Particulate Matter and Viable Airborne Bacteria in the Inlet and Treated Air," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, no. 23, Dec. 2022, doi: 10.3390/ijerph192316135.
- [10] A. Moskal, W. Jagodowicz, A. Penconek, and K. Zaraska, "Low-Cost Sensor System for Air Purification Process Evaluation," *Sensors*, vol. 24, no. 6, Mar. 2024, doi: 10.3390/s24061769.
- [11] Y. Hu, S. Sun, Xiajie, and Y. Jiang, "Design of an IoT Air Disinfection Machine Control System," in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics, 2023. doi: 10.1088/1742-6596/2562/1/012063.
- [12] S. N. Brammagiri and S. R. K., "IoT Enabled Smart Air Purifier," *International Journal of New Innovations in Engineering and Technology*, vol. 24, 2024.
- [13] K. A. Mohamed Junaid, Y. Sukhi, Y. Jeyashree, and K. Mohana Sundaram, "PIR sensor-based automatic solar-powered UVC LED sterilizer lamp," *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, vol. 17, no. 1, Apr. 2024, doi: 10.2478/ijssis-2024-0037.
- [14] T.-P. Sun, C.-T. Huang, P.-W. Lui, Y.-T. Chen, and H.-L. Shieh, "Novel Measurement System for Linear Array Type UVC Germicidal System," in *IEEE Eurasia Conference on Biomedical Engineering, Healthcare and Sustainability*, Japon: IEEE, Aug. 2019.
- [15] W. Song, M. Li, and N. Xie, "Air purifier based on sensorless DC motor and composite photocatalyst technique," in *Advanced Materials Research*, 2012, pp. 1519–1525. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.546-547.1519.
- [16] M. Anitha and L. S. Kumar, "Development of an IoT-Enabled Air Pollution Monitoring and Air Purifier System," *Mapan - Journal of Metrology Society of India*, vol. 38, no. 3, pp. 669–688, Sep. 2023, doi: 10.1007/s12647-023-00660-y.
- [17] N. Marini *et al.*, "Multi_Scale_Tools: A Python Library to Exploit Multi-Scale Whole Slide Images," *Front. Comput. Sci.*, vol. 3, Aug. 2021, doi: 10.3389/fcomp.2021.684521.
- [18] N. Chavhan *et al.*, "APAH: An autonomous IoT driven real-time monitoring system for Industrial wastewater," *Digital Chemical Engineering*, vol. 14, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.dche.2025.100217.