

Análisis de ventilación en el interior de una ambulancia del Servicio de Emergencias Médicas Extrahospitalarias (SEME) del Paraguay, estudio de caso

Vivian González Benítez¹, Luis Casco Morínigo¹, Matías Recalde Cáceres¹, Diego Genes Ovelar¹, Elías Ríos Romero¹, Gustavo Grommeck Macedo¹, Oscar Vázquez¹, Rodrigo Ayala Garozzo¹, Joel Doriggoni Mendoza¹, Liz Esquivel Maldonado¹, Jorge Kurita Nagasawa¹

¹Laboratorio de Energía y Fluidos Computacional, Departamento de Ingeniería Mecánica y Electromecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, Paraguay.
Email: lefc@fiuna.edu.py

Resumen

Durante la pandemia de COVID-19, la preocupación por el riesgo de contagio de enfermedades transmitidas por el aire en espacios cerrados se intensificó, destacando la necesidad de identificar áreas de estancamiento de aire que pudieran incrementar dicho riesgo. Este estudio se centró en analizar este problema en el interior de ambulancias paraguayas, con el objetivo de localizar y reducir las zonas de estancamiento de aire para maximizar la seguridad tanto del personal médico, como de los pacientes y posibles acompañantes. Para lograr esto, se realizaron simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) utilizando un modelo CAD de uno de los prototipos de ambulancias más comunes del Servicio de Emergencias Médicas Extrahospitalarias (SEME) de Paraguay. A través de diferentes configuraciones de ventilación y tipos de ventiladores, se evaluaron las opciones más efectivas para mejorar la circulación del aire dentro del vehículo. Los resultados de las simulaciones permitieron proponer recomendaciones específicas para minimizar el riesgo de contagio por aerosoles en el interior de las ambulancias, optimizando así las condiciones de seguridad.

Palabras clave: ventilación; CFD; ambulancia.

1. Introducción

La presente investigación nace ante la necesidad de poder combatir de manera óptima las ya conocidas enfermedades respiratorias, tales como la influenza, el síndrome respiratorio agudo (SARS) y la más reciente, que fue causa de una pandemia que golpeó al mundo de forma repentina a principios de los 2020, conocida como COVID-19.

Todo esto derivó en la implementación de pautas de seguridad y cambios de estilo de vida en la población. Estudios previos, como los de Jones et al. [1], Pöhlker et al. [2] y Tang et al. [3], comprobaron que la transmisión de enfermedades respiratorias se ve facilitada por el transporte de gotas y aerosoles que son exhalados por el ser humano pudiendo permanecer en el aire durante largos periodos de tiempo. Teniendo en cuenta dicha problemática, podemos afirmar que en una cabina de ambulancia, donde los personales de blanco transportan a una persona con una posible infección, la situación se torna en una con un riesgo muy elevado de transmisión de patógenos.

Si uno quisiera maximizar su seguridad y la de los demás ante dichas enfermedades, la mejor solución

sería transportarse individualmente para tener un aislamiento social máximo. Dicha solución, sin embargo, no es aplicable para los paramédicos y el personal de blanco que, a pesar de utilizar la indumentaria de protección obligatoria, se encuentran expuestos a estas infecciones de manera más directa que cualquier otra persona.

Una buena ventilación del interior de la cabina podría contribuir a la eyección de aerosoles y así bajar las tasas de infección, teniendo en cuenta que los aerosoles son capaces de filtrarse a través de mascarillas y que las emisiones de éstos a través del habla, tos y estornudos son prácticamente imposibles de evitar. En un trabajo previo hecho por Lu et al. [4], se estudió el flujo de aire de un sistema de aire acondicionado dentro de un restaurante en China, pudiendo demostrar que las rutas del flujo de aire eran un factor crucial en la propagación del virus. También en un trabajo hecho por Ai et al. [5] se realizaron mediciones y evaluaciones de la transmisión aérea del COVID-19 entre los ocupantes de una habitación en un lapso corto de tiempo. En esta publicación se constató que la proximidad entre personas aumenta el riesgo de contagio a un grado mucho mayor. Con base en estas publicaciones y sus resultados, buscamos una

