

Identificación de aerosoles por correlación en señales atenuadas por esparcimiento de luz

M. en C. Teth Azrael Cortes Aguilar, MSC. Adriana Tovar Arriaga

Resumen – El uso de aerosoles para desinfección de superficies y aire es una de las técnicas utilizadas para contener la propagación del virus SARS-COV-2. Sin embargo, su eficacia depende de las características del aerosol y del atomizador que lo genera. En este artículo utilizamos la correlación de señales atenuadas por esparcimiento de luz para identificar el tipo de atomizador. A través de este método se logró identificar tres de cuatro atomizadores y medir el tiempo promedio de suspensión en el aire de la solución desinfectante. El análisis de los resultados aportó información relevante que permitió obtener conclusiones sobre la eficacia del atomizador para acciones de desinfección.

Índice de Términos – Aerosol, Esparcimiento de Luz, Correlación

I. INTRODUCCIÓN

La pandemia sin precedentes de COVID-19 se ha convertido en una amenaza para la salud pública global, se estima que para el primer trimestre de 2022 alcanzará los 6 millones de muertes acumuladas [1], debido a su alta contagiosidad y al surgimiento de variantes como Delta y Ómicron, que se transmiten con mayor facilidad y tienden a disminuir la eficacia de tratamientos y anticuerpos. Las personas liberan fluidos respiratorios en forma de gotitas de distintos tamaños de 5-10 μ m al exhalar, al hablar, al cantar, al hacer ejercicio, al toser y al estornudar. Cuando una persona habla en voz alta durante un minuto puede producir miles de gotitas por segundo y al menos mil de estas contienen el virus, las cuales pueden permanecer suspendidas en el aire por varios minutos y de esta forma

al ser inhaladas por personas sanas, se desencadenan nuevas infecciones [2]. Un evento de contagio por transmisión aérea implica que una persona infectada exhale el virus en un espacio interior por un tiempo prolongado, exposiciones mayores a 15 minutos eleva la concentración del virus y la capacidad de transmitir la infección a personas localizadas a más de 2 metros, en algunos casos, una persona sana que pasa por ese espacio, puede infectarse, aun cuando la persona infectada se haya retirado del lugar, porque las pequeñas gotas infecciosas aún permanecen suspendidas en el aire [3]. Por otro lado, gotas de mayor tamaño caen rápidamente y pueden contaminar superficies, elevando el riesgo de contagio por transferencia al tocar boca, nariz y ojos.

En el pasado, se han usado con éxito sistemas de desinfección mediante atomizadores de ozono, dióxido de cloro y peróxido de hidrógeno para controlar epidemias de ántrax, influenza y norovirus humanos. Sin embargo, la eficacia de estos sistemas depende del tamaño del aerosol desinfectante, de la humedad y del tiempo de contacto. Gotas de 10-30 μ m de tamaño pueden permanecer más tiempo en la atmósfera y son una alternativa para desinfectar espacios cerrados [4].

Las técnicas de eliminación de agentes patógenos por generación de aerosoles con soluciones desinfectantes pueden neutralizar el virus SARS-COV-2 al entrar en contacto con las partículas exhaladas por personas infectadas, además al incrementar la humedad de la atmósfera del lugar se acelera la precipitación de las partículas en suspensión, de tal manera que ayuda a reducir el contagio por transmisión aérea y por contacto de superficies contaminadas.

Documento recibido el 25 de Marzo de 2022. Este trabajo fue apoyado en parte por la unidad académica Zapopan del Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez (ITJMMPyH), instituto descentralizado del Tecnológico Nacional de México (TecNM). Camino Arenero No. 11011, Col. El Bajío, CP. 45019, Zapopan, Jalisco, México. www.tecmm.edu.mx

T. A. Cortes Aguilar es profesor con perfil PRODEP en la carrera de ingeniería Electrónica en la unidad académica Zapopan del ITJMMPyH, e-mail: teth.cortes@zapopan.tecmm.edu.mx.

A. Tovar Arriaga es profesora con perfil PRODEP en la Carrera de ingeniería en Sistemas Computacionales en la unidad académica Zapopan del ITJMMPyH, e-mail: adriana.tovar@zapopan.tecmm.edu.mx

La identificación y caracterización de las partículas de aerosoles puede ayudar a comprender mejor el proceso de aplicación de desinfectantes mediante atomizadores. En este artículo presentamos un arreglo óptico, que a través de la medición de la intensidad de la señal de luz recibida en un sensor y del cálculo del coeficiente de correlación de Pearson, se logra identificar el atomizador que lo generó, para después inferir características sobre su capacidad de desinfección.

El presente artículo se dividió de la siguiente forma: En la sección I se hace una breve descripción de la formación de aerosoles. En la sección II de metodología, se describen los atomizadores del ensayo, el arreglo óptico utilizado para la medición de señales atenuadas por esparcimiento de luz y el procedimiento para el cálculo del coeficiente de correlación. En la sección III se muestran las mediciones de la intensidad de la luz láser normalizadas, detectadas por el sensor del arreglo óptico. En la sección IV se presentan los resultados y en la sección V las conclusiones.

