

## Estudio numérico de ventilación de aire para reducir riesgo de contagio SARS-CoV-2 y otros virus.

Armando Gallegos Muñoz<sup>1</sup>, Jorge Arturo Alfaro Ayala<sup>1</sup>, Aylin Alejandra Vega Amezola<sup>1</sup>, Ely Andrea Cruz Toc<sup>2</sup>, Guillermo Rivera Padilla<sup>1</sup>, Margarita Guadalupe Correa Ibarra<sup>1</sup>, Rodolfo Salvador Caudillo González<sup>1</sup>, Ingrid Yamilet Cornelio Rodríguez<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Universidad de Guanajuato, DNCE, Ingeniería Química. C.P.36050, Guanajuato, Gto., México.

<sup>2</sup>Universidad de San Carlos de Guatemala, Área de Química, Escuela de Ingeniería Química. C.P.01012, Cd. de Guatemala, Guatemala.

<sup>3</sup>Universidad de la Región Sierra, ITSS, Ingeniería Bioquímica. C.P. 86800. Teapa, Tabasco.

gallegos@ugto.mx<sup>1</sup>, ja.alfaroayala@ugto.mx<sup>1</sup>, aa.vegaamezola@ugto.mx<sup>1</sup>, 3033435750108@ingeniería.usac.edu.gt<sup>2</sup>, g.riverapadilla@ugto.mx<sup>1</sup>, mg.correaibarra@ugto.mx<sup>1</sup>, s.caudillogonzales@ugto.mx<sup>1</sup>, 18E3004@regionssierra.tecnm.mx<sup>3</sup>.

### Resumen

Debido al reciente periodo pandémico causado por el COVID-19 que puede transmitirse por medio del aire en espacios comunes con alta ocupación, surge la necesidad de estudiar la distribución de ventilación en el Auditorio "Efraín Gómez Durán" de la división de Ciencias Naturales y Exactas de la Universidad de Guanajuato usando la dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés), esta herramienta computacional proporciona información valiosa para la distribución y propagación de gotas cargadas de virus. Se estudia el estado actual del auditorio y se crean tres casos con ventilación natural y tres casos con ventilación forzada mediante simulaciones numéricas con la finalidad de encontrar una mejor ventilación en las instalaciones académicas. Los resultados muestran que en los casos con ventilación forzada simulados con varias iteraciones y partículas de CO<sub>2</sub> que representan el comportamiento de las partículas del virus en una dirección contra corriente reduce el riesgo de contagio. Se concluye que el caso 4 es la mejor propuesta de ventilación debido a que se mantienen las entradas y salidas de aire en la orientación del auditorio, con los sistemas HVAC encendidos, lo que contribuye a la disminución de vórtices y al flujo de aire total en el auditorio.

**Palabras clave:** COVID-19; ANSYS; Ventilación; Auditorio; Virus.

### Introducción

La pandemia del nuevo coronavirus (SARS-CoV-2) amenaza a todo el mundo; la salud pública y el bienestar humano. Este virus ya superó el número de contagios de otras dos epidemias en este siglo. La organización mundial de la salud (OMS) indicó que las enfermedades infecciosas virales se pueden transmitir a través de distancias relevantes para ambientes interiores, es por eso que las medidas actuales introducidas en todo el mundo, han sido diseñados para controlar la propagación del virus, incluyendo bloqueos, autoaislamiento, cubrebocas, distanciamiento social y ventilación apropiada según las condiciones presentes y respalda la posibilidad de una ruta de transmisión aérea para la mitigación del virus. WHO (2020).

La tasa de eventos respiratorios como toser y estornudar aumenta y a su vez la generación y dispersión de gotitas que contiene el virus, dichos eventos respiratorios incluyen también hablar y respirar de acuerdo con Wang et al. (2021), debido a que el tamaño de las partículas está en el rango de 60-140 nm de diámetro, éstas pueden permanecer en el ambiente por un tiempo considerable hasta que sean removidas por una corriente de aire ya sea forzada o natural. BarOn et al. (2020) menciona las precauciones donde incluyen mayor tasa de ventilación, usando ventilación natural, impedir la recirculación de aire, evitar permanecer en el flujo directo de otra persona, y minimizar el número de personas que comparten el mismo entorno. Diwan et al. (2020). Se informó que el COVID – 19 puede permanecer viable en partículas en el aire durante aproximadamente 3 horas, lo que permite el tiempo necesario para extenderse dentro de un espacio. Guo et al. (2020).

Estas precauciones se enfocan en el interior de lugares concurridos, donde el riesgo de infección es mayor, debido a la posible acumulación de gotitas portadoras en el aire, el virus probablemente tenga una mayor estabilidad en el aire interior y una mayor densidad de personas. Morawska (2006)

Lu et al. (2020) observó que el flujo de aire en un climatizador provocó un evento de infección por COVID-19 en un restaurante debido a una dirección de suministro de aire inadecuado. Kotb y Khalil (2020) utilizaron el código ANSYS - Fluent para simular la transmisión de Covid – 19 al estornudar y toser de un pasajero infectado que se movía dentro del espacio cerrado de la cabina de un avión.

Sus resultados mostraron que las gotas de estornudo tenían efectos más dañinos que las gotas de tos y ambas se mueven a largas distancias dentro de la cabina. Además, cuanto más rápido se mueve una persona más gotas se dispersan. Wang et al. (2021) investigó numéricamente la dispersión de gotitas infectadas con el virus emitidas al estornudar en una habitación de hospital con tres camas, con esto se estudió la temperatura de las gotitas de Covid – 19, sus resultados mostraron que la temperatura disminuye rápidamente del cuerpo humano al del ambiente.

## Metodología

En la presente investigación se realiza un estudio numérico de la ventilación en un auditorio de la Universidad de Guanajuato, este se encuentra en la división de Ciencias Naturales y Exactas. Dentro del inmueble se llevan a cabo conferencias, cursos y exposiciones al cual acuden al menos 100 personas por evento.

El objetivo es buscar un mejor flujo de aire dentro del espacio a fin de reducir el número de contagios de virus o cualquier enfermedad de contagio aéreo; dicho flujo se espera sea natural y, sobre todo, se desea evitar que el aire dentro del auditorio se cicle, si esto último llegará pasar el efecto sería contrario al buscado, es decir que el número de contagios aumentaría en vez de disminuir.