manera de poder diseñar un sistema de ventilación mucho más óptimo en un espacio cerrado para ambulancias paraguayas del Sistema de Emergencias Médicas Extrahospitalarias (SEME). A través de un análisis de mecánica de fluidos computacional (CFD), se analizarán puntos de estancamiento para el sistema original ya instalado en la ambulancia, y se modificarán el tamaño de los ventiladores eyectores y sus caudales para ofrecer alternativas que otorgan un mejor flujo de aire. Trabajos similares, como los de Kehler et al. [6], Li [7], Cocârță et al. [8], Kurita et al. [9] y Chau et al. [10] se han llevado a cabo en esta línea de investigación para contextos similares, en distintas localidades del mundo, y han demostrado la importancia de considerar el impacto de la ventilación de espacios cerrados en el bienestar de las personas que los ocupan.

2. Metodología

2.1. Modelado y simulación

2.1.1. Recopilación de datos y preparación del modelo

El modelo de diseño asistido por computadora (CAD) para la simulación, observado en la **Figura 1**, fue hecho a partir del plano de un vehículo tipo furgoneta adaptado para ser usado como ambulancia por el Servicio de Emergencias Médicas Extrahospitalarias (SEME) de Paraguay. Las dimensiones de la cabina y la ubicación del mobiliario se encontraban especificadas en el plano, así como la ubicación de las rejillas del ingreso de aire y de los extractores. Se convirtió este plano en un modelo tridimensional utilizando Solidworks, asegurando que las dimensiones sean precisas y reflejen fielmente la estructura real de la ambulancia.

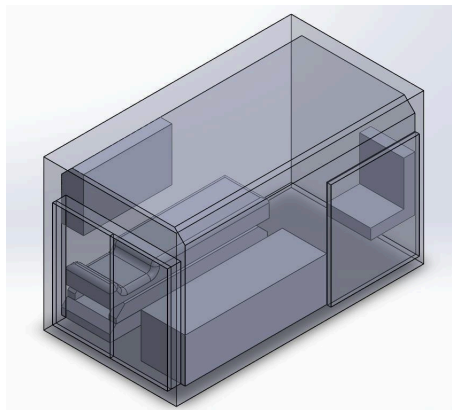


Figura 1. Modelo CAD de ambulancia de estudio.

2.1.2. Definición de condiciones de frontera y parámetros de simulación

Para la configuración de la simulación, se consideraron tres parámetros principales:

- 1) El caudal de aire de entrada, que representa la cantidad de aire fresco que ingresa a la ambulancia y es un valor constante, dictado por el sistema de aire acondicionado de la ambulancia.
- 2) El caudal de aire de salida, que varía en función del modelo de ventilador utilizado en la ambulancia para la extracción de aire.
- 3) Los diámetros de los extractores de aire, los cuales también dependen del modelo de ventilador seleccionado para la ambulancia.

También se establecieron otras condiciones de simulación relevantes, como la temperatura y la presión ambiental. La humedad y otros parámetros ambientales no son considerados en este análisis. La temperatura en el interior de la ambulancia es de unos 20 °C, y la presión en el interior de la misma es unos 12 Pa menor que la presión atmosférica, para evitar el ingreso a su interior de agentes patógenos. En la **Tabla 1** pueden citan las condiciones de frontera aplicadas para la simulación.

Tabla 1. Condiciones de frontera aplicadas

| Superficie | Condición | Valor |
|------------|-------------------|-----------|
| Entrada A | Caudal de entrada | 680 cfm |
| Salida B | Caudal de salida | * |
| Paredes | Presión absoluta | 101313 Pa |

*: según extractor, ver **Tabla 2**.

Las superficies en el interior de la ambulancia son consideradas adiabáticas y sin rugosidad, para simplificar el análisis y reducir la carga computacional. Dichas superficies incluyen muebles, instrumentos y paredes.

2.1.3. Configuración de la cabina

La disposición de mobiliario y equipos en el interior de la ambulancia se indican en la **Figura 2**.

