

EVALUACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE AIRE EN UN ASCENSOR PARA
REDUCIR LA TRANSMISIÓN DE ENFERMEDADES RESPIRATORIAS

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

JUAN DIEGO AGUIRRE FLOREZ

ENRIQUE JAVIER SANCHEZ PEÑA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2023

EVALUACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE AIRE EN UN ASCENSOR PARA
REDUCIR LA TRANSMISIÓN DE ENFERMEDADES RESPIRATORIAS

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

JUAN DIEGO AGUIRRE FLOREZ

ENRIQUE JAVIER SACHEZ PEÑA

Director

PhD. CARLOS FIDEL AMARIS CASTILLA

Codirector

PhD. JULIAN ERNESTO JARAMILLO IBARRA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2023

Agradecimientos

"El epílogo, o quizás, el remate de esta historia.

Por mi madre que siempre estuvo a mi lado

Por mi padre que lo llevo siempre presente

Por mi nona que esta siempre en mi corazón

Por mi compañero y director, si se cree y se trabaja, se puede, nunca dejes de creer

Por aquellos que viven derrochando coraje y corazón

Por aquellos motivos de un sentimiento, que no se pueden explicar

Por los colores rojiblancos que definen mi forma de ser"

- Enrique Javier Sánchez Peña

Agradecimientos

"Al Señor Jesús porque él me dio espíritu de vida, de sabiduría y de conocimiento, porque tuve problemas y él los solucionó.

A mi madre Sonia E. Flores porque estuvo para mí y trabajó duro todos los días en mi beneficio.

A mi padre Carlos A. Aguirre por su apoyo incondicional.

A mi nono por su apoyo económico permanente.

A mi compañero Enrique J. Sánchez porque me salvó el tema de tesis, sin él no hubiese terminado.

A mi director de tesis Carlos F. Amaris porque nos acogió como tesis, nos orientó y nos prestó su tiempo y atenciones con paciencia.

A todos mis compañeros y mis amigos, en especial a los que me dieron la mano incondicionalmente."

- Juan Diego Aguirre Flores

Dedicatoria

A mi yo del futuro, mis futuros hijos y mi futura esposa, a la vejez de mi madre y de mi padre.

- Juan Diego Aguirre Flores

Resumen

Título: Evaluación de la distribución de aire en un ascensor para reducir la transmisión de enfermedades respiratorias.

Autores: Juan Diego Aguirre Florez Enrique Javier Sánchez Peña

Palabras clave: CFD, Edad del aire, Turbulencia, Dominio computacional, Ascensor, Campos de velocidad y presión.

Descripción: Se realizó la simulación de fluidos de acuerdo con la configuración de ventilación de uno de los ascensores de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander con el fin de evaluar la distribución de aire dentro del mismo y proponer una alternativa que mejore las condiciones de salubridad del aire interior cuando este es ocupado por cuatro personas. Se construyó un modelo CFD teniendo en cuenta las especies presentes, la gravedad y la turbulencia, siendo esta última, modelada a través del modelo Reynolds Stress. Se utilizó un mallado estructurado de elementos poly-hexahedricos, con un refinamiento responsable de producir 1.5 millones de elementos. Además de la simulación del caso base, se propusieron adicionalmente cinco diferentes configuraciones de ventilación, durante las cuales se analizaron los resultados correspondientes a las trayectorias de flujo, la temperatura y la edad media del aire en un plano horizontal perteneciente a la zona respirable. adicionalmente se calculó un parámetro de efectividad de reemplazo de aire para determinar cuál de las configuraciones reemplaza más rápidamente el aire contaminado. Con lo anterior finalmente se concluyó que el Caso numero 4 resultó ser la mejor configuración de ventilación con un ACH de 27.05 veces/hora, una EMA de 84.45 segundos y un ACE de 1.478.

Abstract

Title: Evaluation of air distribution in an elevator to reduce the transmission of respiratory diseases.

Authors: Juan Diego Aguirre Florez Enrique Javier Sánchez Peña

Keywords: CFD, Air age, Turbulence, Computational domain, Elevator, Velocity and Pressure fields.

Description: A fluid simulation of the ventilation configuration of one of the elevators of the School of Mechanical Engineering of the Universidad Industrial de Santander was carried out in order to evaluate the air distribution inside the elevator and to propose an alternative to improve the health conditions of the interior air when it is occupied by four people. A CFD model was built taking into account the species present, gravity and turbulence, the latter being modelled through the Reynolds Stress model. A structured mesh of poly-hexahedral elements was used, with a refinement responsible for producing 1.5 million elements. In addition to the base case simulation, five different ventilation configurations were additionally proposed, during which the results corresponding to the flow paths, temperature and mean air age in a horizontal plane belonging to the breathing zone were analysed, while an air replacement effectiveness parameter was calculated to determine which of the configurations replaces the contaminated air more quickly. With the above, it was finally concluded that Case number 4 presents the best ventilation configuration with an ACH of 27.05 times/hour, an EMA of 84.45 seconds and an ACE of 1.478.

Contenido

Introducción.....	13
1.1 Objetivos.....	15
1.1.1 Objetivo general	15
1.1.2 Objetivos específicos.....	15
1.2 Alcance del modelo	15
1.3 Justificación	16
1.4 Diseño metodológico	17
1.5 Organización del documento	19
2 Marco teórico	21
2.1 Conceptos.....	21
2.1.1 Sistemas de ventilación	21
2.1.2 Distribución y difusión de aire	21
2.1.1 Tasa de cambio del aire por hora (Air Change per hour - ACH)	22
2.1.2 Edad media del aire	22
2.1.3 Efectividad de cambio del aire (Air Change Effectiveness - ACE)	23
2.1.4 Campos de velocidad y temperatura.....	23
2.1.5 Ascensores.....	23
2.1.6 Dinámica computacional de fluidos (CFD).....	24
2.1.7 Modelos de caracterización de fluidos	25
2.1.8 Ansys Fluent.....	27

2.2	Estado del arte.....	28
3	Metodología	40
3.1	Descripción del sistema de estudio	40
3.2	Casos de estudio.....	42
3.3	Características del Modelo CFD	46
3.4	Dominio computacional y geometría.....	46
3.5	Mallado	48
3.6	Selección de modelos.....	51
3.7	Ecuaciones gobernantes	52
3.7.1	Modelo de turbulencia Reynolds Stress	52
3.7.2	Edad del aire	53
3.8	Condiciones de frontera	53
4	Resultados y discusión	55
4.1	Procedimiento de validación.....	55
4.2	Prueba de independencia de malla.....	59
4.3	Análisis y evaluación de los casos de estudio.....	61
4.4	Evaluación de las líneas de corriente de velocidad.....	62
4.5	Evaluación de la temperatura.....	65
4.6	Evaluación de la edad media del aire.....	68
4.7	Comparación con resultados de la literatura	74

5 Conclusiones y recomendaciones..... 76

Referencias bibliográficas 78

Lista de Figuras

Figura 1 Cabina del ascensor de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.	40
Figura 2 Ubicación de las Rejillas de ventilación	41
Figura 3 (a) Rejillas de ingreso de aire. (b) Rejillas de evacuación de aire.	42
Figura 4 Modelo CAD de la ubicación de las 4 personas dentro del ascensor.....	42
Figura 5 Esquemas de los casos de estudio simulados.....	44
Figura 6 Geometría y medidas del modelo tridimensional de la cabina del ascensor de la escuela de Ingeniería Mecánica.....	47
Figura 7 Geometría del sujeto dentro del ascensor.....	48
Figura 8 (a) Vista isométrica general del mallado del dominio computacional. (b) Refinamiento del Inlet. (c) Refinamiento del outlet. (d) Refinamiento de la pared limítrofe del cuerpo.	49
Figura 9 Ubicación de la Línea 1 dentro del volumen de la cabina del ascensor (Li & Feng, 2023).....	56
Figura 10 Grafica de la velocidad del aire en función de la distancia a lo largo de la Línea 1 (Li & Feng, 2023).....	56
Figura 11 Grafica de validación del modelo CFD utilizando el modelo de turbulencia Reynolds Stress.	58
Figura 12 Prueba de independencia de la malla para las configuraciones de 1.115M, 2.588M y 9.003M de elementos.....	60
Figura 13 Resultados de las líneas de corriente de velocidad	63
Figura 14 Resultados de la temperatura en el plano YZ.....	67
Figura 15 Resultados de la edad media del aire en el plano horizontal a 1.5 m de alto.....	69
Figura 16 Resultados de la edad media del aire en el plano vertical YZ	72

Lista de Tablas

Tabla 1 Resumen listado de escenarios y configuraciones de ventilación simuladas.	45
Tabla 2 Medidas del refinamiento del mallado.	48
Tabla 3 Condiciones de frontera del modelo numérico.	54
Tabla 4 Listado de los valores de porcentaje de error para cada modelo CFD evaluado durante la validación.	58
Tabla 5 Configuración de refinamiento del mallado.	59
Tabla 6 Comparación de los perfiles de velocidad en las diferentes configuraciones de refinamiento del mallado.	61
Tabla 7 Resultados de la edad del aire promedio y efectividad de cambio de aire para cada caso.	73

Introducción

Las enfermedades transmitidas por el aire están presentes en todos los entornos en los que vivimos. Es fácil infectarse cuando no se toman las medidas necesarias, además de que las consecuencias y síntomas de estas enfermedades pueden causar daños considerables a la salud e incluso ser letales. Según la Organización Mundial de la Salud, “cada año se producen hasta 650.000 muertes por enfermedades respiratorias relacionadas con la gripe estacional.” (Organización Mundial de la Salud, 2017)

Por ejemplo, en la reciente crisis sanitaria mundial provocada por el COVID-19, una enfermedad de transmisión respiratoria, se notificaron más de 34.000 nuevos casos diarios de infección durante el pico estadístico más grave en Colombia en junio del año 2021. La situación descrita ha provocado la muerte de 142.000 personas en todo el país y un registro de 6.34 millones de casos totales. (Instituto Nacional de Salud, 2023)

Con el desarrollo de la crisis y la propagación de nuevos casos de infección en todo el mundo. Las medidas adoptadas a nivel mundial han sido adoptadas a nivel nacional como recomendaciones por la Organización Mundial de la Salud como referente normativo. La respuesta ha sido la creación de protocolos para evitar la proliferación de enfermedades respiratorias, consistentes en actividades básicas como el lavado de manos y el uso de mascarillas, que evitan en gran medida el contagio.

Actualmente, se ha optado por una apertura progresiva con medidas de bioseguridad como mascarillas bucales, el uso regular de gel antibacteriano y el distanciamiento físico en lugares públicos. Asimismo, se han realizado investigaciones a nivel mundial desde diferentes ámbitos profesionales tratando de aportar información útil para mitigar la velocidad de contagio y el número de infectados. Algunas de estas investigaciones son de

carácter ingenieril e incluyen el análisis de la dinámica computacional de fluidos en lugares donde las condiciones favorecen la transmisión aérea. Por ejemplo, en la revista "Physics of fluids" se publicó un artículo que analizaba la transmisión de virus a través del aire en espacios confinados. En él se obtenía información sobre el tamaño de las partículas en suspensión en el interior de un ascensor para distintas configuraciones y escenarios de ventilación. (Biswas et al., 2022)

Por otra parte, la relajación en las medidas nacionales de prevención de contagios ha llevado a que personas con algún síntoma de alguna enfermedad respiratoria sean menos cuidadosas, por lo que las personas no infectadas están expuestas a contagios cuando se encuentran en espacios muy reducidos y donde la ventilación y distribución de aire juegan un papel fundamental para reducir los riesgos de contagio.

Por lo tanto, teniendo en cuenta lo anterior, se propone realizar un estudio del comportamiento de los fluidos contenidos en un ascensor de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, suponiendo la presencia de una persona infectada y 3 personas no infectadas. El siguiente estudio permitirá obtener información sobre las zonas de mayor riesgo de contagio en base al comportamiento de los fluidos estudiados mediante CFD.

En consecuencia, la pregunta de investigación se formula de la siguiente manera: ¿Cuál es la configuración del sistema de distribución de aire que permite reducir los riesgos de contagio de enfermedades de transmisión respiratorias a los que una persona se expone cuando hace uso de un ascensor?

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Evaluar la distribución de aire en un ascensor para 4 personas mientras se mueve a velocidad constante para reducir los riesgos de contagio de enfermedades de transmisión respiratoria asumiendo la presencia de al menos una persona infectada.

1.1.2 Objetivos específicos

- Desarrollar el modelo CFD del ascensor que permita el estudio de la distribución de aire dentro del volumen interno del ascensor.
- Validar el modelo CFD para el estudio de la distribución de aire dentro del ascensor.
- Determinar la configuración de distribución de aire que permita disminuir los riesgos de contagio de una enfermedad de transmisión respiratoria.

1.2 Alcance del modelo

En el siguiente trabajo se consideró, la presencia de cuatro personas sometidas a diferentes configuraciones de ventilación dentro de un ascensor cuya condición de aceleración de este fue despreciada y se asumió que este se encuentra en movimiento a velocidad constante. Las simulaciones se realizaron en estado estacionario. Los flujos de aire se modelaron en régimen turbulento y fueron afectados por la gravedad. Se tuvo en cuenta la humedad del aire. No se consideró rastreo, caracterización ni conteo de partículas en suspensión. Respecto a los cuerpos de las personas, no se consideró la respiración, tos o discurso. Se consideró la posibilidad de la existencia de aire contaminado en el ascensor, por lo tanto, los parámetros considerados para reducir posibilidades de contagio fueron la trayectoria del flujo de aire de entrada, la edad media del aire, y la efectividad del cambio de aire. Así mismo, se tuvo en cuenta la transferencia de calor de sus superficies, las cuales se consideraron como fuentes

de calor y por lo tanto se estableció una temperatura determinada, la cual interactúa con los flujos de aire por lo que se consideraron también los efectos de flotabilidad relacionados con la convección natural. Así mismo los resultados de este estudio se presentaron en relación a la calidad del aire, por lo tanto, se habló sobre edad media del aire y efectividad de reemplazo de aire de la configuración de ventilación.

1.3 Justificación

Según la organización de las naciones unidas, "en el futuro, las pandemias surgirán con más frecuencia, se propagarán con más rapidez, causarán más daño a la economía mundial y matarán a más personas que el covid-19, a menos que se produzca un cambio transformador en el enfoque mundial para hacer frente a las enfermedades infecciosas". Los profesionales e investigadores expertos en pandemias advierten de que, de los 1.7 millones de virus actualmente "por descubrir", 850.000 podrían tener la capacidad de infectar a los humanos y causar enfermedades. (Organización de las Naciones Unidas, 2020)

Aunque la anterior crisis sanitaria de Covid-19 tuvo su origen en microbios transmitidos por animales, su aparición y su potencial pandémico se han debido enteramente a las actividades humanas. Por ello, aunque el desarrollo de vacunas ha mitigado las consecuencias para la salud pública de la anterior enfermedad, es importante seguir desarrollando estrategias y mecanismos, desde diferentes ámbitos profesionales, que nos permitan prevenir futuras pandemias y contagios de enfermedades actuales.

En zonas donde el aire recircula a través de circuitos de ventilación es fácil contraer enfermedades. Con el flujo de personas, el número de bacterias y virus aumenta considerablemente. Este escenario pone de manifiesto la relevancia del estudio de los ascensores para prevenir la transmisión de enfermedades respiratorias. Un ascensor es un

dispositivo de transporte indispensable en los grandes edificios, que garantiza un elevado flujo de personas. A pesar del tiempo relativamente corto que se pasa en él, el ascensor es un espacio confinado en el que se puede estar en estrecho contacto con un gran número de personas que respiran volúmenes de aire reciclado cargado de enfermedades. Actualmente, en la Universidad Industrial de Santander, no se han realizado estudios de simulación de fluidos donde se consideren los efectos de transmisión o donde el enfoque sea la prevención de la transmisión de enfermedades. Así mismo, los resultados de esta investigación pueden aportar información para la prevención de transmisión de enfermedades respiratorias en los ascensores pertenecientes a la escuela de ingeniería mecánica. Desde el punto de vista de la ingeniería, es posible estudiar los fluidos que constituyen un medio de transporte adecuado para las partículas transmisoras de enfermedades. Incluso cuando no se trata de enfermedades de transmisión respiratoria, las corrientes de aire se convierten en un medio excelente para desplazar grandes cantidades de organismos patógenos. Gracias a la simulación de fluidos desde la ingeniería mecánica, es posible estimar con gran precisión los perfiles de velocidad y las trayectorias que se producen en los espacios confinados como fuentes de contagio. Así es posible diseñar, por ejemplo, configuraciones de ventilación y estructurar otras estrategias que reduzcan las posibilidades de transmisión de enfermedades.

1.4 Diseño metodológico

El desarrollo del proyecto se llevará a cabo mediante la implementación de tres etapas que corresponden con los objetivos del proyecto y que consisten en la realización de las actividades descritas a continuación.

Etapas 1: Desarrollar el modelo CFD del ascensor que permita el estudio de la distribución de aire dentro del volumen interno del ascensor.

- Realizar una revisión bibliográfica sobre los estudios de distribución de aire usando CFD.
- Identificar los modelos de turbulencia y condiciones de frontera definidos en estudios de distribución de aire usando CFD disponibles en la literatura.
- Revisar la normativa existente sobre la ventilación y velocidades de aire en ascensores.
- Identificar las características y dimensiones del ascensor caso de estudio.
- Construir un modelo 3D CFD de un ascensor.
- Definir las condiciones de frontera requeridas para la simulación de la distribución de aire en el usando CFD.