A. Aerosoles

Los aerosoles son estructuras mecánicas de fluidos complejas generadas por la desintegración de una lámina líquida o un chorro en gotitas en un gas circundante. Según la inercia del líquido, la tensión superficial y las fuerzas aerodinámicas del chorro, se identifican varios regímenes de pulverización [5], como se muestra en la Fig. 1 y que se describen a continuación.

Régimen de Rayleigh. Se usa para chorros de muy baja velocidad de inyección, del orden de 10 m/s, donde la ruptura de la lámina líquida se produce por el crecimiento de inestabilidades en la superficie por efecto de la tensión superficial. Las gotas que se generan de esta forma son de tamaño uniforme y mayor al diámetro de salida del orificio de descarga.

Primer régimen inducido por interacción aerodinámica. En este régimen la atomización se produce lejos del inyector y las gotas tienen un diámetro similar al del orificio de descarga. Este régimen se debe a velocidades de inyección más elevadas, donde las fuerzas aerodinámicas son más importantes que la tensión superficial.

Segundo régimen inducido por interacción aerodinámica. Las gotas generadas por este régimen tienen un diámetro promedio mucho menor al del orificio de descarga. La ruptura se produce a una distancia más cercana y está en función de la velocidad de inyección. Debido al incremento de la velocidad de inyección, en la superficie cilíndrica del chorro se presentan oscilaciones de pequeña escala producidas por la turbulencia y la interacción de las fuerzas aerodinámicas predominantes.

Régimen de atomización: Produce gotas con un diámetro mucho menor al del orificio de salida. La ruptura

ocurre cada vez más cerca del inyector de forma proporcional al incremento de la velocidad de inyección. Y debido a que las velocidades de inyección son más elevadas respecto al régimen anterior, otros mecanismos como la turbulencia o la cavitación son las causantes de la pulverización.

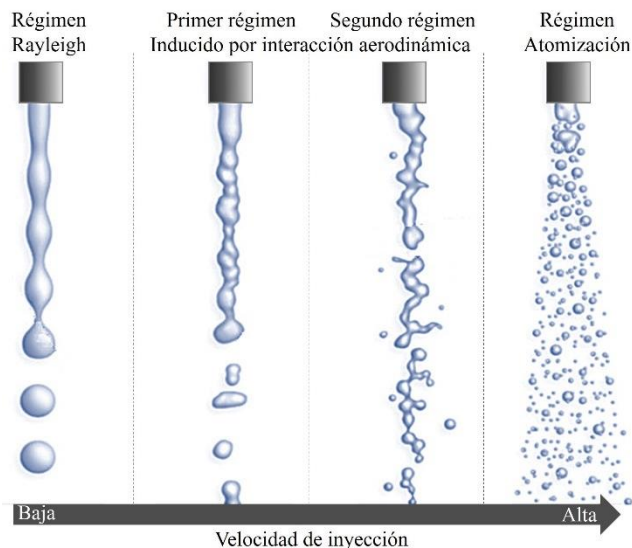


Fig. 1. Esquema de regímenes de pulverización. Fuente: elaboración propia.

La estructura del aerosol depende de una gran cantidad de factores que incluyen las propiedades del líquido de inyección, las propiedades del gas circundante y las características del inyector. Sin embargo, se pueden identificar dos regiones principales [6], como se muestra en la Fig. 2.

La región de formación del aerosol se localiza debajo de la boquilla del inyector y se caracteriza por la presencia de un núcleo líquido o lamina líquida. En la ruptura primaria se produce estructuras líquidas grandes y se debe a inestabilidades durante la penetración del líquido en el gas del ambiente. En la ruptura secundaria los grandes cuerpos líquidos irregulares creados a partir de la ruptura primaria, se rompen por segunda vez en pequeñas gotas esféricas.

La región de aerosoles se localiza en el campo lejano donde el flujo se dispersa por completo en nubes de pequeñas gotas esféricas. Mientras que las gotitas más pequeñas tienen bajas velocidades y se evaporan rápidamente, las gotitas de mayor tamaño viajan más lejos y más rápido pero pueden sufrir rupturas secundarias y posibles colisiones. Al final de la región de pulverización el líquido se evapora por completo, pero la tasa de evaporación dependerá de la temperatura del gas circundante y de las gotas.

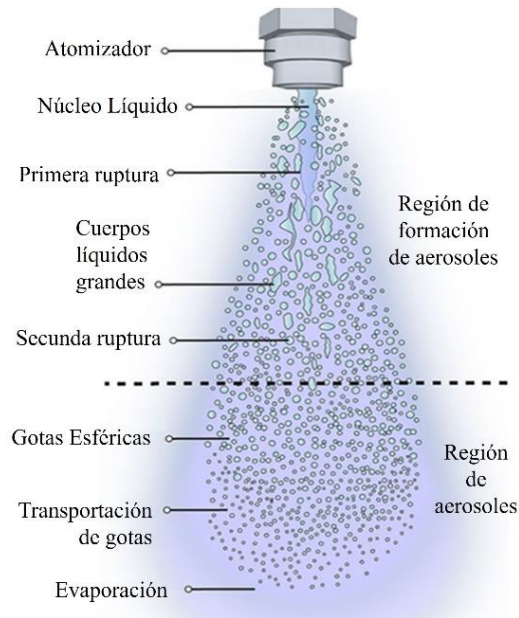


Fig. 2. Formación de aerosoles a la salida de inyector del aspersor. Fuente: Berrocal, E. (2006).