### Descripción del auditorio actual

Para este estudio, se seleccionó el auditorio “Efraín Gómez Durán” (Fig. 1), éste cuenta con un pequeño escenario al lado oeste del lugar, en los muros laterales se encuentran los ventanales, el aire entra por los ventanales del muro sur y sale, de manera natural, por el muro opuesto, al norte del auditorio, también cuenta con dos sistemas de aire acondicionado ubicados en el muro sur de las instalaciones y 98 asientos que se encuentran instalados sobre escalones.

El auditorio cuenta con medidas de 15.63 m (ancho) x 2.32 m (alto) x 7.41 m (largo), y cuenta con un volumen total de 328.86 m<sup>3</sup>. Al interior encontramos un pequeño escenario de 2.64 m (ancho) x 0.615 m (alto) y escalones donde están los asientos, cada escalón tiene en promedio 0.95 m (ancho) x 0.13 m (alto).

Entre el escenario y los escalones hay una distancia 1.81 m (ancho). A 14.09 m (ancho) hay un desnivel de 2.52 m (alto) donde hay una pequeña cabina de 1.54 m (ancho) x 2.52 m (alto), y que se encuentra a 1.94 m (largo) de la entrada y tiene 3.54 m (largo). En la cabina hay tres pequeñas ventanas de 0.52 m (alto) x 0.28 m (largo) y las otras dos de las mismas dimensiones de 0.52 m (alto) x 0.13 m (largo).

A los lados del auditorio hay ventanales de 1.46 m (ancho) x 2.27 m (alto), en la pared donde se encuentra la entrada hay cuatro ventanales instalados, mientras que en la pared contraria hay cinco, con una distancia promedio entre ventanas de 1.59 m (ancho).

El estado actual del auditorio es un espacio cerrado o con pocas entradas de aire natural, en el que las entradas de aire son ventanales rotos (poca ventilación).

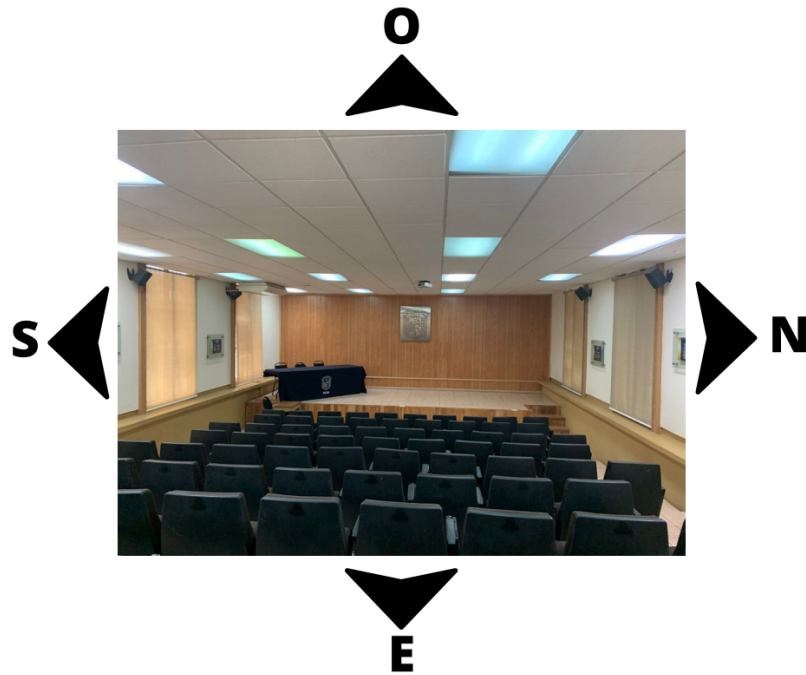


Fig. 1. Auditorio "Efraín Gómez Durán".

### Propuestas de ventilación para el auditorio

Con el fin de encontrar propuestas de sistemas de ventilación que permitan un mejor flujo y distribución de aire dentro del auditorio se realizaron simulaciones haciendo uso de la dinámica de fluidos computacional (CFD) a través de la herramienta ANSYS® V16.

Para la obtención de resultados mediante una simulación primero es necesario generar una geometría a escala del dominio, un mallado que se adecue al estudio que se desea realizar, se configura el modelo matemático, se definen las propiedades del espacio y se analizan los resultados obtenidos con intención de modificar o agregar propiedades y condiciones con el fin de obtener los resultados previstos.

Las modificaciones propuestas para mejorar el flujo de aire dentro del auditorio consisten en cambiar los viejos ventanales por ventanas

corredizas nuevas a ambos lados. Las dimensiones de estas ventanas serían de 1.46 m (ancho) x 2.27 m (alto) estas estarían divididas en tres correderas por lo que cada entrada de aire sería 0.73 m (ancho) x 0.756 m (alto). A continuación, se describen los casos de estudio Fig. 2:

- Caso 1: Se estudia el auditorio en su estado actual considerando que los sistemas de ventilación y aire acondicionado se encuentran apagados, por lo tanto, las entradas de aire serán dos pequeños ventanales rotos al lado sur del auditorio, con medidas de 0.73 m (ancho) x 0.15 m (alto), y la única salida será un pequeño ventanal roto al lado norte del auditorio con las mismas dimensiones.
- Caso 2: Se considera el mismo estado del auditorio del Caso 1, sin embargo, los sistemas de aire acondicionado y ventilación permanecen encendidos por lo que contribuyen al flujo de aire dentro del inmueble con una geometría rectangular con dimensiones de 1.12 m (ancho) x 0.1 m (alto) para uno y otro más de 0.66 m (ancho) x 0.145 m (alto).

- Caso 3: El tercer caso de estudio considera que las entradas de aire se encuentran en la parte norte del auditorio, las salidas por la parte sur y con los sistemas HVAC apagados. Las dimensiones de los ventanales modificados, por donde entrará y saldrá el aire, serían de 0.73 m (ancho) x 0.756 m (alto).
- Caso 4: Se mantienen las entradas y salidas de aire en la orientación del auditorio del Caso 3, pero, en este caso, los sistemas HVAC están encendidos contribuyendo al flujo de aire total en el auditorio. Dichos sistemas mantienen las mismas dimensiones que mencionaron con anterioridad.
- Caso 5: Las entradas de aire estarán ubicadas en parte sur del inmueble, mientras que las salidas serán por el área norte. Los sistemas HVAC estarán apagados.
- Caso 6: Se respeta la misma distribución que en el Caso 5, pero se consideran los HVAC encendidos.