Etapa 2: Validar el modelo CFD para el estudio de la distribución de aire dentro del ascensor.

- Construir un modelo 3D CFD de un ascensor.
- Definir el modelo de turbulencia requerido para la simulación de la distribución de aire en el usando CFD.
- Definir las condiciones de frontera requeridas para la simulación de la distribución de aire en el usando CFD.
- Realizar prueba de independencia de malla del modelo CFD.
- Validar el modelo CFD base desarrollado para el estudio de la distribución de aire en un ascensor.

Etapa 3: Determinar la configuración de distribución de aire que permita disminuir los riesgos de contagio de una enfermedad de transmisión respiratoria.

- Definir diferentes configuraciones de distribución de aire para su modelamiento.

- Modificar la configuración de sistema de distribución de aire en el modelo CFD base de acuerdo con los casos definidos.
- Modelar diferentes configuraciones del sistema de distribución de aire en el modelo CFD del ascensor.
- Analizar los resultados de distribución de aire y edad del aire obtenidos a partir de la simulación del modelo CFD del ascensor.
- Identificar el sistema de distribución de aire que permite reducir los riesgos de contagio de enfermedades de transmisión respiratoria en función de los perfiles de flujo y edad de aire en el recinto.

1.5 Organización del documento

En el capítulo uno se puede encontrar una visión general del alcance del proyecto, así como un contexto global y local mismo. Además, se explican las razones por las cuales es importante investigar sobre el tema y la metodología que se tendrá en cuenta para su realización.

Para el capítulo dos se referencian casos de la literatura académica que sirven como punto de partida para la realización de este, se mencionan los modelos de turbulencia y demás ecuaciones que se tuvieron en cuenta en los casos evaluados allí, así como otras consideraciones de índole geométricas y físicas. De esta manera se ejemplifica la situación a estudiar para más adelante validar los resultados obtenidos. También se explican términos clave importantes que permiten una mejor comprensión del tema.

En el capítulo tres se explica los componentes necesarios para llevar a cabo la simulación. Allí se enuncian y describe la geometría y parámetros físicos que delimitan el volumen de control, así como las ecuaciones y modelos matemáticos de los fenómenos

físicos a los que está sometido el fluido y otros detalles relacionados con el modelo CFD que se implementara.

Durante el capítulo cuatro se evalúan los resultados obtenidos. En este capítulo se garantiza la validación del modelo y que la malla utilizada sea la correcta, lo que permita visualizar resultados coherentes. Además, se presentan los resultados obtenidos a partir de la simulación de los casos de estudios propuestos. Por último, en el capítulo cinco se enuncian y explican las conclusiones más importantes que se dedujeron luego de analizar los resultados.

2 Marco teórico

A continuación, se presentan los conceptos fundamentales asociados al trabajo de investigación desarrollado y el estado de arte de estudios previos sobre el modelamiento del comportamiento del flujo de aire en ascensores.

2.1 Conceptos

2.1.1 Sistemas de ventilación

La ventilación es la introducción de aire externo a una edificación, esta puede ser natural donde el flujo de aire entra debido a la diferencia de presiones internas y externas, o forzada en la cual el aire es intencionalmente introducido haciendo uso de ventiladores, rejillas de admisión y escape. Se realiza con el propósito de proveer una calidad de aire aceptable al interior de una edificación. (ASHRAE, 2013)

2.1.2 Distribución y difusión de aire

Es la localización y trayectoria de las corrientes de aire que circulan un determinado espacio. El objetivo de la distribución de aire es crear un entorno "bien mezclado"; en la mayoría de las oficinas el aire se suministra desde difusores o rejillas ubicados típicamente en el techo.

La distribución de aire también se puede definir como el movimiento hacia o dentro de un lugar usando descargas de suministro de aire. Este está destinado a suministrar confort térmico y ventilación obteniendo una difusión del aire en el ambiente destinado. (ASHRAE, 2022)

Esta puede ser clasificada en cuatro sistemas dependiendo de su difusión:

- Sistemas mezclados, los cuales producen poca o nula satisfacción térmica en el espacio.

- Sistemas totalmente estratificados, los cuales producen poca o nula mezcla de aire en el espacio.
- Sistemas parcialmente mezclados, el cual produce una mezcla ligera en el espacio mientras crea condiciones estratificadas en el volumen de aire.
- Sistemas de condiciones ambientales, los cuales se concentran en una fracción del espacio para el confort térmico o procesos de control

2.1.1 Tasa de cambio del aire por hora (Air Change per hour - ACH)

Es la cantidad de veces que el aire de un recinto cerrado se intercambia por aire nuevo en su totalidad en una hora asumiendo una mezcla uniforme de aire. (ASHRAE, 2013)

2.1.2 Edad media del aire

Se refiere al tiempo en el que el aire permanece dentro de un espacio cerrado en específico. Es un parámetro tenido en cuenta cuando se habla de sistemas de ventilación, se relaciona estrechamente con la tasa de renovación de aire presente en los recintos cerrados donde se controlan los flujos de este. Si no se cuenta con un sistema de ventilación adecuado, es muy posible que la calidad del aire disminuya en función de la cantidad de particulados contaminantes en suspensión conforme a la medida que la edad del mismo aumente.

La edad del aire también puede definirse como el tiempo en el que cierta cantidad de aire exterior ha estado dentro de una zona o espacio. El aire más joven es encontrado en el punto donde el aire entra en el espacio sea por medio de ventilación natural o forzada. El aire más viejo es encontrado en mayor proporción en las salidas de aire. La edad del aire se correlaciona inversamente con la calidad del suministro del aire exterior, además de que éste puede variar según las características del sistema de distribución de aire del lugar. Es un parámetro utilizado en la ingeniería ambiental para describir cuánto tiempo permanece el aire

en un espacio cerrado antes de ser reemplazado por aire fresco del exterior. Es un indicador importante de la calidad del aire interior y puede influir en la propagación de enfermedades infecciosas. La EMA se calcula dividiendo el volumen del espacio interior por la tasa de flujo de aire fresco que entra en ese espacio. Por lo general, se recomienda que la EMA sea de al menos 15 minutos para la mayoría de los edificios. (ASHRAE, 2013)

2.1.3 Efectividad de cambio del aire (Air Change Effectiveness - ACE)

Es la descripción de habilidad del sistema de distribución de aire para entregar aire fresco a un edificio zona o espacio. Esta se define comúnmente como la relación entre la edad del aire promedio en la salida y la edad del aire promedio a una determinada altura respirable. (ASHRAE, 2013)

2.1.4 Campos de velocidad y temperatura

El método más común para describir el flujo de fluido es la descripción euleriana del movimiento, para esta, el flujo se define en un volumen finito el cual se denomina dominio del flujo, por el cual el fluido fluye hacia dentro y hacia fuera. Para ello se definen variables de campo, los cuales están en función del espacio y el tiempo dentro del dominio. El campo de velocidad se define como el campo vectorial de la velocidad y el campo de temperatura es el campo de variable escalar para la temperatura en el dominio. (Çengel & Cimbala, 2012)

2.1.5 Ascensores

Es un sistema de transporte diseñado para mover personas o carga de manera vertical a diferentes niveles de altura, se clasifican según la forma de conducción, por lo que cada una cuenta con principios de diseño y construcción diferentes, generalmente son clasificados por diseñadores y manufactureras en ascensores eléctricos, hidráulicos y neumáticos.

El elemento principal de un ascensor es su cabina, donde se agrupan las personas o la carga a transportar; además es el objetivo de estudio de este proyecto de investigación, la cabina constituye el volumen de control para el cual se obtendrán campos de velocidad y temperatura debido a los sistemas de ventilación propios de la cabina del ascensor utilizando simulaciones de fluidos computarizadas. (Bangash & Bangash, 2005)

2.1.6 Dinámica computacional de fluidos (CFD)

La dinámica de fluidos computacional, por sus siglas en inglés (CFD), es una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de fluidos. Los ordenadores son utilizados para realizar millones de cálculos requeridos para simular la interacción de los líquidos y los gases con superficies complejas proyectadas por la ingeniería (Patankar, 1980).

Los fluidos están regidos por tres principios: (1) conservación de masa, (2) Segunda Ley de Newton y (3) conservación de energía; estos principios físicos se pueden representar en ecuaciones matemáticas integrales o diferenciales. El CFD transforma estas ecuaciones en forma algebraica, que son resueltas para obtener un flujo de resultados en el espacio y tiempo. El resultado obtenido del CFD es una compilación de “números”, contrario a una solución analítica. Esta herramienta computacional es utilizada para el análisis de situaciones ingenieriles, requiriendo la manipulación de millones de ecuaciones para la realización de los cálculos. (Anderson, 1995)

2.1.7 Modelos de caracterización de fluidos

En los modelos de simulación para la ingeniería, la gran mayoría de flujo que encontramos son turbulentos, y la turbulencia al ser proceso aleatorio, no podemos recrear de manera perfecta sus efectos. Para ello en CFD se hace uso de un modelo de turbulencia que se ajuste a las necesidades de la simulación.

En CFD existen tres enfoques para el modelo de turbulencia

1. Direct Numerical Simulation (DNS): Para este modelo es técnicamente posible la resolución de cada fluctuación del movimiento en el flujo, sin embargo, la malla debe ser extremadamente fina y un timestep muy pequeño, por lo que esta herramienta solo es usada en investigación para números de Reynold bajos con el uso de supercomputadoras por el gran requerimiento de recursos.
2. Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS): Esta es la más usada en los programas de simulación ya que las ecuaciones son resueltas con un flujo promediado en el tiempo y la magnitud de las fluctuaciones turbulentas.
3. Large Eddy Simulation (LES): Es un punto medio entre las dos anteriores tomando características de ambos. Como en el DNS la simulación 3D está desarrollada sobre muchos timesteps, no obstante, solo las vorticidades de mayor tamaño son resueltas. Debido a esto la malla puede ser más gruesa que en el DNS porque los movimientos pequeños de fluido son representados por un modelo de sub-malla (SGS).

En Ansys Fluent los modelos de turbulencia están basados en el modelo RANS, a continuación, se presentan en orden de costo de costo computacional por iteración. (Ansys, 2009)

1. Spalart-Allmaras: Un modelo de ecuación de transporte único que resuelve de manera directa con la viscosidad turbulenta modificada. Está diseñada para aplicaciones aeroespaciales que involucran flujos con límites de pared en una malla fina cercana a la pared. Usada para mallas grandes para flujos internos o externos no tan complejos y flujos de capa límite bajo un gradiente de presión.
2. Standard k- ϵ : Es la base del modelo de transporte de dos ecuaciones siendo el modelo por defecto de k- ϵ . Los coeficientes son obtenidos empíricamente y solo pueden ser validados en flujos completamente turbulentos. Permite al igual que los otros modelos k- ϵ comportamiento de calentamiento viscoso, flotabilidad y compresibilidad. Es un modelo robusto ampliamente usado a pesar de sus limitaciones, ya que se desempeña pobremente en flujos complejos que involucran varios gradientes de presión, separación y fuertes curvaturas de líneas de corrientes. Es adecuado para iteraciones iniciales y estudios paramétricos
3. RNG k- ϵ : Es una de las variantes del modelo Standard k- ϵ donde las ecuaciones y coeficientes son obtenidos analíticamente. Su variación radica en la ecuación ϵ que mejora la capacidad de modelar flujos altamente deformados. El modelo nos ayuda en predecir la vorticidad y flujos con bajo Numero de Reynolds. Adecuado para flujos cortantes complejos que involucran rápidas tensiones, remolinos moderados, vórtices y flujos de transicionales locales.
4. Realizable k- ϵ : Es una variante del modelo “Standard k- ϵ ”, el término “Realizable” deriva de cambios que permiten obedecer restricciones matemáticas que mejoran el rendimiento del modelo. Ofrece los mismos beneficios y de aplicaciones similares al modelo RNG, pero es más preciso y converge con mayor facilidad que este.

5. Standard k- ω : Es un modelo de transporte de dos ecuaciones que resuelve para k y ω . Es el modelo básico k- ω . Este genera un alto rendimiento para modelos de flujo limitados por pared y bajo Numero de Reynolds. Este modelo nos permite modelar flujos transicionales, libres de tensión cortante y compresibles. Obtiene mejores resultados para flujos de capa limite limitada por paredes, libre de esfuerzo cortante y números de Reynolds bajos, es adecuado para flujos con capa limite complejos bajo gradiente de presión desfavorables y separador como en aerodinámica externa y turbomáquinas.
6. SST k- ω : Es una variante del modelo “Standard k- ω ” que combina el modelo Wicox original de cerca a paredes y el modelo “Standard k- ε ” alejado de las paredes usando una función mezclada. Además, limita la turbulencia viscosa. Este ofrece los beneficios del modelo “Standard k- ω ”, pero su dependencia en la distancia a las paredes la hace menos adecuada para flujos libres de esfuerzo cortante.
7. Reynolds Stress: Resulta directamente usando las ecuaciones de transporte, evadiendo la suposición de la viscosidad isotrópica de los otros modelos. Es usada para flujos con alta formación de remolinos. Es el modelo RANS más sólido, por lo requiere un mayor costo computacional, además de ser difícil de converger debido al estrecho acoplamiento que tienen las ecuaciones. Es adecuado para flujos 3D bastante complejos con fuertes curvaturas aerodinámicas y remolinos.

2.1.8 Ansys Fluent

Es un software multipropósito de CFD usado para modelar flujos de fluidos, calor y transferencia de masa, reacciones químicas, entre otros. Fluent permite el pre hasta post procesamiento de datos en un mismo programa, además de tener capacidad de modelamiento

de sistemas físicos avanzados que incluyen modelos de turbulencia, flujos monofásicos y multifásicos, combustión, modelamiento de baterías, interacción de estructuras con fluidos, etcétera.

2.2 Estado del arte

En esta subsección se presenta una revisión de las investigaciones más relevantes con directa relación con el tema de distribución de aire en ascensores. A partir de la revisión realizada, se pudo observar que la crisis sanitaria mundial provocada por el COVID-19 evidenció la necesidad de la correcta distribución de aire y ventilación en espacios cerrados, con lo cual la cantidad de estudios relacionados con esta temática presenta un aumento progresivo. A partir de la revisión realizada se pueden resaltar los siguientes trabajos:

Santamaría Bertolín et al. (2023) estudiaron la posición óptima de purificadores de aire y la dirección de impulsión de aire para maximizar la ventilación y minimizar el tiempo de permanencia del aire en el interior de dos cabinas de ascensor. En este estudio se utilizó un enfoque 3D URANS completo con un modelo de turbulencia RNG k- ϵ y un escalar no reactivo para calcular la edad media del aire. El estudio se centró en determinar la efectividad de tres tipos diferentes de rejillas (circular, rectangular y extendida) de ventilación para determinar la edad media del aire y procurar que el estado en el que se encuentra el aire del ascensor sea el óptimo para reducir la cantidad de contaminantes en suspensión. Lo anterior se llevó a cabo teniendo en cuenta escenarios donde el ascensor se encuentra ocupado con la cantidad máxima de pasajeros y cuando se encuentra completamente vacío. Como resultado se obtuvo que la posición óptima del purificador es en la pared lateral más grande de las cabinas para una dirección de flujo descendente. Los caudales, los cuales oscilaron entre 0.4 y 0.6 m³/min dependiendo del tamaño de la cabina, fueron suficientes para garantizar una

ventilación correcta. Aunque una posición óptima puede mejorar considerablemente la ventilación, se demostró que una buena elección del caudal de depuración es más crítica para garantizar una adecuada renovación del aire.

Riddhideep Biswas et al. (2022) realizaron una investigación numérica de un dominio tridimensional que se asemeja a un ascensor utilizando OpenFOAM. Se obtuvieron resultados de simulación a partir de la implementación del modelo de turbulencia $k-\omega$, además para este estudio numérico se implementó un modelo Euleriano -Lagrangiano. Se consideraron tres modos diferentes de ventilación de aire, a saber, ralentí, tiro axial de escape y extractor de aire. La evaluación del riesgo se cuantificó mediante un factor de riesgo basado en el recuento de gotas promediado durante el tiempo presente cerca de la región que va de la mano a la cabeza del pasajero, la zona que se consideró de mayor riesgo. Como parte importante de los resultados que se obtuvieron, el factor de riesgo desciende del 40% en una situación de reposo al 0% en un ambiente seco y caluroso. En un entorno caluroso y seco. En general, las condiciones frescas y húmedas fueron más seguras que las condiciones calurosas y secas, ya que las gotas se depositan rápidamente por debajo de la zona de altura de riesgo debido a sus masas más elevadas mantenidas por una evaporación insignificante. Sin embargo, un ventilador de extracción hizo que el dominio en un entorno seco y caluroso sea completamente seguro (factor de riesgo, 0%) durante 5.5 segundos, mientras que en un entorno húmedo y frío tardó 7.48 s.