II. METODOLOGÍA

En la primera parte de esta sección se describen los atomizadores desinfectantes utilizados en este estudio. En la segunda parte se describe el arreglo óptico utilizado para la identificación de aerosoles por esparcimiento de luz láser. En la tercera parte se describe la ecuación y el procedimiento utilizado para el cálculo del coeficiente de Pearson.

B. Atomizadores

La Fig. 3 muestra la aproximación del diámetro del orificio de salida de los cuatro atomizadores desinfectantes utilizados en el ensayo. La aproximación se realizó por escala fotográfica al diámetro externo medido del atomizador. El atomizador A es del tipo de activación por botón y el atomizador B es del tipo de activación por gatillo, ambos de baja presión de 15 a 20 psi. Los atomizadores C1 y C2 utilizan gas propelente en recipientes presurizados de 30 psi a 110 psi, pero puede variar según las especificaciones del fabricante, temperatura y nivel de consumo del producto.

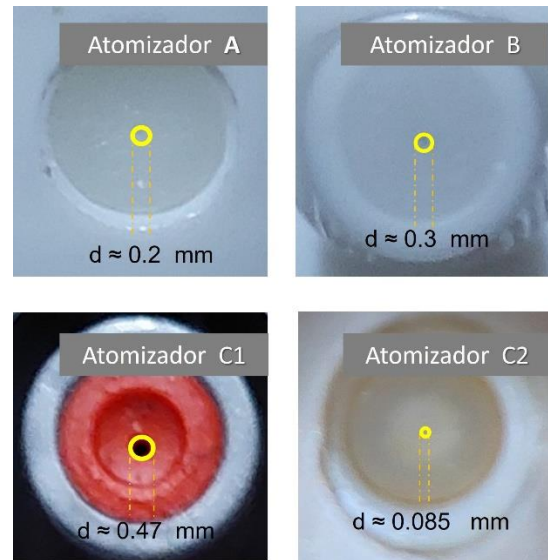


Fig. 3. Aproximación del diámetro del orificio de salida de los atomizadores de prueba. Fuente: elaboración propia.

Los atomizadores A y B generan los aerosoles durante un instante de tiempo corto, mientras que los atomizadores C1 y C2 generan el aerosol mientras se mantenga activado el botón pulsador. Para este tipo de atomizadores no se puede regular la presión del depósito de la cual depende la velocidad de inyección y que a su vez afecta el tamaño de la gota. Por esta razón, para futuros ensayos se desarrolló el prototipo de la Fig. 4, el cual permite regular la presión de la entrada de aire a través de un compresor externo, hasta 40 psi. No obstante, en el presente trabajo, si se utilizó el arreglo óptico de la Fig. 4 para recabar los datos del ensayo. Los fabricantes de atomizadores [7] para desinfección señalan que un tamaño de la gota ultra fina menor a $10\mu\text{m}$, ver Tabla I, es más eficiente para desinfectar el aire y superficies.

Tabla I. Caracterización del aerosol por el diámetro de la gota y el tipo de pulverizador. Fuente: IKEUCHI (2020)

Ultra fina	Fina	Semi-fina	Semi-gruesa	Gruesa
Niebla seca	Niebla	Llovizna	Lluvia ligera	Lluvia
$< 10\mu\text{m}$	10-100 μm	100-300 μm	0.3-1 mm	$> 1\text{mm}$

C. Arreglo óptico

Los métodos de esparcimiento de luz, donde un haz láser pasa a través de la región de aerosoles se prefieren para estimar las características físicas de las gotas, porque permite recabar una gran cantidad de datos en un periodo de tiempo relativamente corto [8], [9]. Conforme la luz pasa a través del aerosol, presenta dispersiones múltiples

que desvían la intensidad de la luz de su trayectoria. Pero al aumentar la densidad del aerosol por efecto de un incremento de la presión en el atomizador, se dificulta obtener mediciones precisas sobre el diámetro de las gotas y su velocidad. Por otro lado, otras investigaciones utilizan imágenes y redes neuronales convolucionales CNN [10] para identificar patrones en la región de formación de aerosoles sin proponer una caracterización del aerosol como los métodos de esparcimiento láser y efecto Doppler [8]. Sin embargo, para algunas aplicaciones no es necesario caracterizar por completo las gotas que forman el aerosol, por ejemplo, en los sistemas de transporte solo es necesario identificar y clasificar el tipo de niebla que afecta la visibilidad de los conductores o los sensores de navegación [11] para generar señales de advertencia. En el mismo sentido, la identificación de aerosoles por el tipo de atomizador utilizado es relevante para determinar su eficacia en procesos de desinfección. En este trabajo, proponemos adaptar el método de pérdida de intensidad de luz láser por esparcimiento para identificar de manera sencilla el tipo de atomizador.

En la Fig. 4 se muestra el prototipo del arreglo óptico donde la entrada de agua, líquido desinfectante y aire a presión se hacen por separado. El prototipo muestra el arreglo óptico utilizado en las mediciones, el cual está conformado por un diodo láser y un sensor alineados sobre el eje óptico del haz láser. En el lado izquierdo del gabinete se instaló el diodo láser que emite luz de 550nm de longitud de onda, y del lado derecho se instaló una fotoreistencia, de tal manera que la luz del láser siempre incide directamente sobre el sensor.