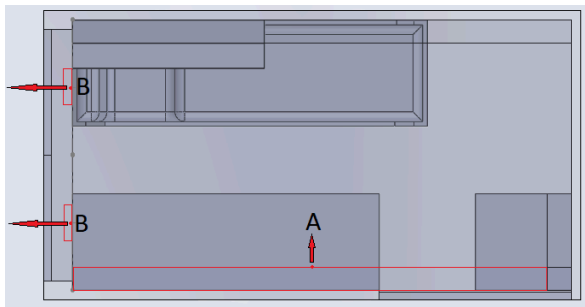


Figura 2. Vista del modelo CAD, con entrada en A y salidas en B

El ingreso de aire al interior del habitáculo se da a través de las tomas de aire acondicionado, indicadas como la superficie resaltada en color rojo en **A** en la **Figura 2**. La extracción se da a través de dos ventiladores, ubicados en la parte posterior, en las superficies indicadas en rojo en **B**.

Las características de los ventiladores seleccionados para el análisis se detallan en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Lista de ventiladores utilizados

| Nombre | Diámetro | Caudal | Área [m ²] |
|--------------|----------|-----------------------|------------------------|
| Ventilador 1 | 102 mm | 517 m ³ /h | 0.002601 |
| Ventilador 2 | 102 mm | 700 m ³ /h | 0.002601 |
| Ventilador 3 | 102 mm | 270 cfm | 0.002601 |
| Ventilador 4 | 76 mm | 200 cfm | 0.001444 |
| Ventilador 5 | 12 in | 900 cfm | 0.023226 |
| Ventilador 6 | 4 in | 100 cfm | 0.002581 |
| Ventilador 7 | 133 mm | 695 m ³ /h | 0.004442 |

Además, con el caudal y el área como datos conocidos, es posible calcular la velocidad promedio del fluido para cada ventilador, para ellos se utilizan las ecuaciones de conservación de masa (1) y (2), según White [11].

$$\int_{CV} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \sum_i (\rho_i A_i v_i)_{out} - \sum_i (\rho_i A_i v_i)_{in} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{Q_{in}}{4} = A_{salida} \cdot v_{salida} \quad (2)$$

Donde ρ es la densidad del aire a 101313 [Pa] y 20°C, el fluido de trabajo se considera incompresible; por lo tanto, la densidad es constante. Las áreas de sección transversal A_i se miden en las superficies de entrada y salida. Las velocidades v_i se calcularán a partir de la ecuación de conservación de masa (1), donde los caudales de entrada en **A** y de salida en **B** (consulte la **Figura 2**) son valores de las especificaciones del acondicionador de aire y del ventilador, respectivamente. El componente diferencial del tiempo se despreciará ya que estamos analizando en una condición de estado estacionario. Las velocidades v_i se detallan en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Espesor de capa límite δ según extractor

| Nombre | $\frac{Q_{in}}{4}$ [m ³ /s] | v_{out} [m/s] |
|--------------|--|-----------------|
| Ventilador 1 | 0,035903 | 13,80 |
| Ventilador 2 | 0.048611 | 18,69 |
| Ventilador 3 | 0,031857 | 12,25 |
| Ventilador 4 | 0,023597 | 16,34 |
| Ventilador 5 | 0,106188 | 4,57 |
| Ventilador 6 | 0,011799 | 4,57 |
| Ventilador 7 | 0,048264 | 10,87 |

2.1.4. Configuración de mallado

Es importante seleccionar un nivel de mallado adecuado para el análisis, para ello es necesario definir el espesor de la capa límite. Para esto, se utiliza la ecuación (1), para flujos laminares, y la ecuación (2), para flujos turbulentos, según Incropera [12].

$$\frac{\delta}{x} \approx \frac{5}{Re_x^{1/2}} \quad (3)$$

$$\frac{\delta}{x} \approx \frac{0.16}{Re_x^{1/7}} \quad (4)$$

En este análisis, el flujo es considerado como un flujo laminar cuando $Re_x < 5 \cdot 10^3$. Se considera flujo de transición a turbulento cuando $Re_x > 5 \cdot 10^3$. El número de Reynolds en una placa plana se define como:

$$Re_x = \frac{\rho v_x x}{\mu} \quad (5)$$

Nuevamente, como se ha mencionado, se asumió que el fluido es incompresible y que tiene una viscosidad dinámica constante μ . Los valores x locales se toman de las dimensiones del caso más desfavorable en la geometría de entrada y salida. Luego, se calcularon los espesores de la capa límite en las ubicaciones críticas.