Talib Dbouk & Drikakis (2021) desarrollaron un modelo de simulación de fluidos multifásicos aplicado a diferentes condiciones de transporte de aire con el objetivo principal de comprender el impacto de los sistemas de ventilación con respecto a la transmisión de virus aerotransportados y aerosoles en general. Se estudiaron cuatro escenarios (A, B, C y D)

con diferentes configuraciones de ventilación, incluido un purificador de aire para el último caso. Se concluyó que: para el caso A después de 2.5 segundos la mayoría de las gotitas residen en un radio de 0 metros a 0.15 m de la boca del sujeto infectado. Además, se observó que el radio de las gotitas exhaladas oscilaba entre $30\ \mu\text{m}$ y $95\ \mu\text{m}$. Transcurrido el tiempo mencionado, las partículas se disiparon considerablemente a través del volumen de control. Para el caso de la configuración B, las partículas de saliva se dispersaron por el aire en comparación con el caso A, asimismo el radio del tamaño de las partículas se mantuvo en el mismo rango de $30\ \mu\text{m}$ - $95\ \mu\text{m}$. Para el caso C después de 10 segundos, se identificaron 2 acumulaciones de gotas de saliva. Una de ellas situada a un radio de 0.1 m a 0.8 m de la fuente y la otra situada a 1.4 m a 1.7 m en dirección radial. Por último, se concluyó que la configuración de ventilación D muchas de las partículas contaminadas estaban dispersas y situadas en un radio de 0.15 m a 1.7 m de la fuente de contaminación.

Sergio A. Chillón et al. (2023) modelizaron mediante técnicas de dinámica de fluidos computacional el interior de un ascensor en un hospital, una situación donde se propicia la transmisión del virus COVID-19. La cabina se provisionó de un ventilador de extracción y una rejilla para la renovación del aire. Respecto a los modelos matemáticos usados se consideró un enfoque de simulación de fluidos netamente Lagrangiano para realizar el conteo de partículas y definir las físicas de las mismas, además se fijó una temperatura interior de $21\ ^\circ\text{C}$ y se utilizó el modelo de turbulencia Reynolds Average Navier Stokes (RANS) con Shear Stress Transport (SST-K-omega), se utilizó la ecuación de Antoine para calcular la presión de saturación para cualquier temperatura y alcanzar la presión de equilibrio. En el interior se simularon tres eventos: un estornudo, una tos y un discurso continuo. Se hizo presencia de dos individuos dentro del ascensor, uno como portador y el otro como receptor,

ubicados a 1.5 metros de distancia el uno del otro para observar el riesgo de propagación de las gotas emitidas y su impacto en el riesgo de propagación de enfermedades. Se analizó la eficacia del ventilador en la expulsión de gotas, así como las condiciones ambientales de un entorno clínico. Para ello, se contó la cantidad de gotas en el interior durante todo el tiempo de las simulaciones. Como se resultado se obtuvo que el ventilador era capaz de expulsar el 60% de las gotas pequeñas, pero también influía considerablemente en la dispersión de partículas en el interior. Finalmente, se concluyó que la situación de mayor riesgo de contagio fue el discurso continuo, seguido por estornudo, debido a la cantidad de gotículas suspendidas en el aire.

Du & Chen (2022) investigaron a través de la computacional de fluidos basado en un modelo de turbulencia RNG k- ϵ para predecir el flujo de aire y el transporte de contaminantes al interior de una cabina de ascensor en relación con el lobby del mismo. Se validó la precisión del modelo CFD mediante datos experimentales obtenidos de una maqueta de la cabina vacía de un avión a escala. El comportamiento del fluido en el volumen estudiado fue muy similar al que se obtendría si estuviese en un ascensor. En esta investigación se estudiaron diferentes actividades respiratorias del individuo: sólo respirar, hablando y tosiendo con y sin mascarillas, donde en todos los casos se tuvo en cuenta las partículas generadas por la respiración nasal. Del estudio se concluyó que la tendencia a que los pasajeros más cercanos a la persona portadora del virus tuvieran una mayor ingesta de virus sugiere la eficacia del distanciamiento, incluso para pequeñas partículas aerotransportadas. El distanciamiento también reduce la exposición a partículas más grandes, ya que tienen un alcance de transporte más corto. La ingesta de virus por parte de otros pasajeros puede reducirse a sólo un 7%-15% si la persona portadora se tapa la boca al toser. Mientras tanto,

los resultados indicaron un riesgo de infección mucho mayor en el caso en el que los pasajeros se encuentran hablando. Los dos pasajeros más cercanos a la persona portadora presentaban el mayor riesgo de infección, ya que la dosis viral superaba el umbral. El caso de la persona que habla demuestra la importancia de la orientación, ya que los pasajeros situados más abajo eran los que corrían un mayor riesgo de infección. Finalmente se observó que: en general, la actividad respiratoria puede considerarse insignificante cuando se tose o se habla.

Tristan Yeo Eng Kee et al. (2020) investigaron un diseño alternativo sustituyendo el ventilador de admisión por uno de extracción dentro de un ascensor de pasajeros Schindler mediante Ansys Fluent. El aire dentro de la cabina fue enfriado y mantenido en 24 °C. Se asumió que la velocidad del ascensor fue constante e igual a 1 m/s durante la simulación. Fueron preparadas dos configuraciones diferentes dentro del ascensor donde una de ellas tuvo la configuración de ventilación tradicional que consiste en un ventilador de aspiración de flujo cruzado con orificios de salida de aire en las zonas inferiores de las paredes de la cabina y otra configuración de ventilación alternativa que constó de un ventilador de extracción y rejillas de ventilación de ángulo ajustable también en la parte inferior. Para el desarrollo del estudio se propuso determinar que ángulo de las rejillas fue más efectivo para renovar al aire dentro del volumen. Para proveer precisión en los resultados de la turbulencia de selecciono el modelo de turbulencia k-ε. Se recurrió a un mallado tetraédrico donde se observaron cambios mínimos en mallas entre 400.000 y 500.000 celdas por lo tanto se seleccionó un tamaño de malla de 450.000 celdas. Finalmente se concluyó que los ángulos que proporcionaban una mayor velocidad de flujo de aire son 50° y -30° con respecto a la horizontal, además también, luego del análisis de las trayectorias y velocidades del flujo de aire se concluyó que el sistema alternativo de ventilación planteado fue más efectivo en

proveer mayores valores de la velocidad promedio de flujo de aire dentro de la cabina del ascensor de pasajeros.

Sumei Liu et al. (2022) tuvieron como objetivo principal estudiar los diferentes parámetros de diseño del ascensor que podrían tener un impacto importante en la exposición a las partículas suspendidas en el aire. El estudio se centró en la dinámica computacional de fluidos en régimen transitorio aplicado a la exposición a partículas suspendidas en el aire en el trayecto de un ascensor en un edificio de 35 plantas. El ascensor se desplazó desde la planta baja hasta la planta 35 con dos paradas en las plantas 10 y 20, durante 114 segundos. El tamaño del vestíbulo del ascensor era de 11.5 m de largo, 5.0 m de ancho y 4.0 m de alto. La cabina del ascensor representaba un modelo estándar con capacidad para 1600 kg, con dimensiones de 2.0 m de largo, 1.65 m de ancho y 2.5 m de alto. Los difusores que suministran aire al vestíbulo estaban instalados en el techo del vestíbulo. El tamaño de los difusores era de 0.4 m x 0.4 m x 0.03 m. Se analizaron 7 casos con diferentes configuraciones de ventilación donde se utilizaron diferentes flujos masicos en la entrada de aire. Para el estudio de la turbulencia se hizo uso del modelo RNG k- ϵ y se utilizó el software Ansys Fluent para el cálculo de las ecuaciones. Para simplificar la simulación se representaron las personas como columnas ya que se encontró baja influencia relacionada con la geometría de los mismos en los resultados de los campos de velocidad y presión. Se estableció que el promedio del diámetro de partículas simuladas fue de 0.4 μ m. El método numérico utilizado fue el SIMPLE algoritmo (método semi-implícito para ecuaciones acopladas de presión y velocidad) para el acoplamiento de las ecuaciones de presión y velocidad. Este estudio utilizó el modelo de paseo aleatorio discreto (DRW, por sus siglas en inglés) para calcular la dispersión turbulenta de las partículas. Se utilizó la versión 2.4.6 del software Gambit para

generar una malla tetraédrica y por lo tanto no estructurada para de esta forma, discretizar las ecuaciones de transporte principales. Cada uno de los 8 casos de estudio se utilizaron diferentes mallados desde 3.65 millones de elementos, 3.62, 0.76, 3.17, 0.67, 2.95, 0.48 y 2.87 millones desde el primer hasta el último caso respectivamente. Durante el estudio se concluyó que, Debido a la corta duración del viaje en ascensor, los casos en los que se contó con una alta ventilación las personas tuvieron una exposición baja a partículas. En el caso de referencia, con una tasa de ventilación de 72 cambios de aire por hora, la dosis acumulada más alta de partículas para un pasajero susceptible cercano a la persona índice fue de solo 261.59 partículas. La dosis para el pasajero que estaba enfrente del pasajero índice fue la más alta antes de salir en el piso 20. Finalmente se concluyó que, debido a la distribución altamente no uniforme de las partículas en la cabina del ascensor, la dosis acumulada no era inversamente proporcional a la tasa de ventilación.

N. N. Peng (2021) estudiaron el comportamiento del fluido dentro de un ascensor con 6 ocupantes, cuyas dimensiones fueron de 1.55 m de ancho, 2.6 m de largo y 2.5m alto. El volumen interno de la cabina constituye 9.75 m^3 . Los pasajeros se ubican en dos filas separadas entre si 0.4 m dentro de la cabina del ascensor a su vez se ubicaron separados uniformemente uno de otro 0.9 m a lo largo de las filas anteriormente mencionadas. Los modelos tridimensionales de los mismos midieron 1.7 m de alto y el cuerpo de las personas fueron constituidos por dos bloques rectangulares representando la cabeza y el cuerpo. Fueron usadas alrededor de 650.000 celdas generando un mallado hexaédrico, así mismo la malla cercana a la superficie de los pasajeros fue refinada con un tamaño de celda mínimo de 1.75 mm, siendo así, el tamaño de celda más grande dentro de todo el dominio fue de 28 mm. Se estableció que la respiración de los pasajeros tiene una velocidad de 1 m/s mientras

que la acción de toser y estornudar produjo flujos de aire cuya velocidad se determinó en 10 m/s y 15 m/s respectivamente. Los ciclos de respiración se asemejan a una función de senoidal de periodo 5.7 s en el caso de la actividad de toser y menos de 0.5s cuando se estornuda. El número de partículas eyectadas al toser y estornudar se estableció en 3500 y 11700 respectivamente para cada vez que ocurra durante la simulación. Se trataron 5 casos con diferentes configuraciones de ventilación y diferentes velocidades de aire en la entrada. Respecto al modelo matemático se le dio un enfoque Euleriano-Lagrangiano, y se emplearon las ecuaciones de Navier-Stokes para un fluido isotérmico e incompresible. Para simular el flujo de aire y el transporte de partículas se utilizó el software de cálculo de las ecuaciones fue OpenFOAM además del solver MPPICFoam y el método numérico PIMPLE. Para al modelo de turbulencia se optó por un enfoque de tipo LES (Large Eddy Simulation) y se utilizó el modelo SGS para el cálculo de la turbulencia. También se empleó la hipótesis de Boussinesq. Se implemente el modelo “patchFlowRateInjection” en OpenFOAM para la simulación de las partículas exhaladas. Al investigar la influencia del tamaño de la malla se seleccionó como ejemplo representativo el caso base del estudio correspondiente al caso del modelo 1, la malla fue refinada hasta alcanzar 1.4 millones de elementos con un tamaño mínimo de 1.5mm y uno máximo de 20mm. Se compararon los movimientos de partículas en diferentes modos de ventilación: natural y forzada. Se observó que la mayoría de las partículas exhaladas por estornudos y una parte de las partículas expulsadas por la tos se depositan rápidamente en las superficies cercanas. Sin embargo, en casos de tos y estornudos, algunas partículas se depositan más lentamente. Por otro lado, las partículas generadas por la respiración tienden a suspenderse en el aire durante períodos prolongados y dispersarse lentamente. La circulación forzada del aire puede afectar la suspensión de partículas en el aire, tanto aumentándola como suprimiéndola. Las partículas más grandes pueden

permanecer en el aire en lugar de depositarse en superficies sólidas, mientras que las partículas más pequeñas se aceleran, facilitando su deposición.

Nirvik Sen (2021) estudió 11 diferentes configuraciones de ventilación para un ascensor con tres personas adentro. En este trabajo se adoptó un modelo tridimensional Euleriano-Lagrangiano para entender la transmisión y evaporación de microgotas en el aire. Las dimensiones del elevador 1.5 m x 1.5 m x 2.0 m, el cual, está equipado con un ventilador en la parte superior de la cabina del ascensor de diámetro 0.67 m que empuja el aire hacia adentro de la cabina para luego salir a través de las ranuras. Las geometrías para representar los pasajeros fueron simplificadas a las dimensiones de un rectángulo de 1.7 m de altura. La boca se ubicó a 1.6 m de altura desde la parte inferior de la cabina del ascensor. Además de las ecuaciones de flujo se tuvo en cuenta ecuaciones de energía y transporte de especies, ya que, la humedad y la temperatura afectan la evaporación de las partículas y su transporte. Para simular la turbulencia se hizo uso del modelo Reynolds stress. Respecto a las condiciones de frontera se consideró la boca como un rectángulo con medidas de 40 x 0.8 mm y se configuraron 3 diferentes valores de velocidad de aire 0 m/s, 0.25 m/s y 0.5 m/s, mientras que en el caso las personas tosiendo se estableció una velocidad del aire de 8.5 m/s durante 0.12 s. Así mismo se estableció una temperatura constante de 30 °C y una humedad relativa del 30%, exceptuando para los últimos dos casos cuya humedad relativa fue del 50% y 70%, respectivamente para el caso 10 y 11. Para el mallado del dominio se escogió una malla tetraédrica no estructurada y se evaluaron 3 diferentes densidades ($2.28 \cdot 10^5$, $2.9 \cdot 10^5$, $4.13 \cdot 10^5$ celdas/m³), para entonces concluir que la densidad de $2.9 \cdot 10^5$ celdas/m³ son suficientes para resolver el campo de flujo del elevador. Los resultados de la simulación muestran que siempre que el ventilador esté encendido (velocidad del flujo de aire de 0.25

m/s a 0.5 m/s), las gotas generadas debido a la tos son arrastradas hacia el suelo. Sin embargo, si el ventilador está apagado, en ausencia de una corriente descendente continua de aire, las gotas de la tos pueden circular en el ascensor debido al campo de flujo generado por el soplo de aire exhalado junto con las gotas de la tos. Por lo tanto, es necesario tener un ventilador en funcionamiento para evitar esta posible circulación de gotas. De igual forma, se evidencia en los resultados que la probabilidad de que microgotas lleguen a la cara de las personas es muy baja siempre y cuando se mantengan las posiciones simétricas alrededor del flujo del aire suministrado por el ventilador. En caso de que el ventilador se apague y una persona tosa existe una probabilidad del 40% de que las gotas alcancen el rostro de la persona que se encuentran en frente.

Nouri et al. (2021) centraron su estudio en evaluar la eficacia del uso de un protector facial o mascarilla como barrera contra la propagación de partículas virales, el estudio utilizó el programa Ansys Fluent para solucionar las ecuaciones de transporte, lograr simular la transmisión del virus y modelar los flujos en régimen transitorio. Hicieron uso de del modelo de turbulencia tipo RANS, específicamente el modelo RNG K- ϵ , argumentando que se manejan bajos números de Reynolds. Para relacionar los valores de velocidad y presión utilizaron el método numérico SIMPLE y además tuvieron en cuenta un flujo multifásico considerando así la humedad del aire. La principal conclusión obtenida se relaciona con la distancia segura de propagación, según los resultados obtenidos en esta investigación esta distancia horizontal se sitúa en 2.5 metros. Así mismo se obtuvieron resultados relacionados con los diámetros de las partículas en suspensión. Las gotas más grandes tienen un diámetro de 110 μm y las más pequeñas se encuentran entre 1-3 μm .

Xian Li & Feng (2023) estudiaron el comportamiento de los fluidos contenido en una cabina de ascensor, con medidas de 1.4 m x 1.35 m x 2.1 m que corresponden con largo, ancho y alto respectivamente. Se estudiaron diferentes configuraciones de ventilación a lo largo de 4 casos de estudio distintos. Se investigó la transmisión de aerosoles producidos por la respiración nasal y la tos bucal. Se implementó el uso del programa Ansys Fluent para el cálculo de las ecuaciones de transporte. Se adoptó un modelo RNG K- ϵ para simular la turbulencia además del método Lagrangiano para el rastreo de partículas. Se utilizó el método semi implícito SIMPLE para relacionar las ecuaciones de velocidad y presión y se implementó la hipótesis de Boussinesq para considerar el efecto térmico responsable de la flotabilidad de las partículas en suspensión. Respecto al mallado del dominio computacional se hizo uso de una malla estructurada de elementos Poly-hexaédricos y se refinó con un tamaño de 30 mm en las paredes limítrofes a los sujetos dentro de la cabina a excepción de la nariz y la boca donde se aumentó el refinado a un tamaño de elemento de 1 mm y se aumentó a 50 mm para el mallado volumétrico de la cabina, lo anterior constituyó un total de 1.21 millones de elementos. Las dimensiones de la entrada de aire fueron de 352 mm x 50 mm y las dimensiones de las ranuras de salida de aire fueron variando según el sistema de ventilación estudiado. La temperatura y la humedad del aire exhalado fueron de 33 °C y 85% respectivamente, sin embargo, la temperatura del aire suministrado fue de 22.5 °C y con una humedad relativa del 28.7%. La validación de los modelos se hizo mediante un experimento donde se media la velocidad del aire en determinados puntos dentro del ascensor. Los resultados fueron analizados en función de la edad del aire, por lo tanto, Finalmente se concluyó que los aerosoles se distribuyeron homogéneamente dentro de la cabina del ascensor durante todo el período bajo la ventilación mixta. Debido a la falta de una salida de aire adecuada y al arrastre del vórtice, los aerosoles en forma de gotas se acumularon en la

cabina y fueron difíciles de descargar. La proporción depositada de aerosoles de gotas para ventilación mixta con 420.92 ACH fue significativamente mayor que para ventilación por desplazamiento 5 con 5.38 ACH y cortina de aire con 20.92 ACH.