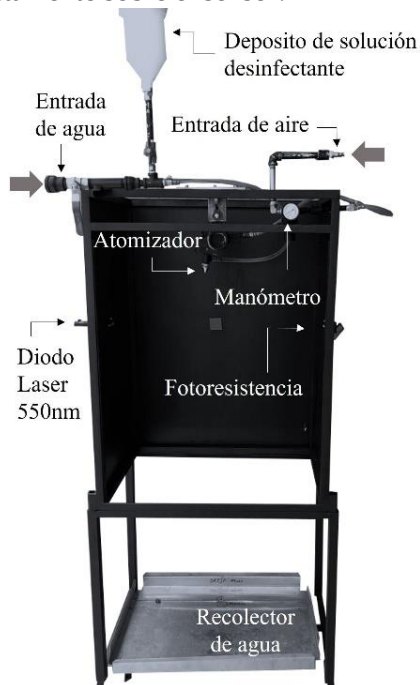


Fig. 4. Prototipo del arreglo óptico para la identificación

y caracterización de aerosoles. Fuente: elaboración propia.

En la Fig. 5 se muestra la fotografía del haz láser atravesando una región del cono que forman los aerosoles a la salida del atomizador. Al centro de la imagen se observa que las gotas de líquido esparcen la luz. Entre mayor sea la intensidad de luz esparcida por los aerosoles menor será la intensidad de la luz láser detectada por la fotoreistencia. Las mediciones de los atomizadores A, B, C1 y C2 se realizaron con el arreglo óptico descrito anteriormente, como se muestra en la Fig. 5, conservando una separación de 20 cm entre el atomizador y el haz láser. Las señales detectadas por la fotoreistencia se guardaron como un continuo de datos, que posteriormente se utilizaron para realizar la identificación del atomizador mediante el coeficiente de Pearson.

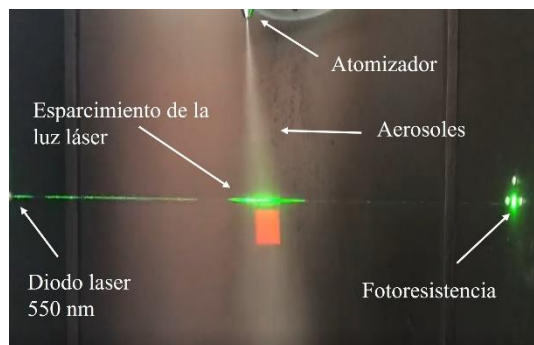


Fig. 5. Fotografía del haz de luz láser pasando a través del aerosol. Fuente: elaboración propia.

D. Coeficiente de correlación de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson que se calcula mediante la ecuación (1) mide el grado de relación lineal entre dos variables continuas [12]. Cuando no existe una relación entre estas dos variables el coeficiente de correlación tiende a cero. Por el contrario, si ambas variables aumentan o disminuyen a la vez, el coeficiente es positivo y tiende a +1, pero si una variable incrementa mientras la otra disminuye, entonces el coeficiente es negativo y el coeficiente tiende a -1.

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

Cabe señalar, que para comparar los conjuntos de datos mediante el cálculo del coeficiente de Pearson fue necesario ajustar la escala de sus magnitudes a un rango de 0 a 1 mediante la siguiente ecuación de normalización.

$$x_{norm} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (2)$$

El análisis de los datos y las gráficas que se muestran en el presente artículo se realizó en MATLAB versión 2018b. El cálculo del coeficiente de Pearson que se reporta en la sección de resultados se llevó a cabo de acuerdo al siguiente procedimiento:

1. Los valores x_i de (1) se obtuvieron de la señal el sensor del arreglo óptico que detecta la intensidad de luz atenuada debido a la presencia de los aerosoles producidos por los atomizadores A, B y C1, ver grafica superior de Fig. 13-15 y por los atomizadores A, B y C2, ver grafica superior de Fig. 16.
2. Los valores de y_i de (1) son los datos del promedio de la intensidad normalizada de los atomizadores A, B, C1 y C2 que se muestran en las gráficas de las Fig. 6, 8, 10 y 12 respectivamente.
3. El coeficiente de Pearson se calculó haciendo un corrimiento de los datos de y_i contra los datos de x_i , obteniendo las gráficas inferiores de las Fig. 13-16.
4. Finalmente en las gráficas del coeficiente de Pearson se busca si la posición del pico con el valor más grande coincide con la posición de la señal del atomizador contra el que se está realizando la correlación. En las gráficas inferiores de las Fig. 13-16 el pico máximo del coeficiente de correlación se marca con la línea roja vertical sobrepuesta en la gráfica.

III. MEDICIONES DE INTENSIDAD NORMALIZADA DE LUZ

En esta sección se muestran las gráficas de la intensidad normalizada de luz que detecta el sensor del arreglo óptico después de sufrir atenuación por esparcimiento debido a la presencia de aerosoles en su camino óptico. Se recolectaron 20 muestras de la intensidad de la luz láser en la fotoreistencia para cada uno de los atomizadores. La Fig. 5 presenta la intensidad normalizada contra el número de muestras para el atomizador A. De forma similar, la Fig. 7 muestra la intensidad normalizada para el atomizador B, la Fig 9 para el atomizador C1 y la Fig. 11 para el atomizador C2.