En la **Tabla 4** se presentan los espesores de capa límite para cada caso analizado.

Tabla 4. Espesor de capa límite δ según extractor

| Nombre | Re_x | δ [mm] |
|--------------|--------------------|---------------|
| Ventilador 1 | $97,4 \times 10^3$ | 3,79 |
| Ventilador 2 | 132×10^3 | 3,57 |
| Ventilador 3 | $86,5 \times 10^3$ | 3,88 |
| Ventilador 4 | $85,9 \times 10^3$ | 2,90 |
| Ventilador 5 | $96,4 \times 10^3$ | 11,36 |
| Ventilador 6 | $32,1 \times 10^3$ | 3,79 |
| Ventilador 7 | 100×10^3 | 4,92 |

Para todos los casos se seleccionó un nivel de mallado 5, de manera a asegurar que éste sea lo suficientemente fino para capturar los detalles del flujo de aire en el interior del habitáculo de la ambulancia, pero sin generar un consumo excesivo de la memoria computacional.

3. Resultados

Los resultados serán presentados a continuación. Cada figura contiene tres planos distintos en los cuales se analiza la circulación de aire: el plano (a) se encuentra al nivel del techo de la ambulancia, el plano (b) se encuentra a la altura de la boca del paciente (a 80 cm del suelo aproximadamente), y el plano (c) se encuentra al nivel del piso.

Para la comprensión de las imágenes, es importante mencionar que las áreas en rojo indican zonas con una buena circulación de aire, las áreas en amarillo una circulación aceptable, las áreas de color verde una mala circulación, y las áreas en celeste y azul indican tendencias al estancamiento de aire, con velocidad prácticamente nula. Esto se detalla en la **Tabla 4**.

A su vez, en la **Tabla 5** se detalla un resumen cualitativo de circulación del aire en cada plano para cada ventilador.

Tabla 4. Valoración de circulación de aire según color

| Color | Valoración de Circulación |
|--------|---------------------------|
| Red | Muy buena |
| Yellow | Aceptable |
| Green | Mala |
| Blue | Muy mala (estancamiento) |

Tabla 5. Circulación de aire en planos analizados según ventilador utilizado

| Nombre | Techo | Nivel Paciente | Piso |
|--------------|-----------|----------------|-----------|
| Ventilador 1 | Mala | Muy buena | Buena |
| Ventilador 2 | Aceptable | Buena | Buena |
| Ventilador 3 | Aceptable | Aceptable | Aceptable |
| Ventilador 4 | Mala | Mala | Mala |
| Ventilador 5 | Mala | Aceptable | Mala |
| Ventilador 6 | Muy mala | Aceptable | Muy mala |
| Ventilador 7 | Mala | Mala | Mala |

En la **Figura 3** se observan los resultados de la simulación para la primera configuración, con dos ventiladores tipo 1. Puede observarse un pequeño punto de estancamiento en la parte posterior al nivel del techo, pero una mejor circulación al nivel del paciente y del piso.

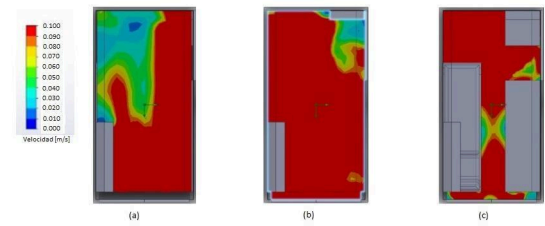


Figura 3. Resultados de la simulación para la primera configuración, con ventiladores de 102 mm de diámetro y caudal de 517 m³/h

En la **Figura 4** se presentan los resultados de la simulación para la segunda configuración, con ventiladores del tipo 2. El punto de estancamiento (punto azul) visto previamente al nivel del techo se disipó, y se observa una circulación similar a la de la configuración 1 al nivel del paciente y del piso.