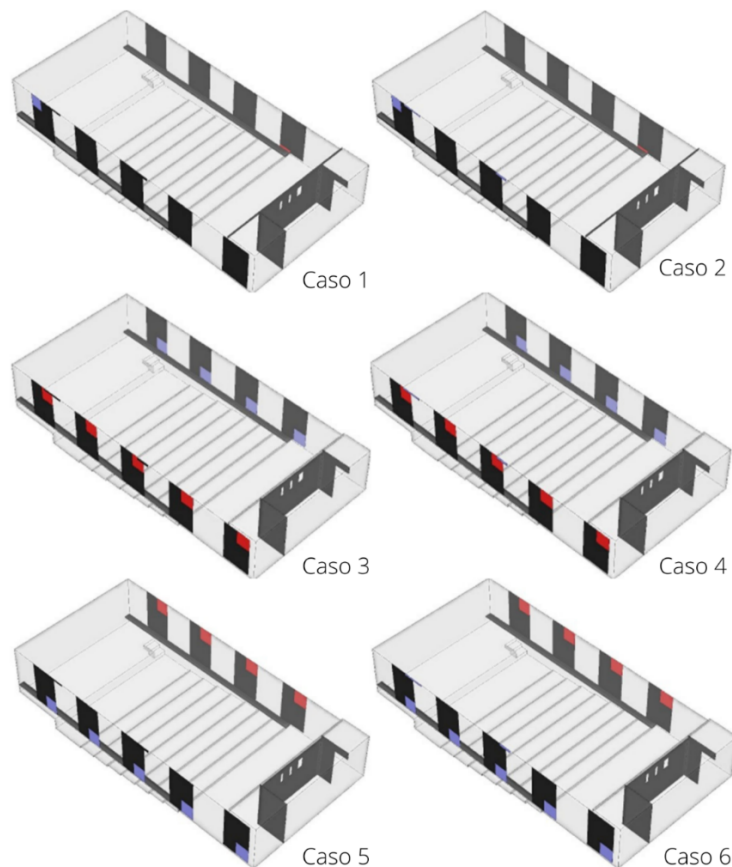


Fig. 2. Modificaciones propuestas para la ventilación del auditorio. Donde las entradas de aire están marcadas con azul y las salidas con rojo.

## Mallado del auditorio

Se configuró el software Meshing® de ANSYS® sólo al volumen del aire del auditorio (Fig. 3), es decir, que los escalones, el escenario, así como unas vigas horizontales fueron excluidos de este.

En la configuración de la malla solo se aplicó un Body Sizing de 0.2 m al volumen previamente mencionado y, como se señaló, las demás partes del modelo quedaron excluidas de dicha herramienta. La malla cuenta con un total de 353,368 elementos triangulares.

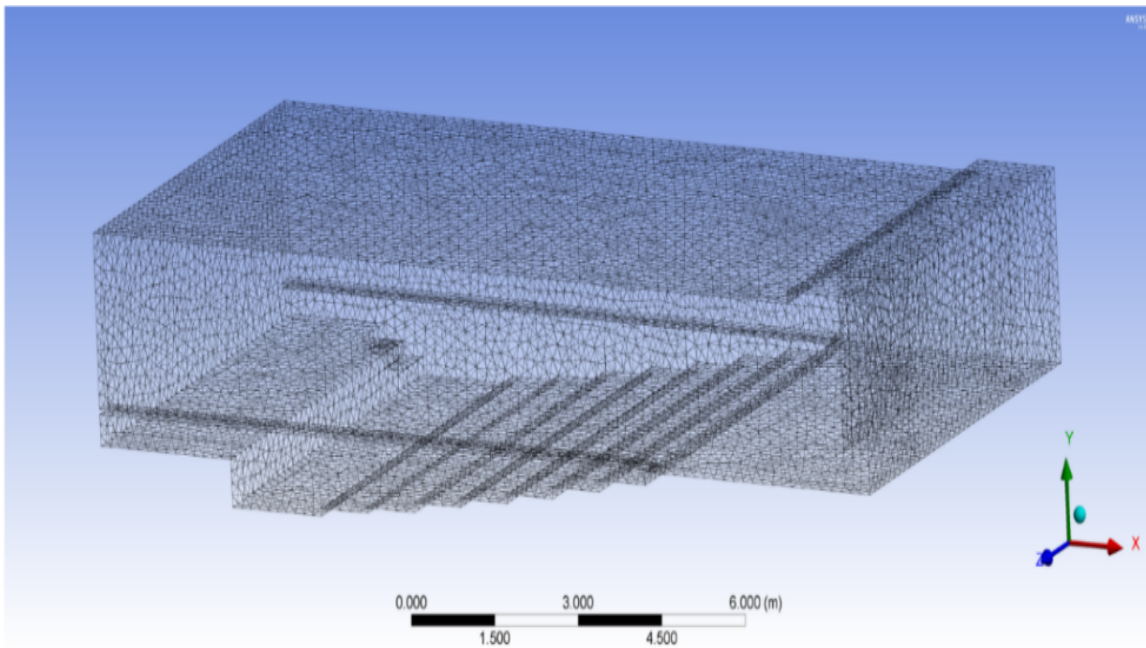


Fig. 3. Mallado del auditorio.

## Condiciones de frontera

Una vez que se configuro la malla procedemos a crear las condiciones de frontera para el auditorio y las modificaciones.

Los escalones, las paredes del espacio, las ventanas, el techo, las vigas horizontales y el escenario quedaron designados con la propiedad Wall (Fig. 4).

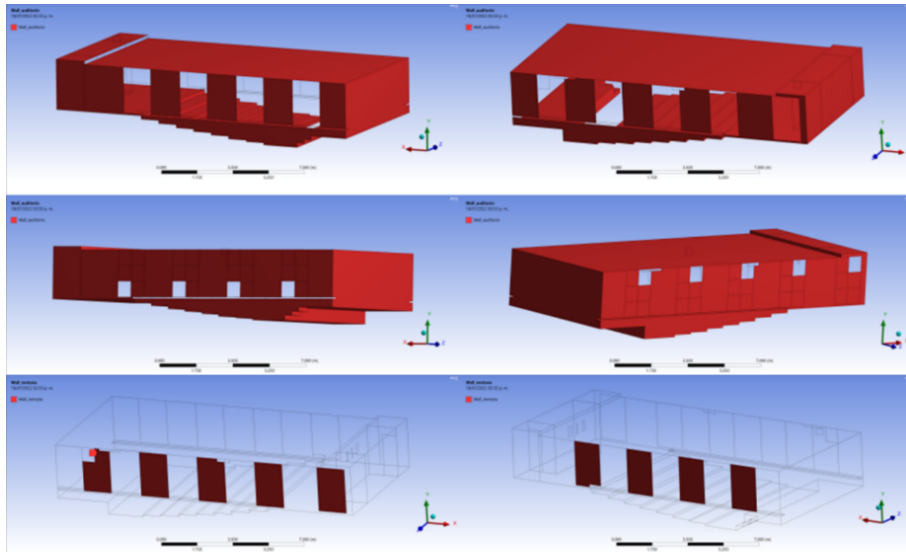


Fig. 4. Partes consideras como Wall en el modelo.