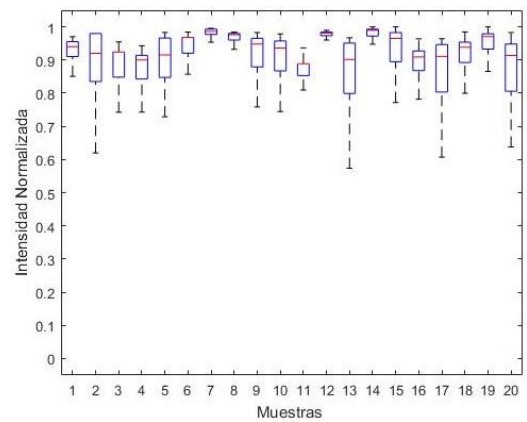


Fig. 5. Intensidad normalizada en la fotoreistencia para 20 muestras del atomizador A. Fuente: elaboración propia.

Las muestras de la Fig. 5 se promediaron para obtener un perfil del comportamiento de la intensidad normalizada en la fotoreistencia para el atomizador A, como se presenta en la Fig 6. De forma similar la Fig 8 muestra el perfil promedio de la intensidad normalizada para el atomizador B, la Fig. 10 para el atomizador C1 y la Fig. 12 para el atomizador C2.

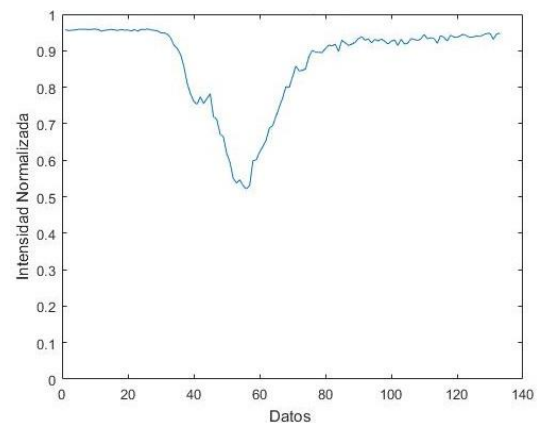


Fig. 6. Promedio de la intensidad normalizada para el atomizador A. Fuente: elaboración propia.

Se puede observar a partir de las gráficas de las Fig. 6, 8, 10 y 12 que el perfil promedio de intensidad normalizada presenta rasgos que permiten diferenciar un tipo de atomizador de otro por la forma en como atenúan la luz láser. La atenuación de la intensidad de la luz que recibe el sensor se manifiesta como una caída lineal seguida de un incremento lineal conforme se reduce la densidad del aerosol en el aire. La duración de la atenuación depende de la velocidad de inyección y del tamaño de la gota.

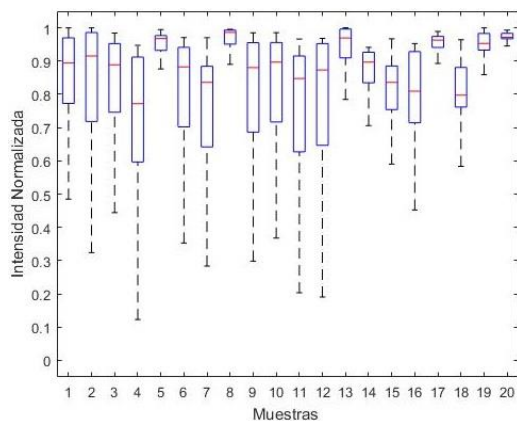


Fig. 7. Intensidad normalizada en la fotoresistencia para 20 muestras del atomizador B. Fuente: elaboración propia.

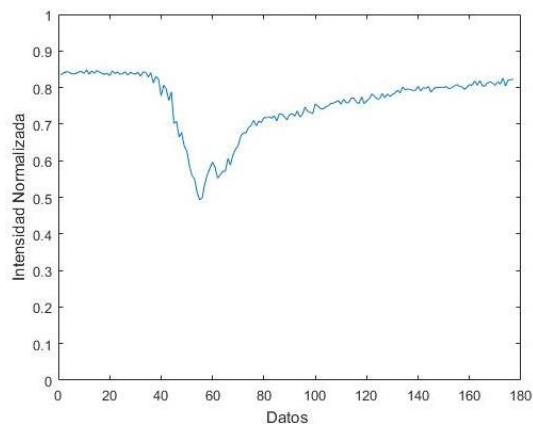


Fig. 10. Promedio de la intensidad normalizada para el atomizador C1. Fuente: elaboración propia.

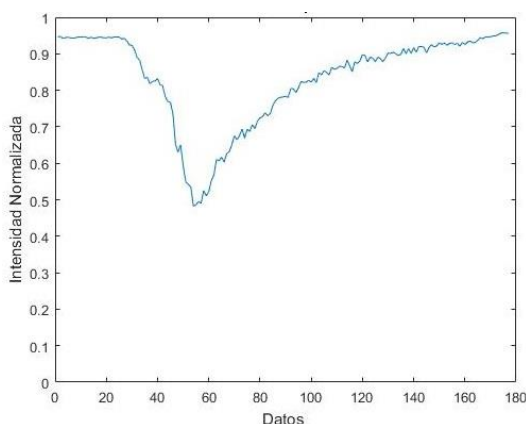


Fig. 8. Promedio de la intensidad normalizada para el atomizador B. Fuente: elaboración propia.