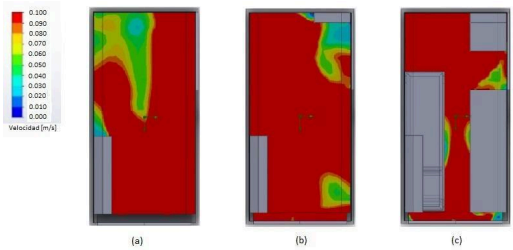


Figura 4. Resultados de la simulación para la segunda configuración, con ventiladores de 102 mm de diámetro y caudal de 700 m³/h

En la **Figura 5** se muestran los resultados de la simulación para la configuración con ventiladores del tipo 3. Puede apreciarse un nuevo punto de estancamiento hacia el lado izquierdo en el plano al nivel del techo. Por otro lado, se observa una circulación menos óptima en el plano al nivel del paciente, aunque al nivel del piso permanece similar a las anteriores.

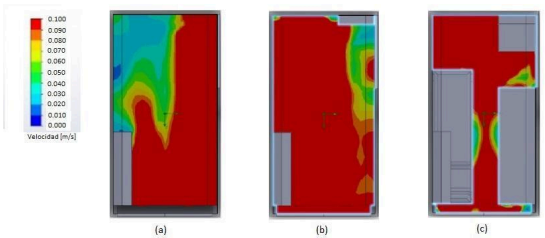


Figura 5. Resultados de la simulación para la tercera configuración, con ventiladores de 102 mm de diámetro y caudal de 270 cfm

En la **Figura 6**, los resultados de la simulación para una configuración con los ventiladores del tipo 4, muestran un estancamiento de aire en la esquina superior izquierda (zona de color azul) en el plano correspondiente al techo de la ambulancia, y zonas de color amarillo en las que la circulación del aire disminuye. También se vieron afectados los planos (b) y (c), donde la circulación de aire disminuyó en comparación con las configuraciones anteriores. Que el estancamiento se sitúe en el techo no implica que los virus o bacterias no puedan proliferar en el interior del habitáculo, pues este análisis se lleva a cabo suponiendo el funcionamiento del aire acondicionado. Sin embargo, cuando el mismo no se encuentre en funcionamiento, existirá una ventana de tiempo que podría permitir la multiplicación de estos organismos si no se lleva a cabo una limpieza adecuada.

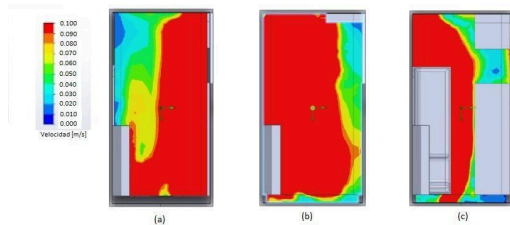


Figura 6. Resultados de la simulación para la cuarta configuración, con ventiladores de 76 mm de diámetro y caudal de 200 *cfm*

En la **Figura 7** los resultados de la simulación para una configuración con ventiladores del tipo 5, indican que los puntos de estancamiento azules no son extensos pero aumentan en cantidad. La circulación en el plano (a) del techo no es muy buena en la esquina superior izquierda, pero se denota una mejora en comparación con la configuración anterior. En el plano al nivel del paciente y personal de blanco, se puede observar una circulación de aire aceptable, aunque deteriorada en contraste con las imágenes de las dos primeras configuraciones.

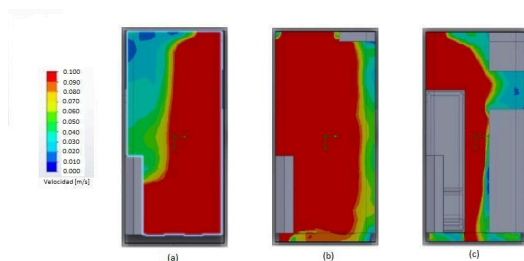


Figura 7. Resultados de la simulación para la primera configuración, con ventiladores de 12 in de diámetro y caudal de 900 *cfm*

En la **Figura 8** los resultados de la simulación para una configuración con los ventiladores del tipo 6,

indican que existe estancamiento de aire en la esquina superior izquierda correspondiente al plano del techo de la ambulancia. A nivel del paciente, no encontramos muchas diferencias con respecto a la configuración anterior, mientras que al nivel del piso se nota una gran cantidad de puntos de estancamiento en los cuales se puede dar la proliferación de bacterias. Los resultados para este caso se pueden catalogar como los peores de entre todos los analizados anteriormente.