Las ventanas fueron consideradas como Velocity\_Inlet o Pressure\_Outlet (Fig. 5) dependiendo de si se trataba de una entrada o salida de aire, respectivamente. Así mismo, los sistemas HVAC que se consideran como Velocity\_Inlet en todos los casos en los que estos se encuentren encendidos (Caso 2, Caso 4 y Caso 6), de otro modo serán considerados como Wall.

Para este estudio, la puerta principal del auditorio permanecerá cerrada por lo que se considerará con la propiedad Wall. Al volumen de aire del auditorio fue asignó como Fluid (Fig. 6). Así mismo se asignó un tamaño de  $5 \times 10^{-5}$  m a las partículas de virus, según Mirzaie et al. 2021, existentes en el flujo de aire simuladas como partículas de CO<sub>2</sub>.

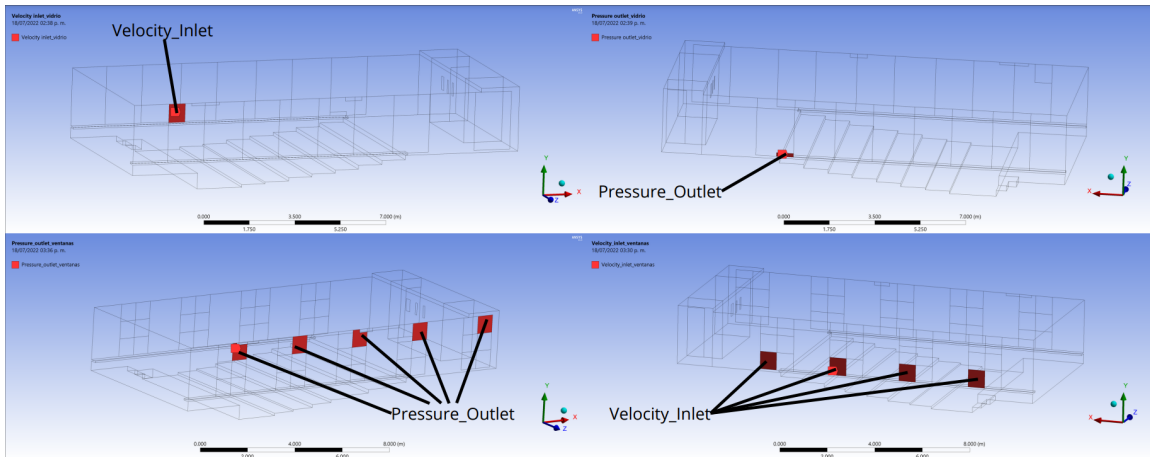


Fig. 5. Partes consideras como Velocity\_Inlet o Pressure\_Inlet en el modelo.

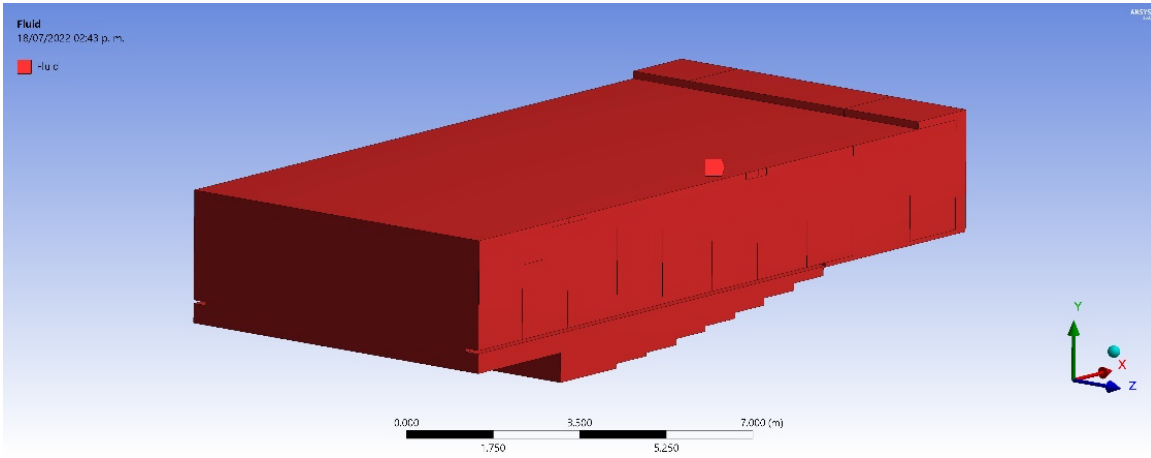


Fig. 6. Parte considerada como Fluid en el modelo.

## Método de solución

Para la solución de las diferentes simulaciones el software hace uso de diferentes modelos matemáticos. Para nuestros casos de estudio, ANSYS®, toma en cuenta dos en específico: las ecuaciones de Navier-Stokes y la ecuación de continuidad.

Las ecuaciones de Navier-Stokes describen todas las fuerzas en todos los movimientos que inciden en los fluidos. Básicamente son las leyes de movimiento de Newton en términos de fluidos. Para conocer por completo cualquier fluido es necesario conocer antes cuatro aspectos críticos acerca de dichas ecuaciones. Lo primero es conocer y saber resolver la ecuación de Navier Stokes:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla}P + \rho\vec{g} + \mu\vec{\nabla}^2\vec{V} \quad (1)$$

La ecuación de continuidad es el segundo punto crítico que debemos conocer para poder aplicar estas ecuaciones. Esta ecuación dice que a pesar de los vacíos o vórtices que se puedan generar en fluido, la masa total del fluido a través de una sección siempre permanecerá constante, sin pérdidas ni ganancias. De otra forma dicho, la masa del fluido se conserva durante su recorrido en un dominio como lo es el caso del auditorio que se analiza.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho\vec{V}) = 0 \quad (2)$$

El tercer punto crítico para tener en cuenta al momento de aplicar las ecuaciones de Navier Stokes es que los fluidos también se rigen por relaciones termodinámicas. Por lo que una sustancia de estudio puede sufrir de contracciones, expansiones, etc. Por último, las condiciones de frontera serán aquellas que nos proporcionan valores y variables que aportarán a la solución de nuestros casos de estudio.