De los estudios reportados recientemente en la literatura muestran una creciente preocupación por estudiar y proponer mejorar de distribución de aire en ascensores para mitigar el potencial de transmisión de enfermedades respiratorias a partir de la aplicación de diferentes técnicas y métodos de filtración. Se evidenció un amplio uso de modelos de simulación de partículas y su comportamiento en presencia de humedad en el aire, ofreciendo resultados relacionados con la concentración de las partículas en el aire y diámetro de las mismas, donde se reportaron conclusiones a cerca de las zonas de estancamiento de partículas. Por otro lado, para el modelado de la turbulencia es popular los modelos de tipo RANS como el K- ϵ y el K- ω , sin embargo, también, se notó el uso de modelos más complejos como el Reynolds Stress para simular casos de mayor complejidad. También fue de interés el estudio del comportamiento de los chorros de aire a través de rejillas, el uso de purificadores del aire y cambios en el ACH de las configuraciones de ventilación. En estos casos se evaluaron los resultados en términos de la edad media del aire en zonas específicas como las respirables y la efectividad del sistema de ventilación para evacuar el aire contaminado.

3 Metodología

3.1 Descripción del sistema de estudio

En este estudio se analizó el comportamiento del aire dentro de la cabina de un ascensor para pasajeros basado en el diseño instalado en la escuela de ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, tal como se muestra en la Figura 1.

Figura 1 Cabina del ascensor de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.



El ascensor de marca Schindler tiene medidas interiores generales de: 1.40 m, 1.50 m, 2.25 m que corresponden con el largo, ancho y alto respectivamente, sin embargo, a causa de la geometría de los elementos de mando y terminados estructurales de la cabina, el volumen del ascensor constituye realmente $4.4 m^3$.

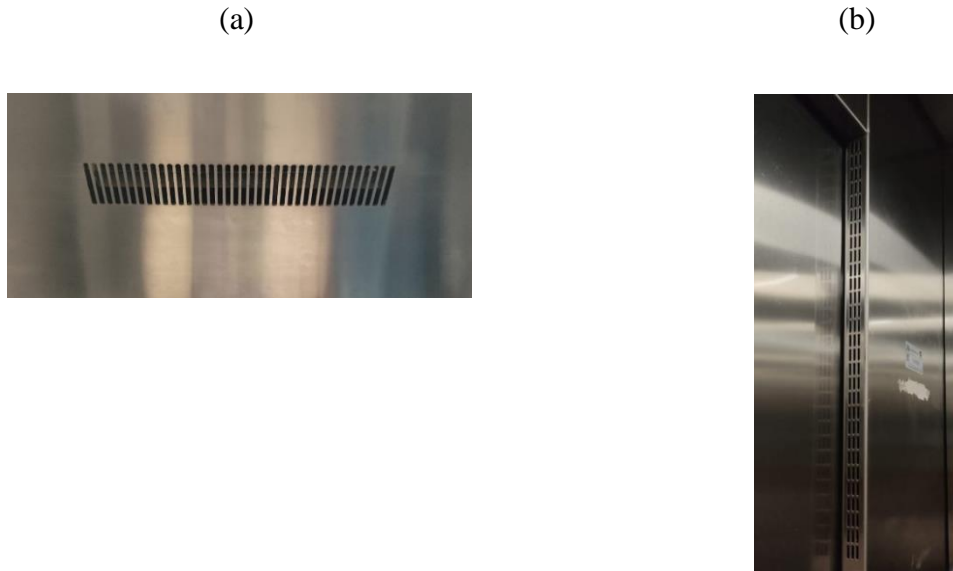
La configuración de ventilación con la que cuenta el ascensor de la universidad actualmente se compone de rejillas fijas cuya posición dentro de la cabina se detalla en la Figura 2. Estas permiten el flujo de aire producido por un ventilador ubicado por fuera de la cabina.

Figura 2 Ubicación de las Rejillas de ventilación



Las rejillas de entrada de aire que conforman la entrada de aire constan de 38 ranuras equidistantes a lo largo de 30 cm, como se muestra en la Figura 3a, las ranuras tienen medidas de 5 cm de largo y 0.5 cm de ancho cada una, por otro lado, para la salida del aire el ascensor cuenta con 4 líneas de rejillas fijas, ubicadas lateral y simétricamente en los marcos de las puertas, como muestra la Figura 3b, consta de 29 ranuras de 1.5 cm de largo por 0.5 de ancho, también equidistantes a lo largo de 1.5 m. Lo anterior constituye un área de ventilación de 348.5 cm^2 .

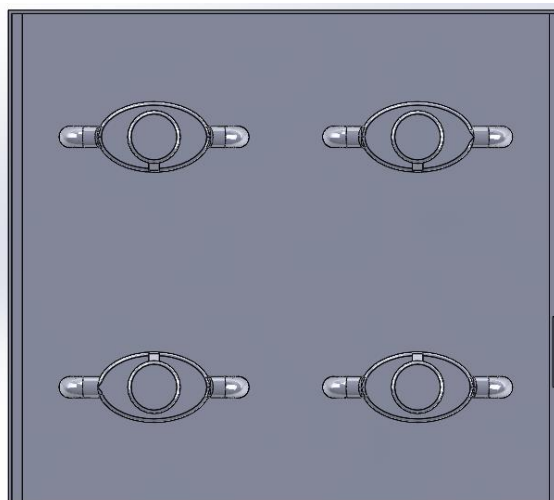
Figura 3 (a) Rejillas de ingreso de aire. (b) Rejillas de evacuación de aire.



3.2 Casos de estudio

Para establecer el caso base de este estudio se introdujeron cuatro personas en el volumen de la cabina como se muestra en la Figura 4. Cada persona está separada entre si 0.75 m medidos desde el centro del solido que representa la cabeza de cada persona.

Figura 4 Modelo CAD de la ubicación de las 4 personas dentro del ascensor.



En el Caso 1 y 2 la velocidad de entrada de aire se estableció en 1.5 m/s. Por otro lado, en los demás casos fue de 1 m/s. Para el Caso 1 se simuló la configuración de ventilación inicial descrita en capítulos anteriores, con el propósito de evaluar las condiciones de ventilación actuales del ascensor.

En el Caso 2, se pensó en una mejora del caso inicial, manteniendo el mismo tipo de entrada de aire, aumentando el ACH y cambiando la posición de la salida de aire para favorecer la evacuación del aire caliente. Se asumió una entrada de aire de cortina de aire de 5 cm de ancho y 0.6 m de largo. La salida fue una rejilla simplificada a un cuadrado de lado 20 cm ubicada en el techo de la cabina a 25 cm de la pared.

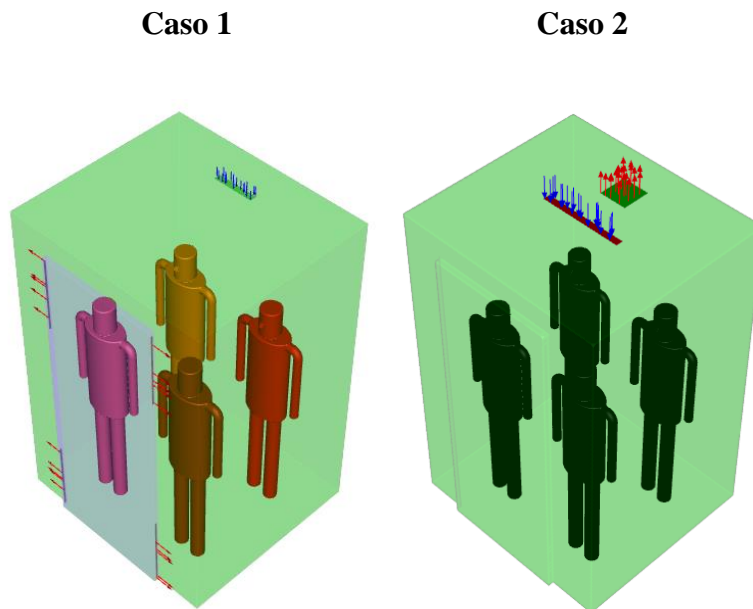
Para el Caso 3, se simuló una variante de la configuración anterior cambiando la forma de la entrada de aire, manteniendo la idea inicial de favorecer el flujo de salida del aire contaminado en las áreas superiores. Se usó una entrada de aire tipo boquilla de 20 cm de diámetro y las salidas dispuestas en el techo en rejillas de 12 cm de lado.

En el Caso 4 y 5, se evaluó una configuración diferente a las anteriores, localizando las entradas de aire en zonas bajas del volumen de la cabina, y las salidas, esto para garantizar que el flujo de aire proveniente de la entrada recorra todo el volumen antes de evacuar definitivamente, de esta manera se buscó lograr una mejora en la efectividad de reemplazo de aire y una mejora significativa en la edad media del aire. Se ubicaron la salida y la entrada de aire en el techo y el suelo respectivamente, las cuales tienen dimensiones de 0.4 m de largo por 0.1 m de alto, mientras que para el Caso 5 se usó una entrada de aire en la parte inferior de 1.2 m por 1 cm y una salida de aire cuadrada situada en el techo de 15 cm de lado.

Finalmente, para el Caso 6, la intención fue evaluar la efectividad del efecto de cortina de aire para aislar a las personas de los contaminantes en suspensión y nuevamente se evaluó la posibilidad de situar las entradas y salidas de aire en el techo de la cabina. las salidas de aire fueron cuadradas de 15 cm de lado y para las entradas una cortina de aire en forma de cruz de 2 cm de ancho y 1 m de largo.

A continuación, en la Figura 5 se presentan los esquemas de los casos de estudio desarrollados. Para cada caso, los vectores azules indican la entrada del aire al elevador, mientras los vectores rojos indican la salida del aire. En la Tabla 1 se presentan las características de cada caso de estudio con sus respectivos valores de cambio de aire por hora según el área de ventilación y velocidad del flujo de entrada. Estos valores se definieron considerando la efectividad de la distribución de aire establecida en el estándar ASHRAE 62.1 (ASHRAE, 2022).

Figura 5 Esquemas de los casos de estudio simulados



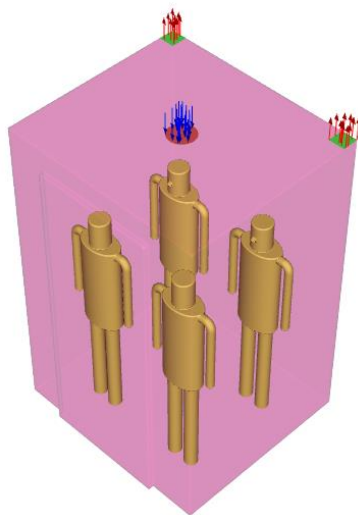
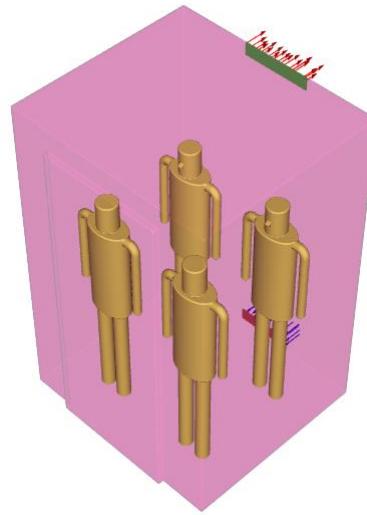
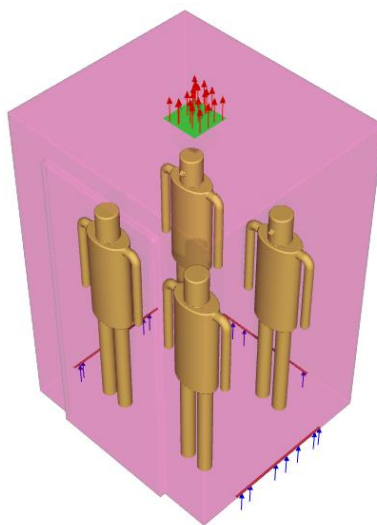
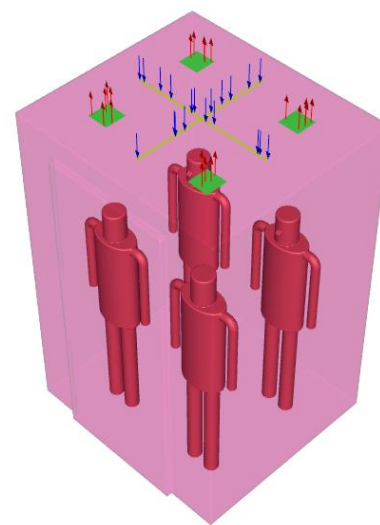
Caso 3**Caso 4****Caso 5****Caso 6**

Tabla 1 Resumen listado de escenarios y configuraciones de ventilación simuladas.

Número del caso	Entradas de aire	Salidas de aire	ACH
1	1	2	15.17
2	1	1	30.43
3	1	2	21.21
4	1	1	27.05
5	3	1	32.46
6	1	4	26.78

3.3 Características del Modelo CFD

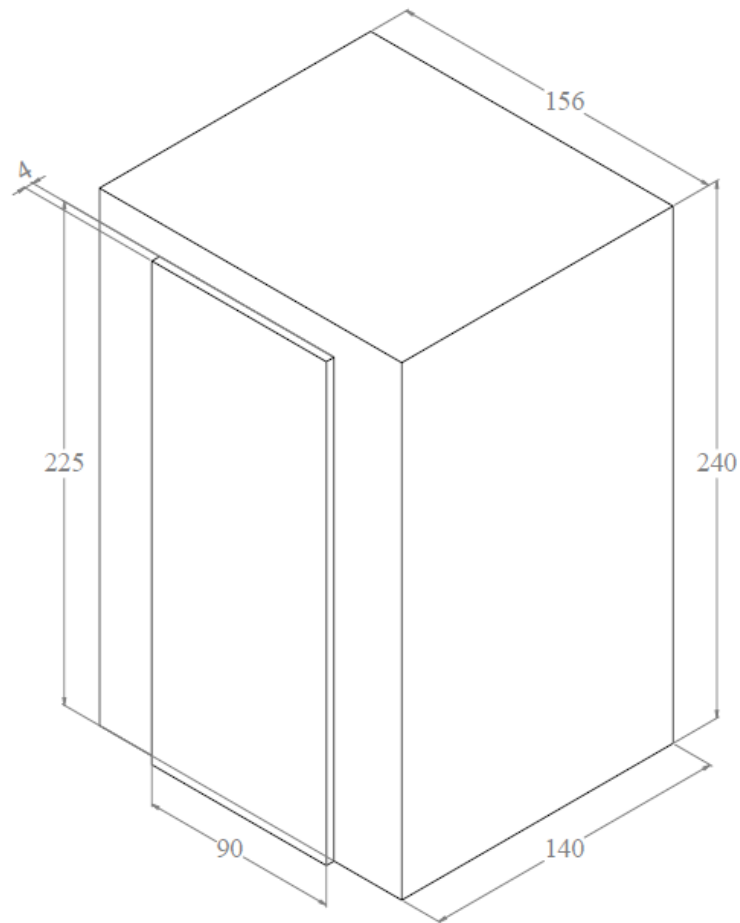
En cuanto al cómputo, se utilizó el Software de simulación de fluidos Ansys Fluent para resolver las ecuaciones de Navier Stokes. Las variables relacionadas al campo de flujo fueron consideradas estacionarias. Se implemento el punto de vista RANS (Reynolds Average Navier Stokes) para la solución de las ecuaciones relacionadas al modelo de turbulencia. Se hizo uso de un método numérico semi-implícito (SIMPLE) para las ecuaciones y relacionar las variables de presión y velocidad. Fue adoptado un esquema de discretización de segundo orden.

Además, se asumió que la cabina se mueve a velocidad constante durante la simulación, y, por lo tanto, no se consideraron fuerzas sobre el volumen de aire provenientes de la aceleración del movimiento. Por otro lado, las fuerzas de flotabilidad si fueron consideradas, así como la presencia de la transferencia de calor proveniente del cuerpo de lo sujetos y la presencia de especies.

3.4 Dominio computacional y geometría

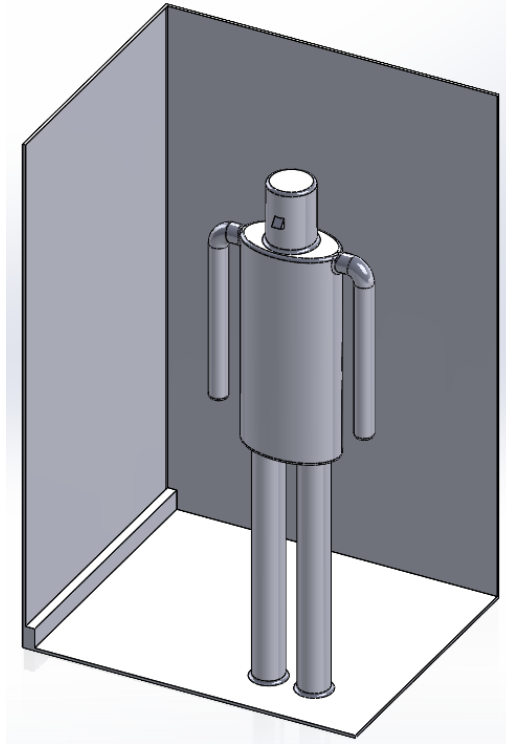
En el caso del sólido tridimensional se empleó el software de modelado SolidWorks para obtener un dominio computacional geoméricamente similar a la cabina del ascensor. En la Figura 6 se muestra el dominio computacional utilizado en todos los casos estudiados, así como sus medidas expresadas en centímetros. Es importante resaltar que no se hizo el modelado más allá de la cabina misma del ascensor, todas las estructuras de ventilación fueron omitidas en esta fase, ya que esto tiene que ver con las condiciones de frontera que más tarde se establecerán en Ansys.