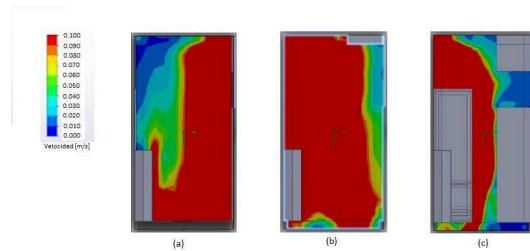


Figura 8. Resultados de la simulación para la primera configuración, con ventiladores de 4 in de diámetro y caudal de 100 *cfm*

En la **Figura 9** los resultados de la simulación para una configuración correspondiente a los ventiladores del tipo 7, proporcionan conclusiones similares a las obtenidas con la configuración de la **Figura 7**. Asimismo, comparando ambas figuras, no se observan muchos cambios para esta configuración a nivel del paciente y el piso de la ambulancia. Lo más resaltante es, reiteradamente, que existe una flota de vehículos que circulan con estas configuraciones, que fueron equipados de esta manera sin tener idea del peligro al que estarían sujetos los pasajeros.

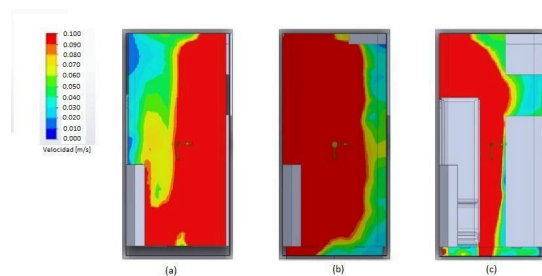


Figura 9. Resultados de la simulación para la primera configuración, con ventiladores de 133 mm de diámetro y caudal de 695 m^3/h

4. Recomendaciones

Para la configuración 1, con ventiladores de 102 mm de diámetro y caudal de 517 m^3/h , cuyos resultados se muestran en la **Figura 3**, se recomienda realizar una desinfección en la zona posterior a la altura del

techo, así como en la esquina posterior derecha al nivel de paciente.

Para la configuración 2, con ventiladores de 102 mm de diámetro y caudal de $700 \text{ m}^3/\text{h}$, cuyos resultados se muestran en la **Figura 4**, se recomiendan los mismos cuidados que para la configuración anterior.

Para la configuración 3, con ventiladores de 102 mm de diámetro y caudal de 270 cfm, cuyos resultados se muestran en la **Figura 5**, se recomienda realizar una desinfección en la zona izquierda de la cabina a la altura del techo, y en la esquina posterior derecha a la altura del paciente.

Para la configuración 4, con ventiladores de 76 mm de diámetro y caudal de 200 cfm, cuyos resultados se muestran en la **Figura 6**, se recomienda desinfectar apropiadamente la zona posterior izquierda a la altura del techo, la esquina posterior derecha a la altura del paciente, y la esquina frontal derecha en el piso del habitáculo.

Para la configuración 5, con ventiladores de 12 in de diámetro y caudal de 900 cfm, cuyos resultados se muestran en la **Figura 7**, se recomienda realizar una desinfección en la esquina posterior izquierda a la altura del techo. También se recomienda una desinfección apropiada hacia la zona derecha de la pared y el mobiliario al nivel del piso.

Para la configuración 6, con ventiladores de 4 in de diámetro y caudal de 100 cfm, cuyos resultados se muestran en la **Figura 8**, se recomienda realizar una desinfección minuciosa en la esquina posterior izquierda a la altura del techo, pues el estancamiento en esta zona es muy alto. También se recomienda desinfectar la pared derecha a la altura del paciente, y en especial, todo el piso, pues existe un alto estancamiento en ese plano.