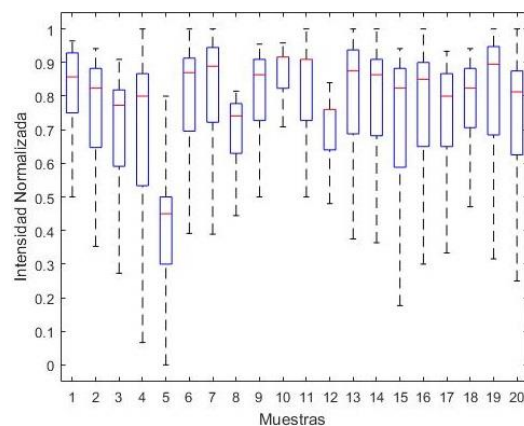


Fig. 11. Intensidad normalizada en la fotoresistencia para 20 muestras del atomizador C2. Fuente: elaboración propia.

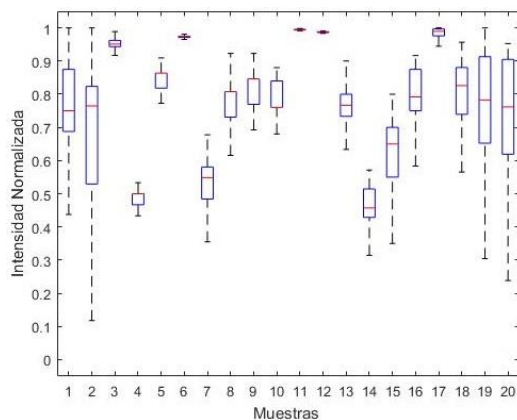


Fig. 9. Intensidad normalizada en la fotoresistencia para 20 muestras del atomizador C1. Fuente: elaboración propia.

La grafica de la Fig. 12 muestra que la atenuación se prolongó por más tiempo, es decir, el ancho del perfil abarca una mayor cantidad de datos afectados. Lo anterior se debe a que el atomizador C2 produce un tamaño de gota ultra fina o de niebla seca, a consecuencia del menor diámetro del orificio de salida y de utilizar gas propelente para impulsar la salida de la solución desinfectante.

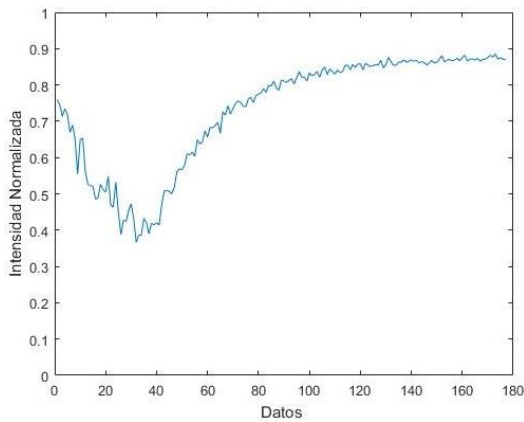


Fig. 12. Promedio de la intensidad normalizada para el atomizador C2. Fuente: elaboración propia.

IV. RESULTADOS

En la gráfica superior de la Fig. 13 se muestra la señal de la intensidad atenuada detectada en el sensor del arreglo óptico para la presencia de los aerosoles generados por los atomizadores A, B y C1. La grafica inferior de la Fig. 13 muestra el resultado del coeficiente de correlación de Pearson al comparar por desplazamiento hacia la derecha contra la gráfica promedio de la intensidad normalizada para el atomizador A de la Fig. 6. La línea en color rojo señala el pico en donde se obtuvo el máximo valor de correlación, el cual coincide con la posición del atomizador A, es decir se logra identificar correctamente el tipo de atomizador.

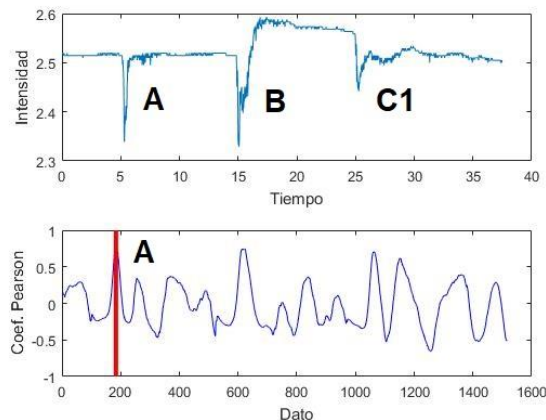


Fig. 13. Resultado de la correlación de la señal detectada para los atomizadores A, B y C1 contra señal promedio de la intensidad normalizada del atomizador A. Fuente: elaboración propia.

La gráfica superior de la Fig. 14 muestra los mismos datos de la señal de la Fig. 13, pero en esta ocasión, la correlación se hace contra la gráfica promedio de la intensidad normalizada del atomizador B de la Fig. 8. La línea en color rojo de la gráfica inferior de la Fig. 14

señala que se logró identificar correctamente el tipo de atomizador al coincidir el pico máximo del coeficiente de Pearson con la posición del atomizador B.