Figura 6 Geometría y medidas del modelo tridimensional de la cabina del ascensor de la escuela de Ingeniería Mecánica.



La altura de los sujetos fue de 1.70 m, y el área superficial total fue de 1.4 m², como se muestra en la Figura 7. Por simplicidad las orejas, manos y pies no fueron considerados durante las simulaciones y el cuerpo humano fue conformado por sólidos basados en figuras geométricas simples.

Figura 7 Geometría del sujeto dentro del ascensor.



3.5 Mallado

Para el mallado del dominio se utilizó Ansys Meshing. Se seleccionó una malla estructurada de elementos Poly-hexaédricos, A continuación, en la Tabla 2 se encuentran las dimensiones de los refinamientos realizados en cada región específica del dominio.

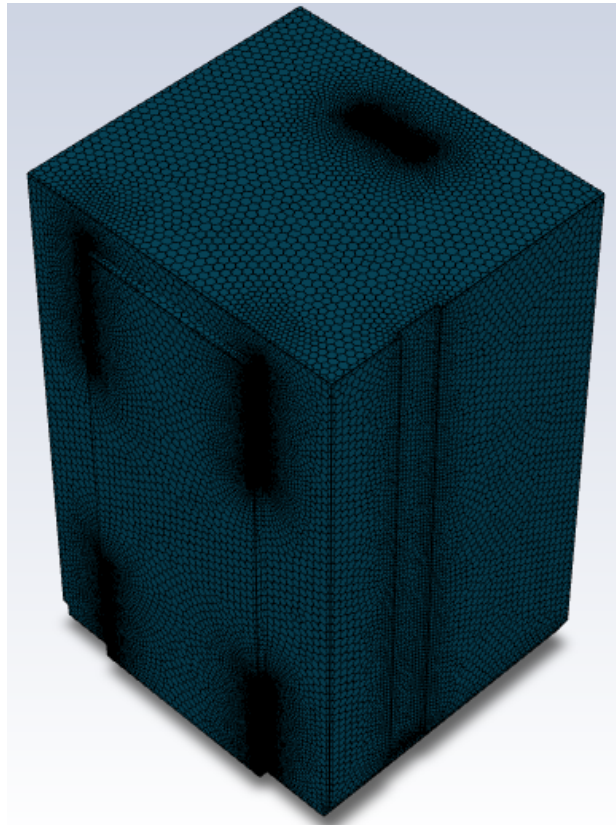
Tabla 2 Medidas del refinamiento del mallado.

Región	Refinamiento [mm]
Cabina	60
Entradas y Salidas	3.75
Superficie del cuerpo	7.5
Paredes	15

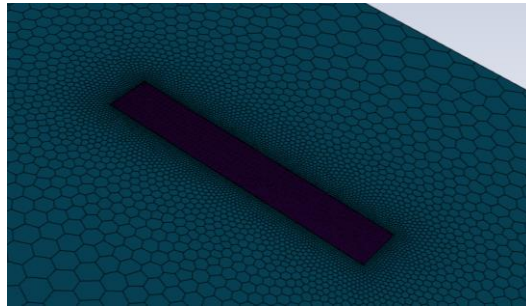
La anterior configuración de refinamiento en el mallado constituyó alrededor de 1.5 millones de elementos, el número de elementos varía con la cantidad de personas que se tengan en cuenta en el dominio y con el área de ventilación.

A pesar de la presencia de rejillas en las entradas y salidas de aire, las geometrías que corresponden al mismo fueron simplificadas a rectángulos con las medidas respectivas a cada caso de estudio para evitar el aumento injustificado del número de elementos en esa zona. En la Figura 8 se muestran los detalles de los refinamientos de cada zona del dominio.

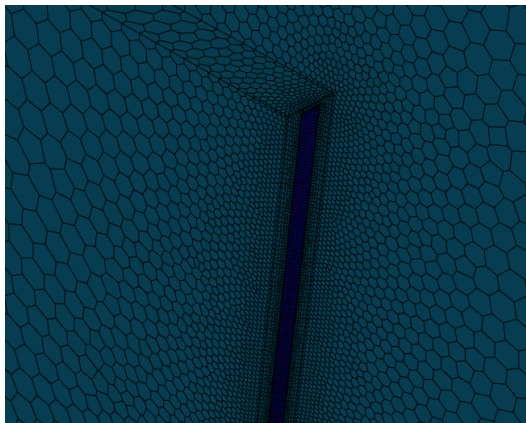
Figura 8 (a) Vista isométrica general del mallado del dominio computacional. (b) Refinamiento del Inlet. (c) Refinamiento del outlet. (d) Refinamiento de la pared limítrofe del cuerpo.



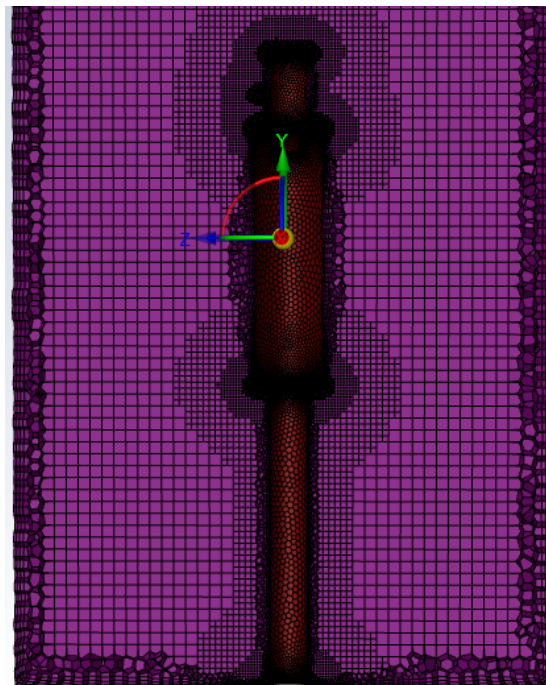
(a)



(b)



(c)



(d)

3.6 Selección de modelos

Teniendo en cuenta que se dispone de la aplicación de modelos tipo DNS (Direct Navier Stokes Simulation) y tipo LES (Large Eddy Simulation) se escogió un enfoque RANS (Reynolds Average Navier Stokes Simulation) porque permite reducir considerablemente la demanda del cálculo computacional al no requerir un mallado extremadamente refinado en comparación al enfoque DNS. Así mismo esta clase de modelos de turbulencia analizan vorticidades pequeñas cercanas a las paredes que no son de especial relevancia en este estudio. A pesar de que el enfoque de tipo LES permite modelar vorticidades grandes que pueden llegar a ser de interés, el costo computacional se eleva considerablemente al no tratar con valores promedio de las condiciones de frontera en las ecuaciones de Navier-Stokes. Los modelos de tipo RANS permiten el modelado de la turbulencia sin requerir mayor capacidad de cómputo.

Se descartaron los modelos como el Spalart-Allmaras ya que, fue diseñado para aplicaciones de flujos presentes en aeronáutica, por lo tanto, funcionan más adecuadamente para modelar flujos de ese tipo.

Ahora, debido a la naturaleza del caso de estudio, según los antecedentes revisados en la literatura aún restan modelos de tipo RANS que modelan satisfactoriamente este tipo de situaciones. Se suelen utilizar los modelos $K-\omega$ y $K-\varepsilon$ RNG, además, del modelo Reynolds Stress. De los anteriores sobresale el modelo $K-\varepsilon$ RNG, ya que tiene un buen comportamiento para bajos números de Reynolds y se adapta correctamente al modelo de estudio. Según la revisión bibliográfica es preferido por sobre el modelo $K-\omega$ al ofrecer resultados más próximos a las pruebas experimentales. No obstante, se tomó la decisión de descartarlo debido a que, se comprometía la estabilidad numérica debido a la naturaleza

transitoria del fenómeno. Por lo anterior se seleccionó el modelo Reynolds Stress a pesar de involucrar un mayor número de ecuaciones y elevar el costo computacional, ya que de esta manera se favorece la convergencia.

Al momento de modelar la convección natural se optó, en un primer momento, por utilizar la hipótesis de Boussinesq, sin embargo, la presencia de humedad es incompatible con la con misma, y por lo tanto se seleccionó la ley de gases ideales en flujos incompresibles para modelar el efecto de convección natural en el campo de velocidad.

3.7 Ecuaciones gobernantes

3.7.1 Modelo de turbulencia Reynolds Stress

A continuación, se presenta el modelo de turbulencia Reynolds Stress.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u'_i u'_i}) + C_{ij} = D_{T,ij} + D_{L,ij} - P_{ij} - G_{ij} + \Phi_{ij} - \epsilon_{ij} - F_{ij} \quad (9)$$

$$C_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \overline{u'_i u'_i}) \quad (9.1)$$

$$D_{T,ij} = -\frac{\partial y}{\partial x_k} [\rho \overline{u'_i u'_i u'_k} + \overline{p(\delta_{kj} u'_i + \delta_{ki} u'_j)}] \quad (9.2)$$

$$D_{L,ij} = \frac{\partial y}{\partial x_k} [\mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_i})] \quad (9.3)$$

$$P_{ij} = \rho \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + u'_j u'_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \quad (9.4)$$

$$G_{ij} = \rho \beta (g_i \overline{u'_j \theta} + g_j \overline{u'_i \theta}) \quad (9.5)$$

$$\Phi_{ij} = p \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \quad (9.6)$$

$$\epsilon_{ij} = 2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \quad (9.7)$$

$$F_{ij} = 2\rho\Omega_k(\overline{u'_j u'_m} \epsilon_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} \epsilon_{jkm}) \quad (9.8)$$

3.7.2 Edad del aire

La edad del aire promedio local en un punto “r” está definida como la edad promedio de todas las partículas de aire llegando a ese punto (Claude Alain Roulet, 2008). La ecuación (10) modela matemáticamente lo anterior.

$$\frac{\partial \rho \Phi_i}{\partial t} - \nabla \cdot (\Gamma_i \nabla \Phi_i) = S_{\Phi_i} \quad (10)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \Phi_i - \Gamma_i \nabla \Phi_i) = S_{\Phi_i} \quad (10.1)$$

$$\Gamma_i = 2.88 \times 10^{-5} \rho + \frac{\mu_{eff}}{0.7} \quad (10.2)$$

$$ACE = \frac{EMA}{EMA_{outlet}} \quad (10.3)$$

3.8 Condiciones de frontera

A continuación, se presentan en la Tabla 3, las condiciones de frontera y de operación establecidas. La temperatura y la humedad del aire circundante dentro de la cabina son las condiciones del aire promedio de Bucaramanga cuyos datos se extrajeron del Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientes (Instituto de Hidrología, 2005). El aire suministrado se estableció con las mismas propiedades físicas que dentro de la cabina. Esto fue así ya que se provoca la entrada del aire directamente del ambiente exterior sin hacer uso de sistemas de aire acondicionado que cambien las propiedades del aire.

Tabla 3 Condiciones de frontera del modelo numérico.

Frontera	Configuración	Temperatura [°C]	Especies
Entradas	Entrada de velocidad	25	H ₂ O=0.0157 O ₂ =0.22639
Salidas	Presión atmosférica	N. A	N. A
Pared de la cabina	Pared no deslizamiento	Adiabática	N. A
Pared del cuerpo	Pared no deslizamiento	31	N. A

Nota: En cuanto a las especies solo se mencionan dos de las tres presentes en el aire ya que

Ansys Fluent calcula el porcentaje restante que corresponde al nitrógeno.

4 Resultados y discusión

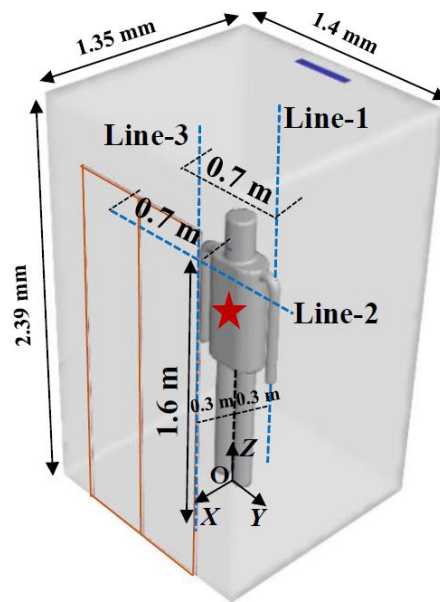
4.1 Procedimiento de validación

Para la validación del modelo CFD se tomó como referencia el artículo de Li & Feng (2023) donde se recopilan datos experimentales mediante la medición de la velocidad del aire en siete puntos específicos distribuidos cada 0.3 m en dirección vertical a lo largo de una línea ubicada a 0.3 m entre la espalda del sujeto. La entrada de aire en el caso base del artículo se muestra con un rectángulo azul tal como se muestra en la Figura 9. Esta configuración es similar a nuestro caso base tal como se muestra en la Figura 5, y también considera solo un ocupante. Los resultados obtenidos en el proceso de validación se muestran en la Figura 10. Los datos de referencia para la validación fueron extraídos del artículo anteriormente mencionado.

Es importante mencionar que, en el artículo citado se utilizó un mallado de 1.21 millones de elementos y, además, la simulación de la turbulencia de los perfiles de velocidad y del campo de flujo fueron estimados a partir del modelo RNG k- ϵ . Como se evidencia en la revisión bibliográfica, es frecuente preferir este modelo para esta aplicación específicamente, pero, a pesar de la consideración de la humedad relativa del aire, los autores hacen uso de la hipótesis de Boussinesq para modelar el efecto de la convección natural y la flotabilidad de las partículas, aun cuando esta ecuación no es compatible con la presencia de especies en el aire. Por encima de lo anterior en el artículo se logra validar el modelo CFD con estas características debido a que la humedad relativa era muy baja y cercana al 10%. Sin embargo, en nuestro caso particular es necesario considerar una humedad relativa muy superior en comparación, y por consiguiente no es posible modelar correctamente la humedad del aire y la convección natural a través de la hipótesis de Boussinesq, ya que se obtienen

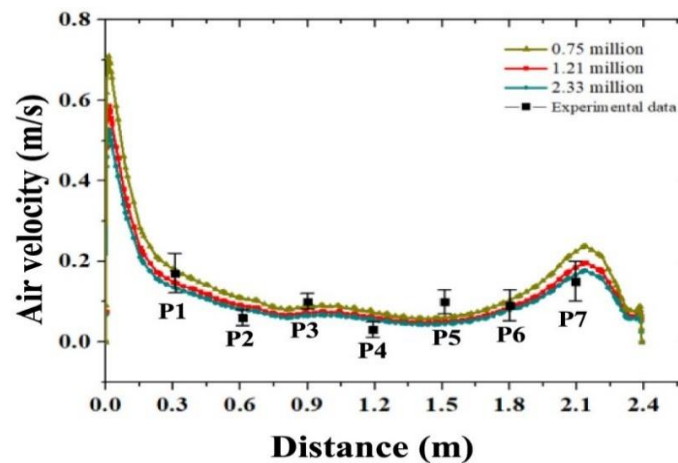
resultados que no corresponden con la realidad y además se afecta considerablemente la estabilidad numérica y la convergencia. La gráfica obtenida como resultado del proceso de validación se encuentra en la Figura 11.

Figura 9 Ubicación de la Línea 1 dentro del volumen de la cabina del ascensor (Li & Feng, 2023).



Nota: Adaptado de (Li & Feng, 2023), Figura 2a.

Figura 10 Gráfica de la velocidad del aire en función de la distancia a lo largo de la Línea 1 (Li & Feng, 2023).



Nota: Los autores realizan tanto la independencia de la malla como la validación del modelo, sin embargo, lo que es de especial interés para esta sección es el comportamiento de la misma a través de los puntos seleccionados. La gráfica compara los resultados de los campos de velocidad obtenidos con los valores experimentales de velocidad medidos cada 0.3 m desde el suelo hasta 2.1 m a lo largo de la Línea 1. Adaptado de (Li & Feng, 2023), Figura 3a.

La Figura 11 muestra que el comportamiento de los perfiles de velocidad reportados en el presente trabajo sigue una tendencia similar a la demostrada en la Figura 10. Esto indica que el modelo CFD desarrollado proporciona unos valores de velocidad de flujo de aire y tendencia razonables en comparación a lo reportado en el artículo.

Para los autores del artículo referenciado fue aceptable una diferencia de 0.06 m/s de los valores simulados con respecto a los valores medidos experimentalmente (Ver Figura 10). En el caso del modelo CFD implementado en el presente estudio, este se logra adaptar adecuadamente cumpliendo con porcentajes de error aceptables, los cuales son similares a los manejados por los autores del artículo citado (Ver Tabla 4). La Tabla 4 incluye los valores del porcentaje de error respecto a los datos experimentales reportados en el artículo, así como la diferencia absoluta de los valores experimentales medidos con respecto a los simulados por el modelo CFD desarrollado.