## Resultados

El uso del programa ANSYS creo diferentes resultados en las simulaciones CFD para el estudio de cada caso de manera específica, en la siguiente tabla se presenta la comparación de las velocidades obtenidas en dos diferentes simulaciones. En la primera simulación se tomó como base el movimiento que tiene el aire dentro

de todo el auditorio y la segunda simulación presenta los valores de movimiento del aire en el contorno del auditorio estudiado.

Se realizó el estudio de la ventilación del aire dentro del auditorio para poder obtener una estimación del movimiento del aire o de la cantidad de aire en el recinto, esto se pudo analizar por medio de gráficas de corriente (Fig.7) y gráficas de contorno (Fig.8).

**Tabla 1.** Velocidades basadas en el movimiento del aire en el auditorio.

No. Caso	Simulación 1 Velocidad [m/s]	Simulación 2 Velocidad [m/s]
1	0.1553	0.0759
2	0.7815	0.4695
3	0.0867	0.0785
4	0.7112	0.4885
5	0.1135	0.0777
6	0.7118	0.4811



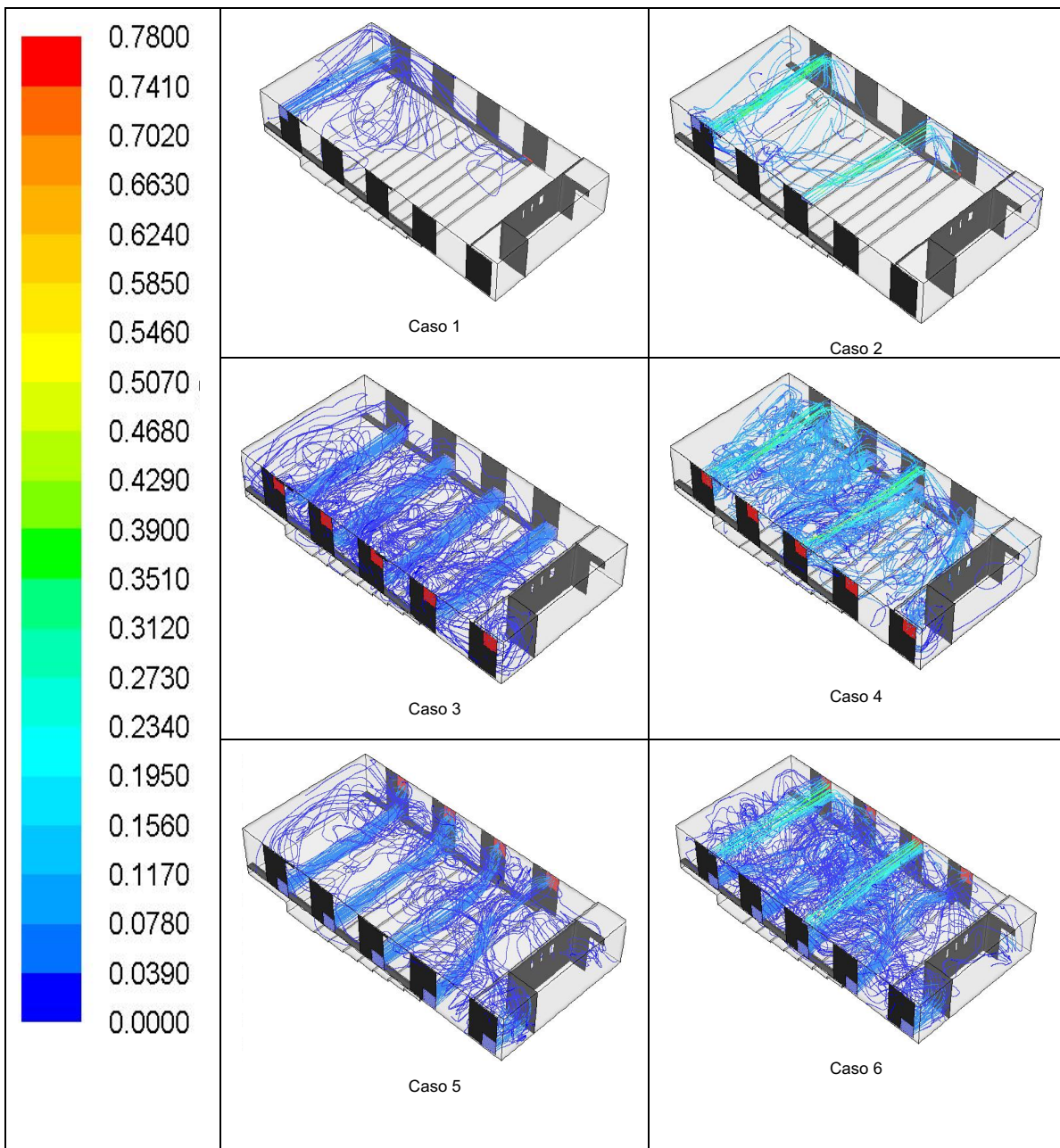


Fig. 7. Presentaciones de corriente en cada caso propuesto.