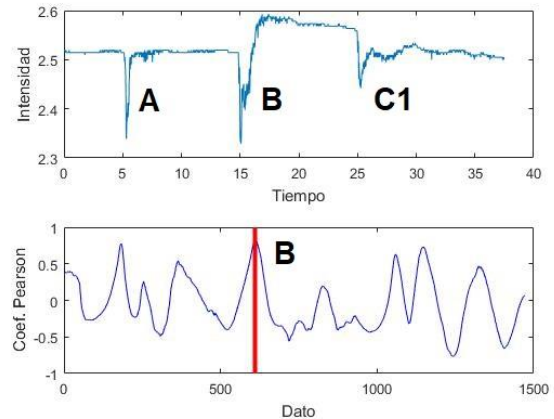


Fig. 14. Resultado de la correlación de la señal detectada para los atomizadores A, B y C1 contra señal promedio de la intensidad normalizada del atomizador B. Fuente: elaboración propia.

La gráfica superior de la Fig. 15 muestra los mismos datos de la señal de las Fig. 13 y 14, pero en esta ocasión, la correlación se hace contra la gráfica promedio de la intensidad normalizada del atomizador C1 de la Fig. 10. La grafica inferior de la Fig. 15 muestra que el pico máximo de correlación no coincide con la posición de C1, es decir, no se logró identificar con éxito el tipo de atomizador.

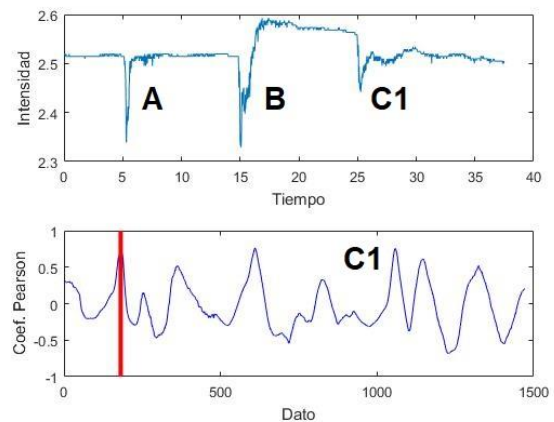


Fig. 15. Resultado de la correlación de la señal detectada para los atomizadores A, B y C1 contra señal promedio de la intensidad normalizada del atomizador C1. Fuente: elaboración propia.

La gráfica superior de la Fig. 16 muestra una señal diferente a las anteriores de la intensidad atenuada detectada por el sensor debido a la presencia de aerosoles generados por los atomizadores A, B y C2. La grafica inferior de la Fig. 16 muestra el resultado del coeficiente

de correlación contra la gráfica promedio de la intensidad normalizada del atomizador C2 de la Fig. 12. La línea en color rojo de la gráfica inferior de la Fig. 16 señala que se logró identificar correctamente el tipo de atomizador al coincidir el pico máximo del coeficiente de Pearson con la posición del atomizador C2.

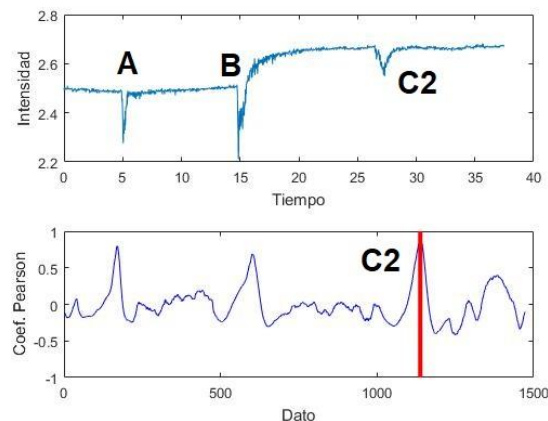


Fig. 16. Resultado de la correlación de la señal detectada para los atomizadores A, B y C2 contra señal promedio de la intensidad normalizada del atomizador C2. Fuente: elaboración propia.

La Fig. 17 muestra las mediciones del tiempo promedio que permanecen las partículas de los aerosoles A, B, C1 y C2 suspendidas en el aire. Estos datos estadísticos se obtuvieron del análisis de los datos de las señales de intensidad atenuada por esparcimiento de la luz. Se observa que los atomizadores A y B producen aerosoles que permanecen menos tiempo suspendidos en el aire debido a gotas de mayor diámetro y baja presión al momento de inyección del líquido. Por el contrario los aerosoles C1 y C2 permanecen mucho más tiempo suspendidos en el aire, debido a gotas más pequeñas y a mayores velocidades de inyección a la salida del atomizador.