Se puede resaltar las magnitudes de la velocidad en los puntos analizados son pequeñas, por lo que las diferencias absolutas pueden representar altos errores, especialmente en las posiciones más bajas. A pesar de estos errores, se puede confirmar que las tendencias obtenidas son razonables en términos de magnitud y dirección de flujo.

Figura 11 Grafica de validación del modelo CFD utilizando el modelo de turbulencia Reynolds Stress.

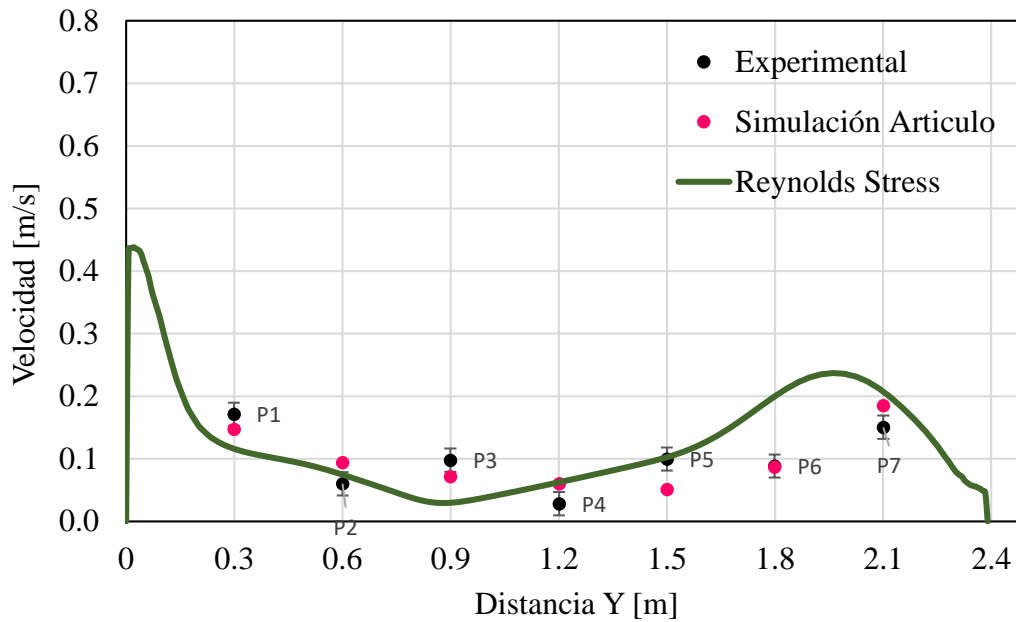


Tabla 4 Listado de los valores de porcentaje de error para cada modelo CFD evaluado durante la validación.

Puntos	Y[m]	Experimental	Reynolds Stress	Error Experimental	Diferencia
P1	0.3	0.1665	0.1160	30.3%	0.0504
P2	0.6	0.0567	0.0746	31.7%	0.0179
P3	0.9	0.0961	0.0298	69,0%	0.0662
P4	1.2	0.0981	0.0626	36.2%	0.0355
P5	1.5	0.0938	0.1026	9.3%	0.0087
P6	1.8	0.0868	0.1997	130,1%	0.1129
P7	2.1	0.1478	0.2071	40.2%	0.0593
Error promedio				49.5%	0.05

4.2 Prueba de independencia de malla

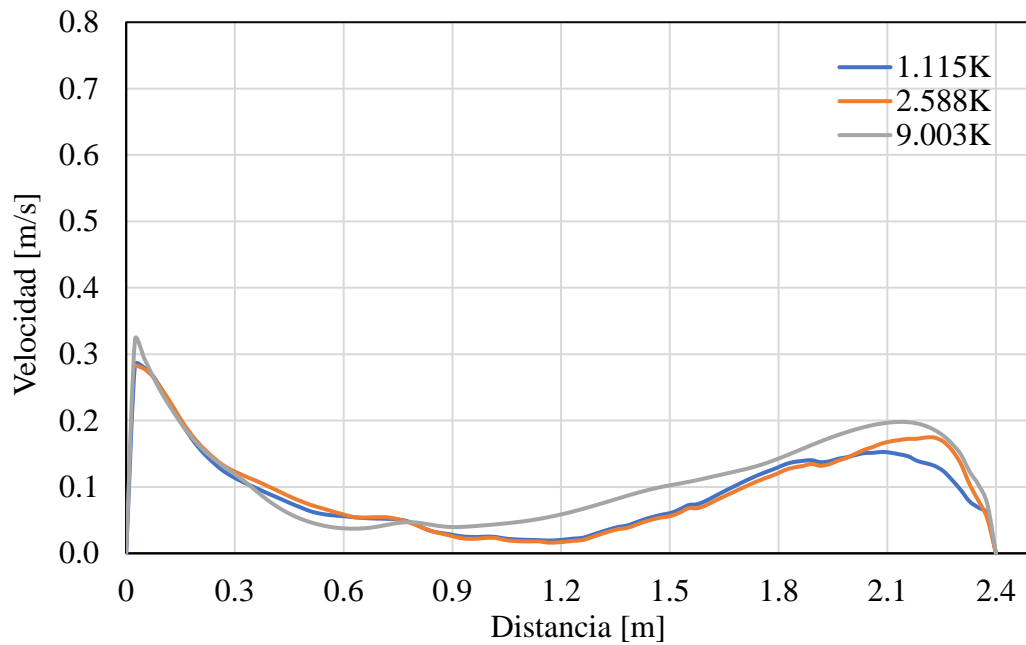
Una vez confirmado que el modelo CFD desarrollado permite representar razonablemente las tendencias de flujo de aire en un plano definido tal como se presentó en el apartado anterior, se procede a realizar una prueba de independencia de malla aplicada al Caso 1 de estudio del presente trabajo, pero incluyendo un único ocupante. De esta forma se disminuyen los elementos y el costo computacional para la etapa de independencia de la malla. Con una sola persona es posible definir todos los refinamientos necesarios en cada superficie sin aumentar el número de elementos (Ver Figura 5, Caso 1). Lo siguiente se lleva a cabo para garantizar que los resultados obtenidos fuesen independientes del tamaño del elemento utilizado, por lo tanto, se crearon tres diferentes configuraciones de mallado y se simularon los perfiles de velocidad y el campo de flujo. Todas las simulaciones se hicieron en un ordenador de escritorio con un procesador 12th Gen Intel (R) Core (TM) i5-12600 (16 CPUS) y se dispuso de 64 Gb de RAM. Las características de cada configuración, expresadas en milímetros, se presentan a continuación en la Tabla 5.

Tabla 5 Configuración de refinamiento del mallado.

Numero de celdas	1115395	2588933	9030479
Cabina	60	40	20
Entradas y Salidas	3.75	2.5	1.25
Cuerpo	7.5	5	2.5
Paredes	15	10	5

En la Figura 12 se presentan los comportamientos de los perfiles de velocidad a través de cada configuración de mallado en específico, medidas a través de la línea 1 ubicada a 0.2 m en dirección -X (Tomar como referencia Figura 9).

Figura 12 Prueba de independencia de la malla para las configuraciones de 1.115M, 2.588M y 9.003M de elementos.



En la Tabla 6 se presentan los porcentajes de diferencia cuando se comparan los resultados obtenidos a través de los 7 puntos seleccionados en el procedimiento de validación para cada configuración de mallado.

Tabla 6 Comparación de los perfiles de velocidad en las diferentes configuraciones de refinamiento del mallado.

Distancia	Elementos			Porcentaje de error			Diferencia absoluta		
	G	M	F	G-M	G-F	M-F	G-M	G-F	M-F
0.3	0.116	0.125	0.123	7%	5%	2%	0.00919	0.04934	0.00290
0.6	0.056	0.058	0.037	3%	49%	54%	0.00196	0.00331	0.02020
0.9	0.028	0.026	0.040	8%	29%	34%	0.00199	0.03611	0.01341
1.2	0.021	0.018	0.060	19%	65%	71%	0.00334	0.13065	0.04261
1.5	0.061	0.056	0.103	8%	41%	45%	0.00457	0.02154	0.04633
1.8	0.128	0.119	0.141	7%	9%	16%	0.00889	0.06699	0.02199
2.1	0.152	0.169	0.197	10%	23%	15%	0.01702	0.09624	0.02865
Promedio				9%	32%	34%	0.01	0.06	0.03

Nota: Cuando se habla de refinamiento fino (F), medio (M) y grueso (G) se refiere a la malla de 1.1 millones, 2.5 millones y 9 millones respectivamente.

El porcentaje de error promedio al comparar los resultados obtenidos por los mallados de 1.11M y 2.58M de elementos fue inferior al 10% y por lo tanto la diferencia entre estos resultados no es significativa, luego, entonces, se determinó que no se justifica realizar las simulaciones con el mallado de 2.58M de elementos. Por la razón anterior se escoge el mallado de 1.11M de elementos para el estudio.

4.3 Análisis y evaluación de los casos de estudio

Para todos los casos en estudio se utilizó como criterio de convergencia que los valores residuales alcanzaran un valor de $1 \cdot 10^{-4}$ en las ecuaciones de transporte y en la continuidad, así como $1 \cdot 10^{-6}$ para el caso de la ecuación de energía, además se monitorearon

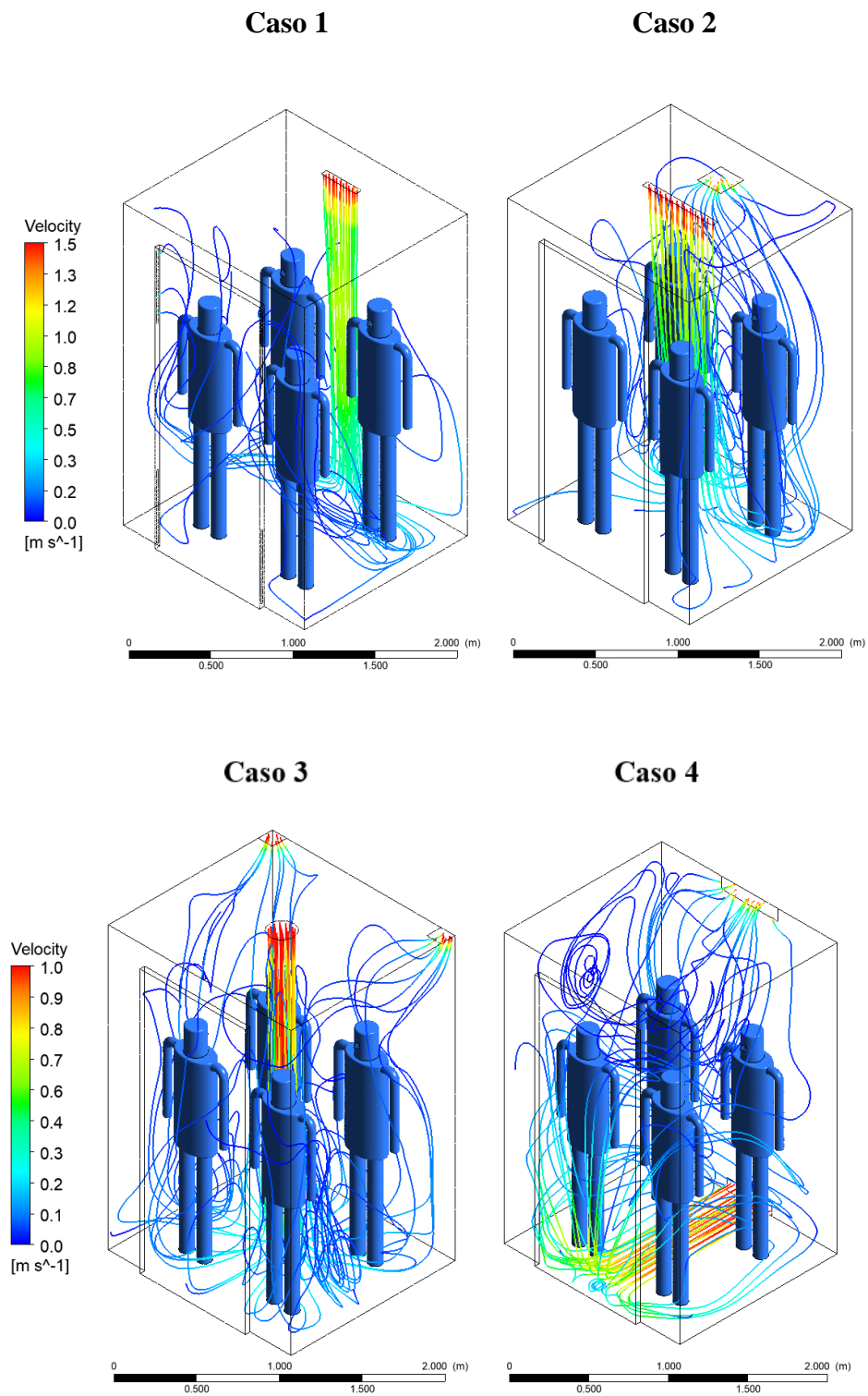
los valores de velocidad, temperatura, turbulencia y humedad relativa hasta que alcanzaran la convergencia. Para todos los casos de estudio el costo computacional fue similar, se utilizaron alrededor de 930 MBytes de memoria RAM y cada iteración tomo alrededor de 5 segundos alcanzando valores convergentes entre las 3000 y 8000 iteraciones, por lo tanto, el tiempo requerido para obtener resultados varió entre 4 y 6 horas.

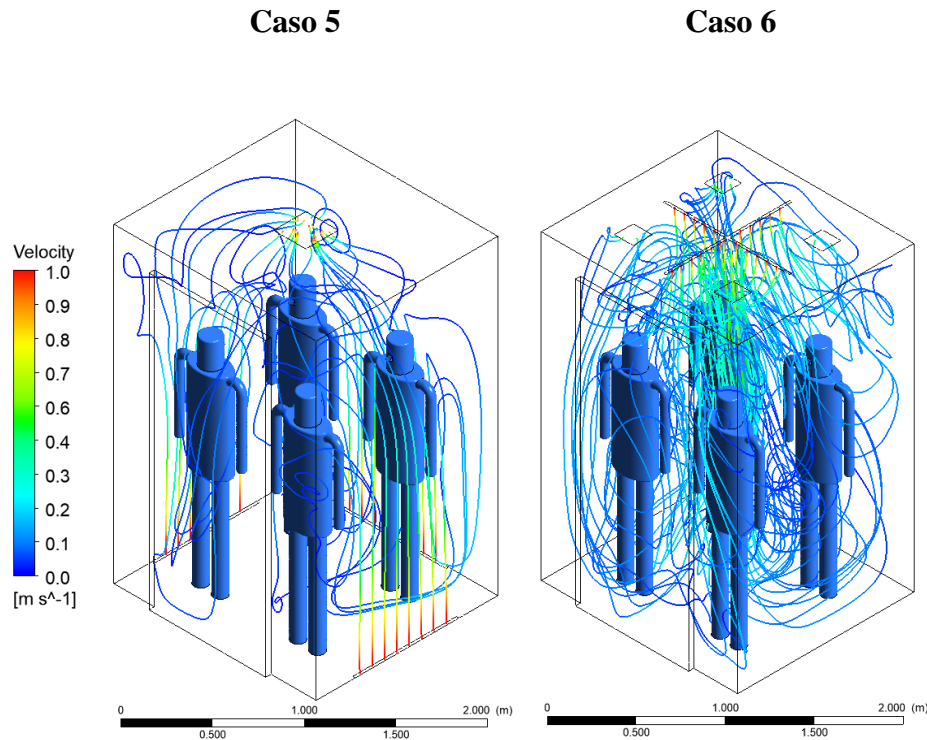
Para los resultados se tuvo en cuenta el monitoreo de tres variables en el sistema. Se presentan los resultados de algunas de las trayectorias de flujo desde las entradas de aire hasta las salidas. También se registró la temperatura visualizada desde un plano medio YZ, además de la edad media del aire, la cual se evaluó en una zona de aire respirable, en un plano horizontal ubicado a 1.5 m de altura y en un plano vertical que cruza la mitad de la cabina misma en dirección al plano YZ.

4.4 Evaluación de las líneas de corriente de velocidad

La Figura 13 ilustra las trayectorias de las partículas dentro del dominio definido en los 6 casos de estudio. En el caso 1 se observó que, la posición de las salidas de aire no favoreció una circulación adecuada en todo el volumen del recinto. Se puede observar que el hecho de que el aire salga por los sitios cercanos a las puertas limita la circulación de aire que se encuentra por encima de este sector, lo cual puede afectar la velocidad de renovación de este aire. A diferencia del caso base (ver Figura 5, Caso 1), en el Caso 2 se consideró una entrada de aire más amplia en la mitad del área superior y una rejilla de extracción de aire ubicada a un lado de la entrada. En este caso se logró que el aire introducido siguiera una mayor trayectoria de flujo, de tal forma que se aumentara la renovación de aire en el recinto, reduciendo así, la permanecía del aire en el mismo.

Figura 13 Resultados de las líneas de corriente de velocidad





En el Caso 3, la configuración de la salida permitió una mejora en la distribución del aire en todas las direcciones, respecto a los casos anteriores. Ya que la circulación de aire hacia la zona inferior, y posteriormente hacia la superior permite que la salida de aire posicionada en la parte superior del dominio, permitan una efectiva recirculación del aire. Con esto se logró una mejora en este aspecto, desde que entra hasta que sale del recinto, lo anterior dicho respecto al Caso 1 y 2.