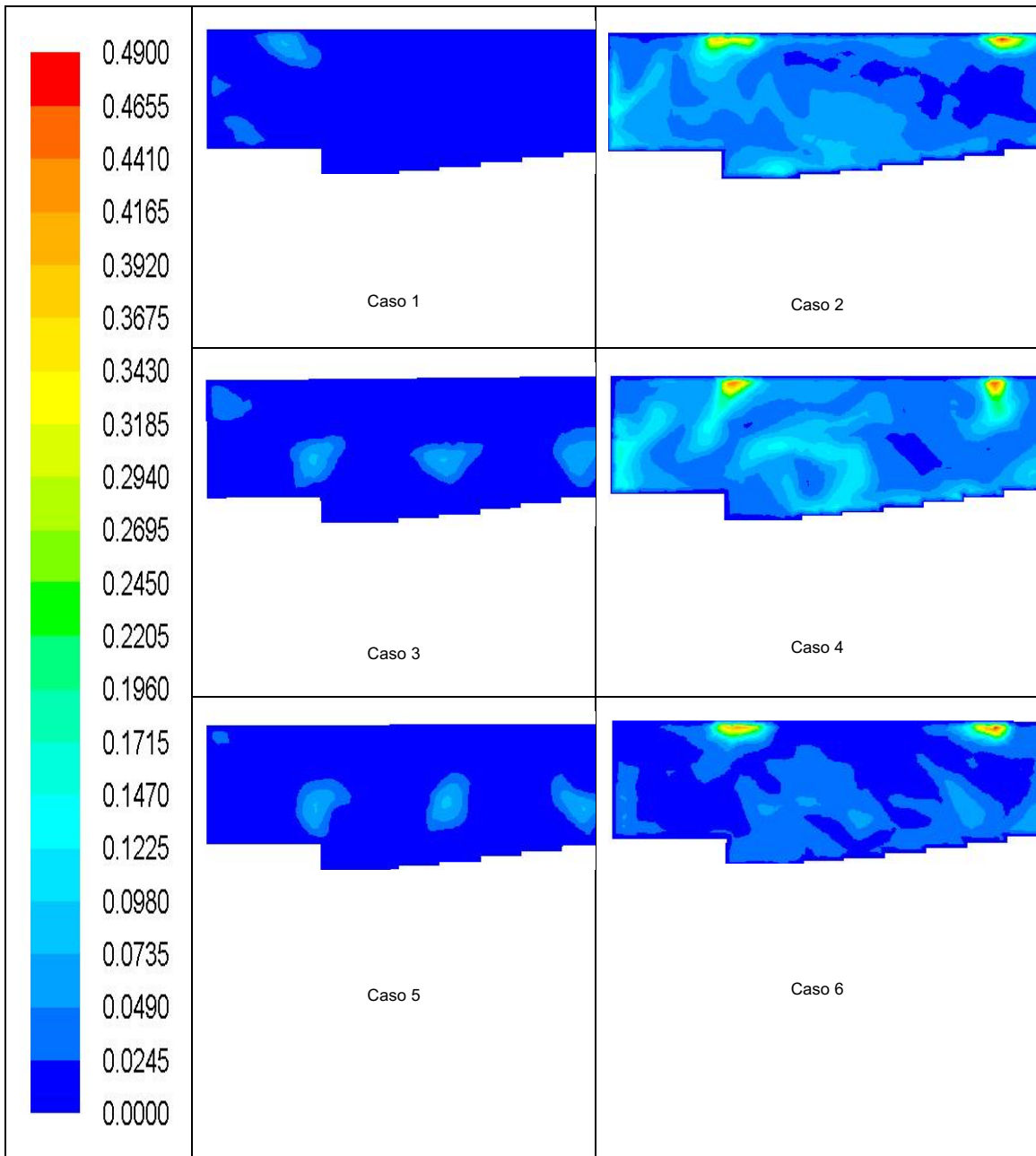


Fig. 8. Presentaciones de contorno en cada caso propuest

Para poder hacer una estimación de la concentración de partículas de CO<sub>2</sub>, se consideró que dentro del auditorio habría un aproximado de 20 personas por evento, por lo que se tomó un número de 2,000 partículas. Este número de partículas fue considerado de acuerdo al análisis de que cada persona libera un aproximado de 100 partículas a una velocidad de 15 m/s. Morawska (2006) También, cada inyección se hizo desde el centro del auditorio hacia la dirección del escenario, para poder hacer una representación del número de espectadores situados en la parte de las butacas. Una vez analizadas y tomadas en cuenta las condiciones de las partículas de CO<sub>2</sub> como el tamaño, la velocidad y el método de inyección. Se continuó con la simulación dentro del Software, de esta manera, se obtuvieron resultados de las concentraciones de CO<sub>2</sub> (Fig. 9) dentro del auditorio con un total de las 3,000 iteraciones para cada caso, teniendo una duración de aproximadamente 8 horas por cada simulación realizada en cada caso.

Además, al tener un poco más visibles y comprensibles los resultados de las concentraciones, se hicieron simulaciones para poder mostrar el movimiento que tendrían las partículas (Fig. 10). Esta simulación fue hecha utilizando las líneas de corriente como el movimiento que tendrá el aire dentro del auditorio y las partículas de CO<sub>2</sub> fueron representadas a manera de vectores para que se pudiera observar su movimiento y la cantidad de partículas.

<p><b>Volume-Weighted Average DPM Concentration</b> (kg/m<sup>3</sup>)</p> <hr/> <p><b>part-solid</b> 9.736808e-08</p> <hr/> <p><b>Net</b> 9.736808e-08</p> <hr/> <p><b>CASO 1 "Análisis del auditorio original"</b></p>	<p><b>Volume-Weighted Average DPM Concentration</b> (kg/m<sup>3</sup>)</p> <hr/> <p><b>part-solid</b> 1.8679925e-08</p> <hr/> <p><b>Net</b> 1.8679925e-08</p> <hr/> <p><b>CASO 2 "Análisis del auditorio con ventilación forzada"</b></p>
<p><b>Volume-Weighted Average DPM Concentration</b> (kg/m<sup>3</sup>)</p> <hr/> <p><b>part-solid</b> 3.9141085e-08</p> <hr/> <p><b>Net</b> 3.9141085e-08</p> <hr/> <p><b>CASO 3 "Análisis del auditorio con ventilación natural"</b></p>	<p><b>Volume-Weighted Average DPM Concentration</b> (kg/m<sup>3</sup>)</p> <hr/> <p><b>part-solid</b> 2.1831017e-08</p> <hr/> <p><b>Net</b> 2.1831017e-08</p> <hr/> <p><b>CASO 4 "Análisis del auditorio con ventilación forzada"</b></p>
<p><b>Volume-Weighted Average DPM Concentration</b> (kg/m<sup>3</sup>)</p> <hr/> <p><b>part-solid</b> 1.6642181e-07</p> <hr/> <p><b>Net</b> 1.6642181e-07</p> <hr/> <p><b>CASO 5 "Análisis del auditorio con ventilación natural"</b></p>	<p><b>Volume-Weighted Average DPM Concentration</b> (kg/m<sup>3</sup>)</p> <hr/> <p><b>part-solid</b> 4.4624166e-08</p> <hr/> <p><b>Net</b> 4.4624166e-08</p> <hr/> <p><b>CASO 6 "Análisis del auditorio con ventilación forzada"</b></p>