Para la configuración 7, con ventiladores de 133 mm de diámetro y caudal de $695 \text{ m}^3/\text{h}$, cuyos resultados se muestran en la **Figura 9**, se recomienda desinfectar con cuidado la pared izquierda a la altura del techo, así como la pared derecha y el mobiliario a la altura del paciente y al nivel del piso.

5. Conclusión

El objetivo de este estudio fue identificar y reducir las zonas de estancamiento de aire en el interior de ambulancias paraguayas para minimizar el riesgo de contagio de enfermedades respiratorias.

La segunda configuración, con el ventilador de 102 mm de diámetro y caudal de $700 \text{ m}^3/\text{h}$, resultó ser la más beneficiosa debido a que existe una mejor circulación de aire y un menor estancamiento en todos los planos analizados.

En caso de equipar las ambulancias con los ventiladores menos favorables, es recomendable realizar una desinfección minuciosa de las zonas con estancamiento luego de transportar pacientes, tal y como se detalla en la sección 4.

Se recomienda además la realización de futuros trabajos similares a este, pero que incluyan a un paciente y un paramédico en el interior de la cabina y un análisis de partículas para evaluar con mayor precisión la probabilidad de transmisión de enfermedades respiratorias.

5. Agradecimientos

- Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de Asunción (FIUNA)

6. Referencias

- [1] Jones, R. M., & Brosseau, L. M. (2015). Aerosol transmission of infectious disease. *Journal of occupational and environmental medicine*, 57(5), 501-508.
- [2] Pöhlker, M. L., Pöhlker, C., Krüger, O. O., Förster, J. D., Berkemeier, T., Elbert, W., ... & Mikhailov, E. (2023). Respiratory aerosols and droplets in the transmission of infectious diseases. *Reviews of Modern Physics*, 95(4), 045001.
- [3] Tang, S., Mao, Y., Jones, R. M., Tan, Q., Ji, J. S., Li, N., ... & Shi, X. (2020). Aerosol transmission of SARS-CoV-2? Evidence, prevention and control. *Environment international*, 144, 106039.
- [4] Ai, Z., Hashimoto, K., & Melikov, A. K. (2019). Airborne transmission between room occupants during short-term events: measurement and evaluation. *Indoor air*, 29(4), 563-576.
- [5] Lu, J., Gu, J., Li, K., Xu, C., Su, W., Lai, Z., ... & Yang, Z. (2020). COVID-19 outbreak associated with air conditioning in restaurant, Guangzhou, China, 2020. *Emerging infectious diseases*, 26(7), 1628.
- [6] Kehler, P., Chaves, C., García, A., Centurion, H., Escobar, A., Lopes, L., ... & Kurita, J. (2021, November). Ventilation CFD Analysis at a Classroom as a Tool for Air Safety Verification Under COVID19 Context, a Case Study. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (Vol. 85666, p. V010T10A056). American Society of Mechanical Engineers.
- [7] Li, N. (2015). Comparison between three different CFD software and numerical simulation of an ambulance hall.
- [8] Cocârță, D. M., Prodana, M., Demetrescu, I., Lungu, P. E. M., & Didilescu, A. C. (2021). Indoor air pollution with fine particles and implications for workers' health in dental offices: A brief review. *Sustainability*, 13(2), 599.

[9] Kurita, J., Limousin, M., Ferreira, N., Ozuna, J., & Villeta, S. A. (2020, August). CFD Analysis on Air Ventilation at a Manufacturing Plant as a Tool for Designing Machine Layout, a Case Study. In 5th North American International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Detroit, Michigan, USA.

[10] Chau, O. K., Liu, C. H., & Leung, M. K. (2006). CFD analysis of the performance of a local exhaust ventilation system in a hospital ward. *Indoor and Built Environment*, 15(3), 257-271.

[11] White, F. M. (1966). *Fluid mechanics*.

[12] Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (1996). *Fundamentals of heat and mass transfer* (Vol. 6, pp. 408-409). New York: Wiley.