En el Caso 4 se produjo una situación similar a la anterior, sin embargo, el hecho de que el aire se introduzca en el recinto a un costado en la zona inferior permite que el aire choque con la pared y genera que el flujo de aire suba y abarque todo el dominio del recinto para finalmente salir de este por el mismo costado, pero por la zona superior. Lo anterior se tradujo en una reducción de la permanencia del aire en el recinto.

En el Caso 5 se evidencia que el aire que sale de las rejillas ubicadas a los costados de la zona inferior del recinto se dirigió directamente hacia la salida, la cual está ubicada en

el centro de la zona superior de este. Esto plantea dudas sobre la eficiencia de distribución de aire debido a la ubicación de la extracción de aire, y de la capacidad de la configuración para reducir la permanencia del aire en el recinto, ya que el aire a los costados de la zona superior no fue influenciado significativamente por el flujo de aire de entrada.

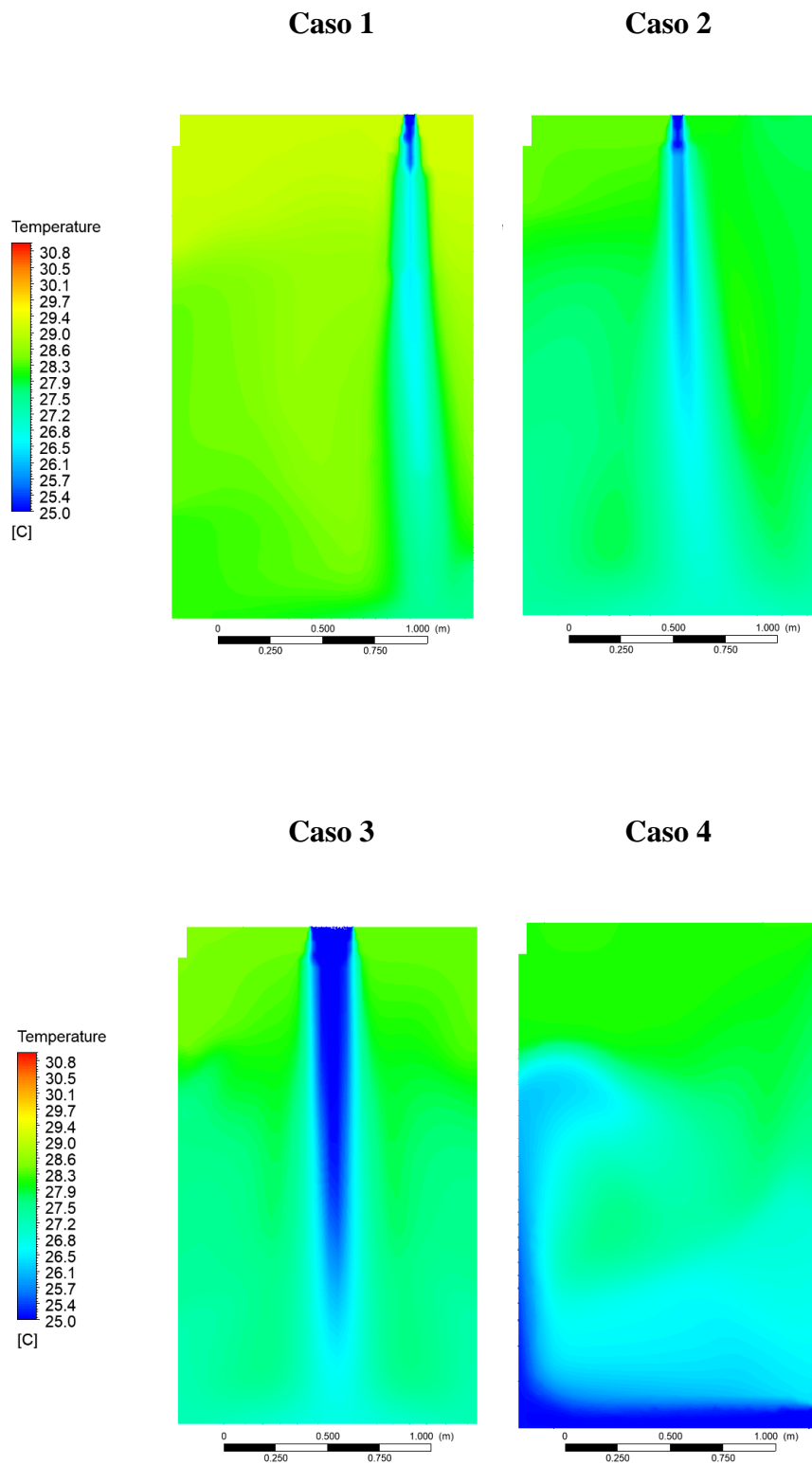
En el último caso, la forma de la salida de aire permite una distribución en toda la cabina. Sin embargo, la trayectoria registrada indica que las partículas de aire fluyeron inicialmente hacia abajo para luego subir por los costados hacia arriba para salir del dominio en las secciones definidas para la extracción. Lo anterior podría retardar la permanencia del aire en el recinto. En general, las velocidades del aire en el volumen ocupado estuvieron por debajo de 0.25 m/s. Las velocidades estuvieron cerca de 1.5 m/s justo en las secciones de entrada de aire al recinto para los Casos 1 y 2, y cerca de 1 m/s para los demás casos. Luego estas velocidades se redujeron significativamente. Solo en el Caso 3 las velocidades del flujo de entrada se mantuvieron altas hasta casi llegar a la zona inferior.

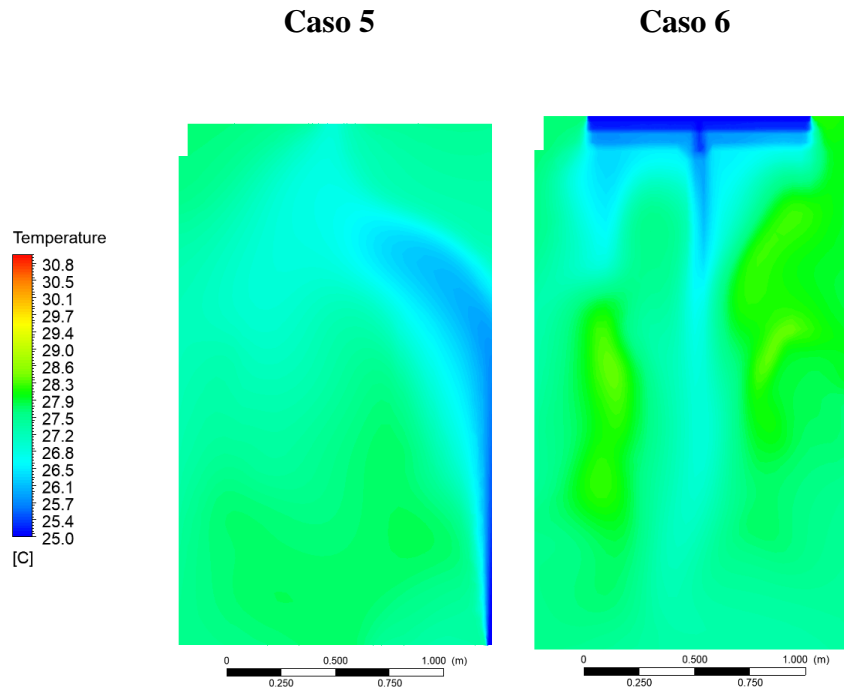
4.5 Evaluación de la temperatura

En cuanto a los resultados de los perfiles de temperatura, estos se muestran en la Figura 14. Se registraron valores de temperatura entre 25°C y los 30.8 °C. En Caso 1 el aire a las temperaturas más bajas entra a la cabina y se ve cómo afecta las inmediaciones de las zonas más inferiores alcanzando 29 °C aproximadamente. Esto ocurre porque al aire no logra evacuar correctamente y las trayectorias de mayor velocidad no afectan las zonas de aire respirable antes de salir. Por otro lado, en el Caso 2 la simetría de la entrada de aire favorece la reducción de la temperatura en la cabina, para esta configuración la temperatura de disminuye a 27 °C en casi todo el volumen exceptuando en las zonas donde al aire aún no ha interactuado con los sujetos, donde se mantiene aún a la temperatura ambiente de 25 °C.

Para el Caso 3 la forma de la entrada de aire y el ACH en esta configuración favoreció aún más el descenso de la temperatura y homogenizó los valores de esta en toda la cabina. Para este caso se alcanzan valores de 26.5 °C en las zonas más cercanas al suelo ya que es allí donde el flujo de aire interactúa por primera vez con una pared y comienza a esparcirse alrededor del resto del ascensor. El valor más alto registrado aquí se encuentra en los 27 °C.

En el Caso 4 al tener la entrada de aire cerca al suelo y el hecho de no interactuar con el calor irradiado con las personas de manera significativa produjo una capa de aire a 25°C en el inferior de la cabina. Luego al chocar con la pared de enfrente el aire se dirige al resto de la cabina, ascendiendo aun a 25 °C cerca de las puertas. Luego desciende su temperatura en las inmediaciones donde se encuentran los sujetos. Este fenómeno provocó temperaturas más altas cerca a la extracción de aire con 28 °C y más bajas conforme se desciende en altura, pasando por los 26.5 °C hasta llegar nuevamente a la temperatura de operación del aire en la entrada. Para el Caso 5 las entradas de aire en el inferior de las paredes de la cabina provocaron que el aire que entraba subiera y se calentara rápidamente. Lo anterior condujo a que el aire subiera cerca a la pared y que el flujo que interactuaban con los sujetos en zonas más cercanas al centro de la cabina se calentase hasta alcanzar los 27.5 °C en la mayor parte del volumen y tomando valores de 26.5 °C en las zonas cercanas a la salida de aire. La distribución de temperatura es medianamente homogénea. Finalmente, para el Caso 6 la temperatura solo se mantiene en 25 °C en las zonas extremadamente cercanas a las entradas de aire. A medida que el aire desciende por la cabina se calienta rápidamente tomando valores de 28 °C en gran parte de la cabina del ascensor, mientras que la temperatura más baja registrada corresponde a 26 °C. Sin embargo, esta se ubica únicamente en las principales trayectorias provenientes de la entrada de aire.

Figura 14 Resultados de la temperatura en el plano YZ



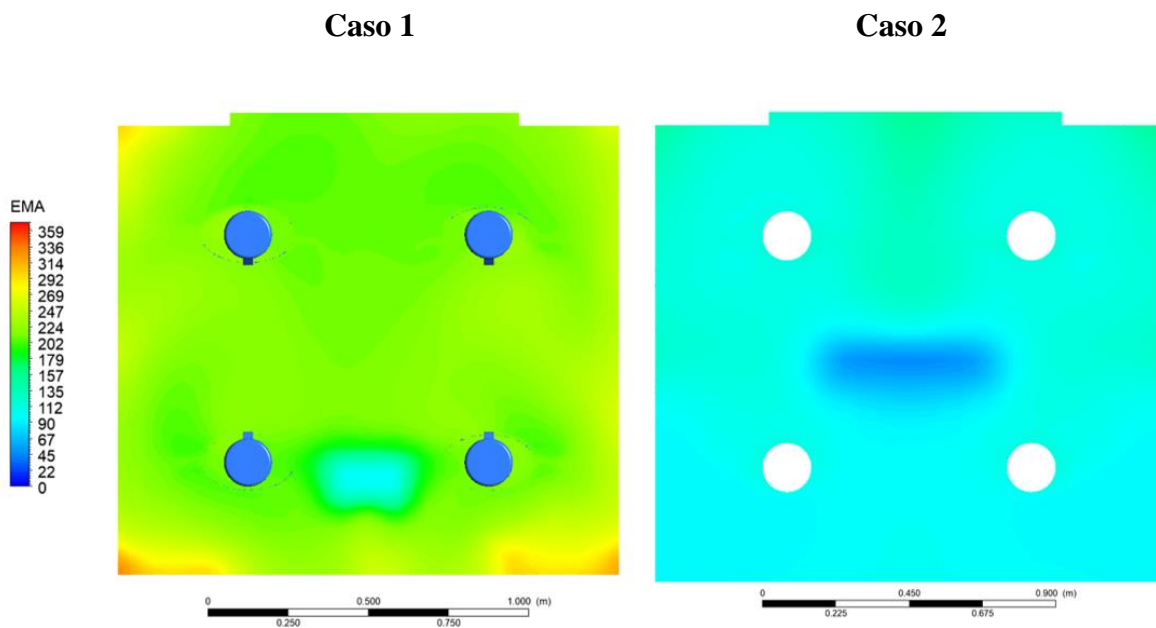
4.6 Evaluación de la edad media del aire

La Figura 15 presenta los resultados de simulación de la edad media del aire. Con relación al Caso 1, se puede apreciar cómo la presencia de aire nuevo se refleja directamente en el flujo de aire renovado que ingresa a la cabina. Sin embargo, la acumulación de aire viejo en la zona respirable indica una falta de circulación en el sistema, lo que lo convierte en un mecanismo ineficiente para la renovación del aire. Al comparar con los otros casos, el Caso 2 muestra una mejora al aumentar el área de flujo de entrada y ubicar las salidas de aire en la parte superior. Esto permite que el aire viejo ascienda y sea expulsado, reduciendo considerablemente la edad del aire. En el Caso 3 se observó que la edad del aire disminuye en las áreas donde se encuentran las personas, por el contrario, en las esquinas, el flujo de aire se estanca. Esta configuración podría ser adecuada para un ascensor con capacidad limitada. Por otro lado, el Caso 4 presenta una notable mejora en la edad del aire, ya que, en

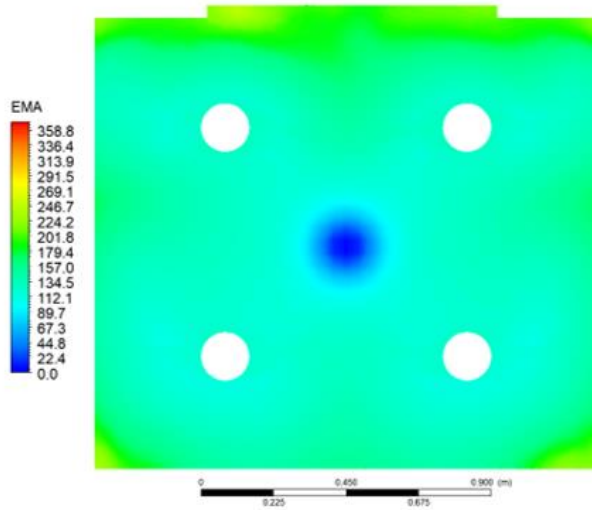
términos prácticos, renueva completamente el aire en la zona respirable, obteniendo niveles bajos en todo el espacio. Este resultado también se aprecia en el Caso 5, lo que sugirió que ubicar la impulsión del aire en la parte inferior del ascensor permite una circulación deseable del aire en todo el dominio. Finalmente, en el último caso, se puede observar que la forma de la salida de aire mejora la distribución del aire, obteniendo resultados satisfactorios, aunque estos se limitan a una sección específica del elevador en comparación con los dos casos anteriores.

Los resultados de la edad de aire en el plano vertical se muestran en la Figura 16. Se pudo observar el comportamiento de la edad del aire a medida que se introduce aire fresco en el sistema. En el Caso 1 se evidencia que el aire entrante carece de la capacidad necesaria para revitalizar el ambiente, y solo se aprecia aire fresco en la salida del sistema. En contraste, el Caso 2 muestra una mejora notable, dado que la mayor capacidad de inducción de aire permite una circulación más efectiva y resultados superiores.