Fig. 9. Casos de ventilación propuestos

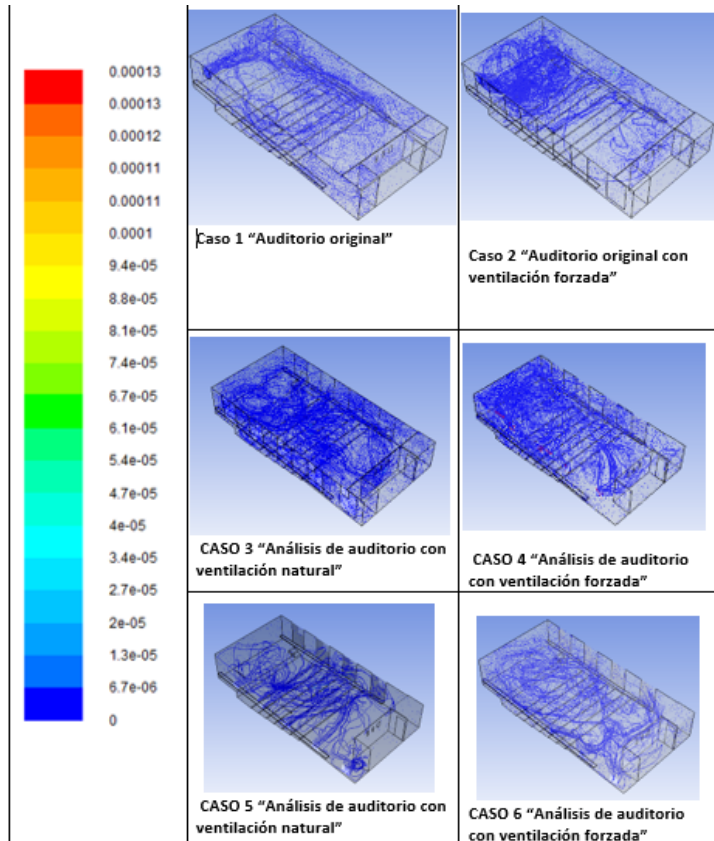


Fig. 10. Movimiento y cantidad de partículas generadas en cada caso propuesto.

## Discusión de Resultados

Esta sección se describe nuestra validación de los resultados de la simulación CFD y el uso de la herramienta ANSYS para estudiar el rendimiento de la ventilación natural y forzada en un lugar concurrido cerrado. El experimento se llevó a cabo en el auditorio de la Universidad de Guanajuato “Efraín Gómez Durán”, como se muestra en Fig 1 donde las características de flujo eran típicas a las de un salón de clases con un sistema de mezcla de ventilación. Las dimensiones del auditorio fueron; 15.63 m (ancho) x 2.32 m (alto) x 7.41 m (largo), y un volumen total de 323.86 m<sup>3</sup>.

El aire exterior se suministró y evacuó a través de varias ventanas cuadradas que contenía el auditorio ubicadas en los laterales inferiores y superiores según cada caso propuesto presentado en la Fig 2, estos casos con ventilación natural y forzada situados en una dirección corriente y contracorriente.

La velocidad del suministro de aire natural fue de 0.0762 m/s y del suministro forzado por medio de los aires acondicionados fue de 0.7112 m/s, respectivamente como se presenta en la Tabla 1.

El mecanismo de comunicación de COVID-19 incluye transmisión aérea, transmisión por contacto y propagación de gotitas según Li et al.(2018). Por lo que este estudio solo explora la probabilidad de infección en el aire. Se generó una geometría a escala, un mallado que se adecuó al estudio, se configuró el modelo matemático mostrado en las Ecs. 1 y 2 y se definieron las propiedades del espacio mostrados en las Fig 3-6.

La metodología utilizada para evaluar el riesgo de infección en el auditorio se basó en la suposición de estado transitorio mostrado en la (Fig. 7) donde se puede observar la velocidad de flujo de aire mínimo o máximo según sea el caso. De la misma manera se obtuvieron valores de contorno del auditorio (Fig. 8), los cuales se analizaron por una sola de las caras, donde el movimiento se puede notar mucho más en los algunos puntos en específico de cada caso.

Para comprobar los valores obtenidos gráficamente, primero se obtuvieron valores numéricos en cada caso (Fig. 9) según la concentración de las partículas de CO<sub>2</sub> que se tenía dentro del auditorio. Además, el movimiento y cantidad de dichas partículas se pudo observar gráficamente (Fig. 10) y así se pudo visualizar qué caso sería el más conveniente de manera análoga.

En el caso 1 se estudió el auditorio en su estado actual, donde los sistemas de ventilación y aire acondicionado se encontraban actuando de manera pasiva, donde la única salida de aire era un ventanal roto en el lado norte, en este caso la ventilación no fue adecuada. Esto porque hubo muy pocas líneas de corriente lo que demostró que el aire no tuviera un desplazamiento en todo el auditorio, de esta manera se observó que solamente había movimiento en la parte del escenario y la dispersión de las partículas estaba concentrada en el lugar de inyección, lejos de lo esperado, este caso se definió como el segundo con mayor concentración al final de las iteraciones.

De la misma manera se consideró el caso 2, en el cual se simuló que los sistemas de aire acondicionado y ventilación permanecieran activos para que pudieran contribuir al flujo de aire dentro del área, lo que provocó que se presentara un mayor movimiento de aire dentro del auditorio pero que solamente fuera más notorio en la parte cercana de los aires acondicionados hacia la parte del escenario, dejando sin ventilación la parte de la cabina y una pequeña parte del auditorio.

Asimismo se observaron vórtices generados por el movimiento del aire en la parte del escenario dejando claro que en esa parte se creó una concentración de partículas de CO<sub>2</sub>, sin embargo la concentración que se presentó fue una de las mejores debido a que había una convección forzada, además de que permitiera que la posición de entrada y de salida de aire fuera adecuada por las propiedades físicas y químicas del aire, puesto que el aire caliente tiende a subir porque este se expande y pierde su densidad según Lu et al.(1996), esto permitió el ajuste de la salida del aire con el comportamiento del fluido.

Por el contrario, en el caso 3, se consideraron las entradas de aire en la parte norte del auditorio y las salidas por la parte sur con los sistemas HVAC apagados, por lo que la posición de las ventanas junto con sus medidas provocó que se presentara un mayor flujo, generando así un mayor movimiento de aire en todo el auditorio, esto formó grandes cantidades de vórtices e impidió que bajara la concentración de las partículas, dejándolas estancadas dentro del área estudiada.

De la misma manera en el caso 4 se mantienen las entradas y salidas de aire en la orientación del auditorio con la diferencia de que los sistemas HVAC permanecieron encendidos para que pudieran contribuir con el flujo de aire total dentro del auditorio, de este modo el caso 4 permitió obtener la mejor ventilación por varios factores, como la posición de las ventanas de entrada que se encuentran de manera opuesta al aire acondicionado lo que provocó un impacto en el fluido junto con sus vórtices donde estaban concentradas las partículas, redireccionándolo hacia las ventanas de salida.