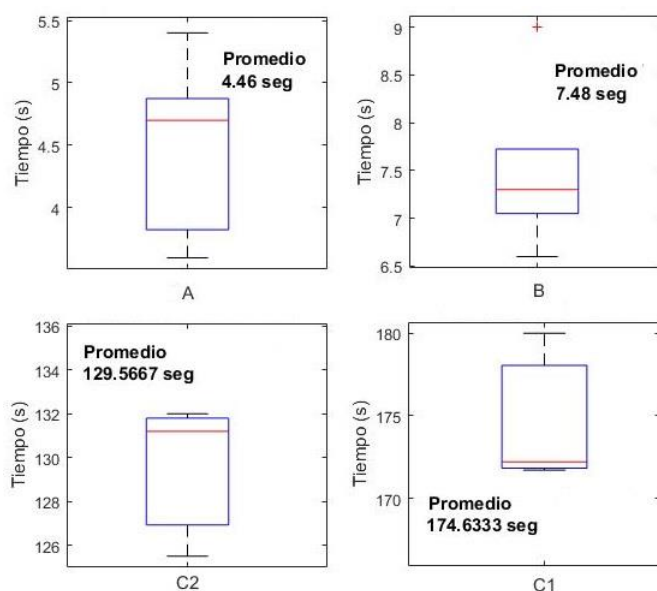


Fig. 17. Tiempo promedio de suspensión en el aire de los aerosoles generados por los atomizadores A, B, C1 y C2. Fuente: elaboración propia

V. CONCLUSIONES

En este artículo se presentaron los resultados de identificación de aerosoles por correlación en señales atenuadas por esparcimiento de luz, logrando identificar de forma exitosa los aerosoles de los atomizadores A, B y C2. Pero las características del atomizador de C1 producen un aerosol difícil de identificar debido a la poca uniformidad de las muestras de intensidad normalizada, Fig. 9. La mayor rapidez de salida del inyector C1 y su menor diámetro de gota, hace que se evapore rápidamente, como consecuencia, suponemos que disminuye su efecto desinfectante y no contribuye a la precipitación de partículas infecciosas suspendidas en aire.

Por el contrario aerosoles de niebla seca producidos por atomizadores como C2 permanecen más tiempo suspendidos en el aire de forma estable y pueden ayudar a desinfectar más eficientemente el aire del entorno, mientras que los atomizadores A y B que producen aerosoles clasificados como llovizna incrementan la humedad del entorno y facilitan la desinfección por precipitación, pero consideramos que son más apropiados para desinfectar superficies.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los profesores German Rodríguez Flores y Oscar Raymundo Olvera Chávez, así como a los estudiantes Jesús Kenhiro Kobayashi Aguirre y Brayan Alejandro García Téllez de la carrera de Ingeniería Electrónica de la unidad académica Zapopan del Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez por el apoyo parcial para la realización del presente proyecto.

REFERENCIAS

- [1] World Health Organization, “WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard”. <https://covid19.who.int> (consultado el 22 de febrero de 2022).
- [2] S. Tang *et al.*, “Aerosol transmission of SARS-CoV-2? Evidence, prevention and control”, *Environment International*, vol. 144, p. 106039, nov. 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.106039.
- [3] M. C. Jarvis, “Aerosol Transmission of SARS-CoV-2: Physical Principles and Implications”, *Frontiers in Public Health*, vol. 8, 2020, Consultado: el 22 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpubh.2020.590041>
- [4] M. H. Khan y H. Yadav, “Sanitization During and After COVID-19 Pandemic: A Short Review”, *Trans Indian Natl. Acad. Eng.*, vol. 5, núm. 4, pp. 617–627, dic. 2020, doi: 10.1007/s41403-020-00177-9.
- [5] C. Bekdemir, “Numerical modeling of diesel spray formation and combustion”, Eindhoven University of Technology, 2008.
- [6] E. Berrocal, “Multiple scattering of light in optical diagnostics of dense sprays and other complex turbid media”, Cranfield University, United Kingdom, 2006. Consultado: el 18 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/3983>
- [7] IKEUCHI, “Efficiency of disinfection and droplet size”, *IKEUCHI EUROPE B.V.*, el 12 de mayo de 2020. <https://www.ikeuchi.eu/news/efficiency-of-disinfection-and-droplet-size/> (consultado el 25 de febrero de 2022).
- [8] A. Corber, W. A. Chishty, y P. Vena, “Planar LIF/MIE ratio droplet sizing using structured laser sheet imaging at elevated ambient pressures”, *J. Glob. Power Propuls. Soc.*, vol. 4, pp. 38–47, may 2020, doi: 10.33737/jgpps/115249.
- [9] Y. N. Mishra, E. Kristensson, y E. Berrocal, “Reliable LIF/Mie droplet sizing in sprays using structured laser illumination planar imaging”, *Opt. Express*, OE, vol. 22, núm. 4, pp. 4480–4492, feb. 2014, doi: 10.1364/OE.22.004480.
- [10] A. H. Nobari, F. Khorasani-Gerdehkhouchi, N. Gulam, y N. Ashgriz, “Application of Deep Learning Convolutional Neural Network for Spray Characterization”, presentado en 7th International Conference on Fluid Flow, Heat and Mass Transfer (FFHMT’20), nov. 2020. doi: 10.11159/ffhmt20.190.
- [11] P. Duthon, M. Colomb, y F. Bernardin, “Fog Classification by Their Droplet Size Distributions: Application to the Characterization of Cerema’s Platform”, *Atmosphere*, vol. 11, núm. 6, Art. núm. 6, jun. 2020, doi: 10.3390/atmos11060596.
- [12] A. G. Asuero, A. Sayago, y A. G. González, “The Correlation Coefficient: An Overview”, *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, vol. 36, núm. 1, pp. 41–59, ene. 2006, doi: 10.1080/10408340500526766.