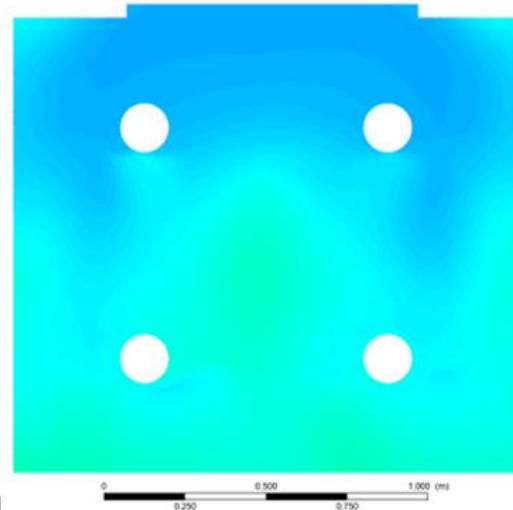
Figura 15 Resultados de la edad media del aire en el plano horizontal a 1.5 m de alto



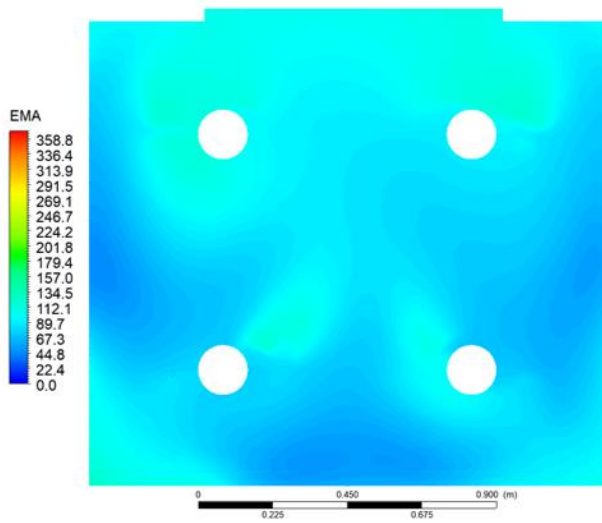
Caso 3



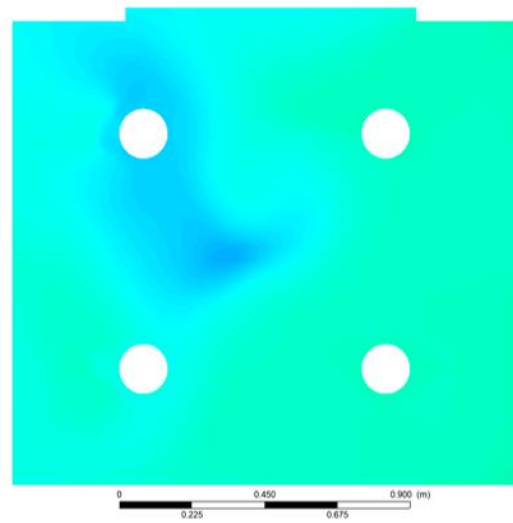
Caso 4



Caso 5



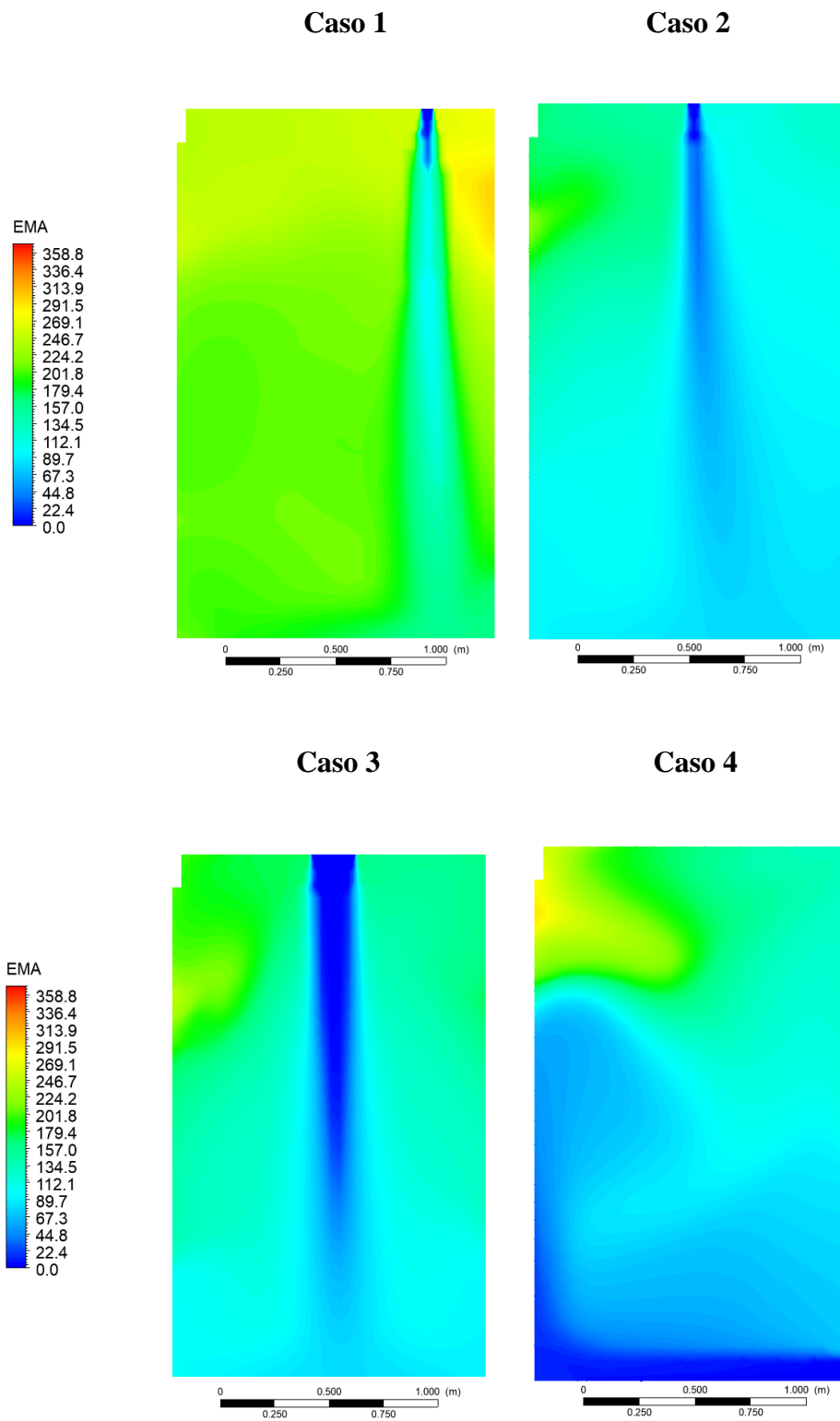
Caso 6



El Caso 3 exhibe cómo la introducción directa de aire logró mantener una baja edad del aire, aunque es importante destacar que esta se concentró en el centro, lo que da lugar a que los niveles intermedios de edad se acumulen en las áreas periféricas de la entrada de aire. Los Casos 4 y 5 fueron notables por mantener una baja edad del aire en las zonas donde es necesario, aprovechando el efecto Coandă. En el Caso 4, a pesar de una alta concentración de aire en la parte superior opuesta a la salida, no representa inconvenientes dado que se encuentra fuera del alcance de la zona respirable. En el Caso 5, se observó una distribución significativa del aire a lo largo del plano, lo que evita la presencia de áreas con edades elevadas.

Finalmente, en el Caso 6, al igual que en el caso anterior, la geometría de la salida de aire permite una distribución eficiente, manteniendo edades del aire jóvenes en todo el dominio, lo que es esencial para mantener un entorno saludable y respirable. A continuación, en la tabla 7 se presentan los valores de edad del aire promedio además del cálculo de la efectividad para cada caso.

Como se evidencia en las imágenes previas de los planos de corte, los resultados se resumen de manera concisa en la Tabla 7. En esta tabla se presentan los resultados del Análisis de Edad del Aire (EMA) y el Coeficiente de Efectividad de la Ventilación (ACE). En el primer caso, se constató que la edad del aire es notablemente elevada, lo cual era una expectativa prevista. El segundo caso, aunque se logró reducir a la mitad la edad del aire con respecto al caso anterior, no experimentaron un aumento significativo en la efectividad. Por tanto, se deduce que el modelo de ventilación empleado en este contexto no demostró ser eficaz.

Figura 16 Resultados de la edad media del aire en el plano vertical YZ

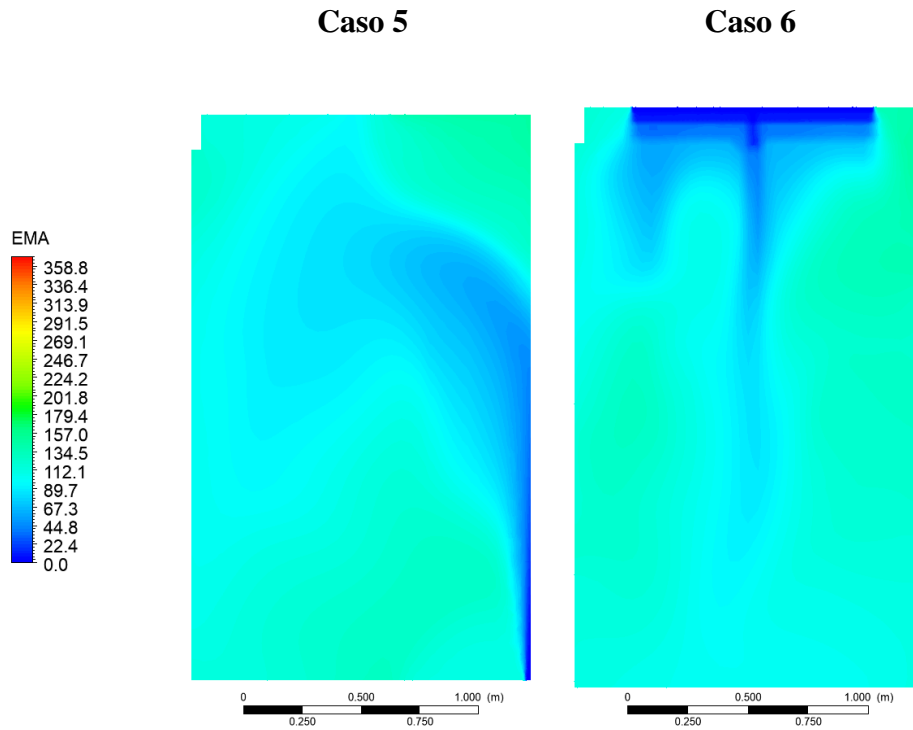


Tabla 7 Resultados de la edad del aire promedio y efectividad de cambio de aire para cada caso.

Caso	EMA [s]	EMA Outlet [s]	ACE
1	215.165	216.73	1.007
2	106.340	112.491	1.058
3	122.840	160.855	1.309
4	84.445	124.777	1.478
5	86.204	106.341	1.234
6	107.88	128.068	1.196

En el tercer caso, se obtuvieron valores de edad del aire similares a los del caso anterior. Sin embargo, se registró un aumento considerable en la efectividad,

aproximadamente del 30% con respecto al caso anterior. Esto se atribuye a la introducción forzada de una cantidad concentrada de aire exclusivamente en el centro del dominio. No obstante, se debe tener en cuenta que, a pesar de este aumento en la efectividad, este sigue siendo el segundo modelo más eficaz entre los evaluados.

El cuarto caso estudiado resulta ser el más favorable en términos de ventilación. La edad del aire se redujo de forma drástica a tan solo 84 segundos, lo que representa una mejora sustancial en los resultados. Además, este modelo se reveló altamente efectivo, con un aumento aproximado del 45% en la efectividad. Esta mejora se atribuye a la ubicación estratégica de las entradas y salidas de aire, que permiten una circulación interna del aire de gran eficacia.

El quinto caso produjo valores de edad del aire similares al caso anterior, pero exhibe una efectividad menor. Este hallazgo era esperado, ya que los resultados de las líneas de corriente sugirieron que el aire que entra al dominio tiende a salir de manera que no circula adecuadamente por el mismo. En consecuencia, a pesar de la baja edad del aire en la zona respirable, el ACE no alcanzó un valor elevado.

En el último caso, los resultados obtenidos no cumplen con las expectativas. La edad del aire aumentó y la efectividad disminuyó. Esto se debe a que la geometría del sistema no favoreció la distribución adecuada del aire, que se dispersa por el dominio, pero no logra recircular de manera eficiente.

4.7 Comparación con resultados de la literatura

En el estudio reportado por Santamaría Bertolín et al (2023) se obtuvieron resultados de EMA y ACE. En este se varió la posición y sentido de flujo de un purificador de aire dentro de la cabina. Los autores reportaron resultados para 6 diferentes configuraciones de ventilación haciendo uso de un ACH de 7.04. El volumen de la cabina fue de 3.38 m³ y se obtuvieron

valores de EMA entre los 341 y 379 segundos, por otro lado, el ACE estuvo entre 1.34 y 1.52. Estos valores indican que los resultados obtenidos para los casos del presente estudio son coherentes y validan la metodología y las condiciones definidas para llevar a cabo el presente estudio. Las diferencias obtenidas entre el presente estudio y el reportado en la literatura pueden ser debido a la geometría y la naturaleza de la configuración de ventilación. Sin embargo, en ambos casos se lograron mejorar las condiciones de salubridad dentro del volumen estudiado. Se esperaría que el uso de un purificador en nuestro sistema podría mejorar aún más los resultados obtenidos.

5 Conclusiones y recomendaciones

A continuación, se presentan las conclusiones del presente estudio:

Se desarrolló satisfactoriamente un modelo CFD que simule las condiciones del caso de estudio permitiendo estimar el comportamiento de las trayectorias de aire dentro del dominio.

Se concluyó que el modelo Reynolds Stress provee una estimación válida para simular las condiciones de flujo turbulento dentro de un ascensor, teniendo en cuenta la presencia de especies en el aire y la convección natural. El modelo arroja resultados coherentes y cercanos a los registrados en pruebas experimentales.

Todas las configuraciones de ventilación planteadas durante los casos de estudio mejoraron las condiciones salubres del aire dentro del ascensor. La configuración, que proporciona mejores condiciones salubres del aire es la del Caso 4, con un ACH de 27.05, la cual tiene una edad media del aire de 84.45 segundos en el plano respirable y proporciona una efectividad de reemplazo de aire de 1.478. Sin embargo, el Caso 3 es destacable ya que tiene un ACH de 21.21, el cual es considerablemente más bajo y una EMA de 122.84 segundos logrando una efectividad de 1.309.

El Caso 5, el cual tiene ACH de 32.46, el más grande entre los casos estudiados, proporciona un EMA de 86.204, la cual se acerca mucho a la EMA más baja obtenida durante los casos estudiados, sin embargo, con la configuración de ventilación que se plantea no se obtuvo un aumento significativo en la efectividad de cambio del aire, por lo tanto, esta configuración es buena para reducir la EMA, pero no es efectiva para reemplazar el aire del

volumen total de la cabina. Esto ocurre porque el aire nuevo que entra se dirige inmediatamente hacia la salida de aire pasando a través del plano respirable.

Se concluye que no se encontró una correlación entre la edad del aire promedio con el ACH, por lo tanto, se determina que la configuración de ventilación es especialmente influyente cuando se habla de favorecer la circulación del aire en evacuación y mejorar las condiciones salubres del aire en un recinto cerrado como un ascensor en términos de la ventilación y el reemplazo del aire.

Referencias bibliográficas

- American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers. (2013). *ASHRAE handbook : fundamentals*.
- Anderson, J. D. (1995). *Computational Fluid Dynamics: The Basics With Applications*.
- Ansys. (2009). *ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide Cap 12. Modeling Turbulence*.
https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main_pre.htm
- ASHRAE. (2022). *ANSI/ASHRAE Standard 62.1, Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality*. <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standards-62-1-62-2>
- Bangash, M., & Bangash, T. (2005). *LIFTS, ELEVATORS, ESCALATORS AND MOVING WALKWAYS/TRAVELATORS*.
- Biswas, R., Pal, A., Pal, R., Sarkar, S., & Mukhopadhyay, A. (2022). Risk assessment of COVID infection by respiratory droplets from cough for various ventilation scenarios inside an elevator: An OpenFOAM-based computational fluid dynamics analysis. *Physics of Fluids*, 34(1). <https://doi.org/10.1063/5.0073694>
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2012). *Mecánica de Fluidos*.
- Chillón, S. A., Fernandez-Gamiz, U., Zulueta, E., Ugarte-Anero, A., & Urbina-Garcia, O. (2023). Numerical modeling of a sneeze, a cough and a continuum speech inside a hospital lift. *Heliyon*, 9(2). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13370>
- Claude Alain Roulet. (2008). *Ventilation and Airflow in Buildings: Methods for Diagnosis and Evaluation (Primera)*. Earthscan .

- Dbouk, T., & Drikakis, D. (2021). On airborne virus transmission in elevators and confined spaces. *Physics of Fluids*, 33(1). <https://doi.org/10.1063/5.0038180>
- Du, C., & Chen, Q. (2022). Virus transport and infection evaluation in a passenger elevator with a COVID-19 patient. *Indoor Air*, 32(10). <https://doi.org/10.1111/ina.13125>
- Instituto de Hidrología, M. Y. E. A. (2005). Atlas Climatológico de Colombia. Bogota, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
- Instituto Nacional de Salud. (2023). COVID-19 en Colombia.
- Kee, T. Y. E., Hing, C. K., Liong, B. W. T., Shin, V. B. N., Djun, L. M., & Boniface, C. J. A. (2020). Alternative design of air ventilation in passenger lift for thermal comfort. *CFD Letters*, 12(1), 37–47.
- Li, X., & Feng, B. (2023). Transmission of droplet aerosols in an elevator cabin: Effect of the ventilation mode. *Building and Environment*, 110261. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110261>
- Liu, S., Zhao, X., Nichols, S. R., Bonilha, M. W., Derwinski, T., Auxier, J. T., & Chen, Q. (2022). Evaluation of airborne particle exposure for riding elevators. *Building and Environment*, 207. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108543>
- Nouri, Z., Norouzi, N., Norouzi, N., Ataei, E., & Azizi, S. (2021). Virologic microparticle fluid mechanics simulation: COVID-19 transmission inside an elevator space. *International Journal of Computational Materials Science and Engineering*, 10(2). <https://doi.org/10.1142/S204768412150007X>

Organización de las Naciones Unidas. (2020, October 29). *Noticias ONU*. Unos 850.000 Virus Desconocidos Podrían Causar Pandemias Si No Dejamos de Explotar La Naturaleza.

Organización Mundial de la Salud. (2017). *Organización Mundial de la Salud*. Cada Año, Hasta 650.000 Personas Mueren Por Enfermedades Respiratorias Relacionadas Con La Gripe Estacional.

Patankar, S. V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*.

Peng, N. N., Chow, K. W., & Liu, C. H. (2021). Computational study on the transmission of the SARS-CoV-2 virus through aerosol in an elevator cabin: Effect of the ventilation system. *Physics of Fluids*, 33(10). <https://doi.org/10.1063/5.0068244>

Santamaría Bertolín, L., Fernández Oro, J. M., Argüelles Díaz, K., Galdo Vega, M., Velarde-Suárez, S., Del Valle, M. E., & Fernández, L. J. (2023). Optimal position of air purifiers in elevator cabins for the improvement of their ventilation effectiveness. *Journal of Building Engineering*, 63, 105466. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.105466>

Sen, N. (2021). Transmission and evaporation of cough droplets in an elevator: Numerical simulations of some possible scenarios. *Physics of Fluids*, 33(3). <https://doi.org/10.1063/5.0039559>