Se esperaba que el comportamiento de este caso no fuera eficiente puesto a que la posición de las velocidades de entrada y de salida, tanto natural como forzada, no fueran proporcionales debido a que la velocidad de los aires acondicionados fuera mayor, comparado con la velocidad de aire natural. Sin embargo, se estiman más ventanas de entrada con este aire, lo que aumenta la velocidad y fuerza de las mismas, generando mayor presión para hacer que la fuerza de los aires acondicionados sean empujados en dirección al aire natural. Es por eso que la diferencia que está presente en el caso 3 y el caso 4 es la convección forzada, lo que facilita la generación de vórtices que ayudan a la concentración de partículas y que éstas sean expulsadas debido a que estas sean sometidas por la dirección y velocidad que contiene la ventilación mezclada según Li et al.(2018).

También en el caso 5 se mantuvieron entradas y salidas de aire, con la diferencia en la ubicación, la cual fue contraria al caso 3, dejando situadas las entradas en el área sur y las salidas en el área norte de los laterales, este cambio originó un aumento en la ventilación dentro de toda el área, pero sin llegar a formar las líneas de corriente convenientes para la expulsión del aire infectado, lo que dio oportunidad de ser el caso con mayor concentración de CO<sub>2</sub>.

Finalmente, en el caso 6 se respetó la misma distribución del caso 5, añadiéndole los HVAC encendidos, dejando así una vía libre en la dirección de salida de los aires acondicionados, impidiendo una interacción adecuada entre la convección natural y la forzada, siendo el tercer caso con mayor concentración de partículas de virus dentro del auditorio. A partir del análisis general de todos los casos, según su comportamiento presentado en las Fig 9 y 10, se tomó como parámetro el caso 4 debido a que presentó un mejor comportamiento conveniente para la disminución del riesgo de contagio.

*Tabla 2 Porcentajes de diferencia en la concentración de partículas de virus respecto al caso 4.*

No. Caso	Concentración de Partículas CO <sub>2</sub> [Kg/m <sup>3</sup> ]	Porcentaje de error respecto al caso 4 (%)
1	9.74E-08	3.46E+01
2	1.87E-08	1.44E+01
3	3.91E-08	7.93E+01
4	2.18E-08	0.00E+00
5	1.66E-07	6.62E+02
6	4.46E-08	1.04E+02

Los resultados que se presentan detallan que las mejores ventilaciones fueron de manera forzada, como lo fue el caso 2 y 4, obteniendo los valores numéricos más convenientes por lo que para reducir el riesgo de infección en el auditorio, este estudio propuso el caso 4 como la mejor opción porque también se toma en cuenta la ventilación de la cabina dado que en el resto de los casos es inadecuada, provocando que habiten demasiadas partículas en esa área, por lo que el caso propuesto como mejor opción la ventilación es justa para permitir recirculación de aire sin saturar la zona que carece de salidas cercanas de aire sí hubiera un alto número de personas dentro del recinto.

Esta investigación redujo la probabilidad del riesgo de infección por la concentración de partículas situadas dentro del auditorio. Con base en los resultados y hallazgos anteriores, este estudio sugeriría que en el ambiente interior cerrado se suministre suficiente aire natural y forzado para crear un ambiente interior saludable, además de que las personas usen máscaras quirúrgicas o N95 para reducir la infección. Para obtener mejores resultados y lograr tener una convergencia completa en las simulaciones, se necesita de un mayor número de iteraciones, mayor número de partículas y un equipo más sofisticado y especializado en el estudio de mediciones experimentales y numéricas.

## Conclusiones

- El uso correcto de ventilación natural y forzada en el auditorio conduce a una reducción importante en la tasa de infección porque se genera un mayor movimiento de aire en la dirección adecuada para mejorar la dispersión de las partículas infectadas por el virus.
- El uso del aire exterior en su totalidad reduce drásticamente el riesgo de infección, pero la ventilación forzada aumenta las posibilidades de reducir aún más el contagio por la fuerza que genera la velocidad de entrada y salida a pesar de los costos y mantenimiento que requiere este tipo de aparatos que genera la convección forzada, pero son necesarios para evitar un contagio masivo en recintos concurridos.
- El riesgo de infección de un ambiente interior con ventilación mezclada depende directamente de la cantidad de aire limpio ya sea aire natural o aire acondicionado.
- Es importante realizar un análisis en las estrategias de ventilación propuestas para cubrir las necesidades del área específica que se desea ventilar, tratando de evitar la generación de vórtices que permite que se concentren las partículas del virus.
- Para disminuir el riesgo de contagio de cualquier virus en espacios concurridos y cerrados, es recomendable utilizar sistemas de ventilación mezclada debido a que promueve la entrada de aire natural con la ventilación forzada y evita la recirculación del aire infectado en el espacio.

## Referencias

- Bar-On, Y.M., Flamholz, A., Phillips, R., Milo, R., 2020. SARS-CoV-2 (COVID-19) by the numbers. *eLife* 9, e57309.
- Diwan, S.S., Ravichandran, S., Govindarajan, R., Narasimha, R., 2020. Understanding transmission dynamics of COVID-19-type infections by direct numerical simulations of cough/sneeze flows. *Trans. Indian Natl. Acad. Eng.* 5, 255–261.
- Kotb, H., Khalil, E.E., 2020. Sneeze and cough pathogens migration inside aircraft cabins. *Energy* 2.
- Li, X., Shang, Y., Yan, Y., Yang, L., Tu, J., 2018. Modelling of evaporation of cough droplets in inhomogeneous humidity fields using the multi-component Eulerian- Lagrangian approach. *J. Build. Environ.* 128, 68–76.
- Lu, W., Howarth, A.T., Adam, N., Riffat, S.B., 1996. Modelling and measurement of airflow and aerosol particle distribution in a ventilated two-zone chamber. *Build. Environ.* 31, 417–423.
- Mao, N., An, C.K., Guo, L.Y., Wang, M., Guo, L., Guo, S.R., Long, E.S., 2020. Transmission risk of infectious droplets in physical spreading process at different times: a review. *Build. Environ.* 185, 107307.
- Mirzaie, M., Lakzian, E., Khan, A., Warkiani, M. E., Mahian, O., & Ahmadi, G. (2021). COVID-19 spread in a classroom equipped with partition – A CFD approach. *Journal of Hazardous Materials*, 420, 126587. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126587>
- Morawska, L., 2006. Droplet fate in indoor environments, or can we prevent the spread of infection? *Indoor Air* 16, 335–347.
- Wang, J., Sun, L., Zou, M., Gao, W., Liu, C., Shang, L., Gu, Z., Zhao, Y., 2017. Bioinspired shape-memory graphene film with tunable wettability. *Sci. Adv.* 3, 1700004.
- WHO. Coronavirus disease (COVID-19) advice for the public (<https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/advice-for-public>). 2020a.