



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA



Modelación de la Transmisión de COVID-19 por Gotas de Agua en Aire en una Sala de Clases

Fundamentos de la Dinámica de Fluidos Computacional

MEC-223 - 2021

Martín Achondo Mercado

Rol: 201860005-9

Matías Riquelme Vera

Rol: 201804005-3

Profesor: Christopher Cooper

28 de Diciembre de 2021

1. Resumen

En el presente informe, se modeló la dispersión de gotas con COVID-19 en una sala de clases producto del estornudo de un alumno utilizando el software de FLUENT. De esta manera, se pudo evaluar las posiciones críticas para estornudar, considerando el tiempo medio de residencia de las gotas en el aire y sus porcentajes de retención y escape que tuvieron por las salidas. Con esto, se obtuvo que estar en la parte central y final de la sala puede provocar un mayor contagio dado que existen muchos alumnos en frente y lejanía a las salidas de aire. Por otra parte, las mejores posiciones obtenidas fueron las de las primeras filas. Además, se evaluó la renovación del aire producto a los ventiladores en el techo, obteniendo tiempos de renovación de 260 segundos aproximadamente. Con todo el análisis, se pudo evaluar mejoras al sistema de ventilación incluyendo ventiladores laterales y con expulsión de aire en todas las direcciones.

Índice

1. Resumen	1
2. Introducción	3
3. Objetivos	3
3.1. Objetivos Generales	3
3.2. Objetivos Específicos	3
4. Marco Teórico	4
4.1. Ecuaciones de Conservación	4
4.2. Turbulencia	4
4.3. Fase Discreta	5
4.4. Acoplamiento de Presión	6
5. Modelo	7
5.1. General	7
5.2. Discretización	9
5.3. Implementación	10
6. Análisis y Resultados	11
6.1. Propagación por Estudiante	11
6.2. Flujos en Estornudo	16
6.3. Renovación de Aire	18
6.4. Convergencia	21
6.5. Posibles Mejoras	22
7. Conclusión	23
8. Referencias	24

2. Introducción

El mundo se ha visto marcado por la aparición de un virus que se transmite a través de gotas, el llamado COVID-19, el cual ha generado que la población tome ciertas medidas de prevención entre las cuales destaca el disminuir los aforos en ciertos espacios de uso compartido y la distancia de separación entre cada persona. Todos esfuerzos necesarios para contrarrestar el impacto que pueda tener en la salud de cada individuo. Por lo mismo, en el siguiente informe se busca modelar la dispersión de partículas de aerosol con SARS-CoV-2 en una sala de clases. Lo anterior forma parte de la búsqueda de la aplicación de estudios numéricos que puedan representar la situación de transmisión de gotas con COVID-19. Con esto, se podrá estimar la posición más crítica para un estudiante contagiado frente a un posible estornudo y los efectos que se puedan generar. Para la sala de clases, se usará el modelo de las salas de la USM. De esta manera, se podrá evaluar su renovación de aire y así, proponer mejoras para minimizar el tiempo de residencia de gotas infectadas. Para esta simulación se usará el software comercial de FLUENT.

3. Objetivos

3.1. Objetivos Generales

Simular el flujo de aire con gotas con COVID-19 proveniente del estornudo de un estudiante en una sala de clases.

3.2. Objetivos Específicos

- Diseñar la geometría de la sala de clases con una cantidad de entradas de aire definidas previamente.
- Generar la discretización de la sala mediante FLUENT y seleccionar modelos de turbulencia y acoplamiento de presión apropiados.
- Modelar el estornudo como una entrada de aire más partículas de agua en la zona donde estaría la boca de uno de los estudiantes, con sus respectivas condiciones de contorno.
- Analizar los resultados por cada estudiante y profesor, y posterior evaluación de la o las personas más críticas al estornudar.
- Proponer mejoras al sistema de ventilación de la sala con el fin de contrarrestar los efectos de la propagación de COVID-19.

4. Marco Teórico

4.1. Ecuaciones de Conservación

Para el desarrollo del modelo, se utilizó la conservación de masa, la conservación de cantidad de movimiento y la conservación de energía para el medio continuo. Estas ecuaciones son las siguientes: [1].

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} &= 0 \\ \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \\ \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial p}{\partial t} + u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (1)$$

En este proyecto se trabajará con versiones simplificadas de estas ecuaciones bajo las siguientes suposiciones:

- El fluido será aire y se considerará un gas ideal incompresible.
- El flujo se considerará estacionario.
- Se considerará un fluido Newtoniano.

El fluido al ser Newtoniano, se le podrán desarrollar los esfuerzos de corte de la siguiente manera:

$$\tau_{ij} = -\frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

Como se dijo anteriormente, el aire se considerará un gas ideal incompresible. Esto quiere decir que su densidad solo dependerá de una presión de referencia y su temperatura actual. La ecuación de estado queda de la siguiente forma:

$$\frac{p_0}{\rho} = RT \quad (3)$$

4.2. Turbulencia

Las ecuaciones mencionadas anteriormente pueden ser desarrolladas mediante técnicas de simulación directa, pero es inviable dada la malla fina que habría que crear. Es por esto que se usará para la conservación de momento la ecuación promediada de Reynolds (RANS).

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \quad (4)$$

Todas las ecuaciones de conservación se resolverán en términos promedios. Dado que aparecen en esta ecuación los términos fluctuantes de la velocidad en el tensor de esfuerzos de Reynolds:

$$\overline{u'_i u'_j} = -2\nu_t \bar{S}_{ij} + \frac{2}{3} \delta_{ij} k' \quad (5)$$

Se añadirán dos ecuaciones para cerrar el sistema [2]. Una para la energía cinética turbulenta (k') y otra para la disipación viscosa (ε). De esta manera se podrá modelar la viscosidad aumentada dada por la turbulencia (ν_t).

$$\begin{aligned} \frac{\partial k'}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k'}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k'}{\partial x_j} \right) + \nu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \varepsilon \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \nu_t \frac{\varepsilon}{k'} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k'} \\ \nu_t &= C_\mu \frac{k'^2}{\varepsilon} \end{aligned} \quad (6)$$

De esta forma se resolverán en conjunto la conservación de masa, cantidad de movimiento y energía promediadas más la ecuación de energía cinética turbulenta y la disipación viscosa. Así, se cierra el sistema de ecuaciones. Las constantes σ_k , σ_ε , C_1 , C_2 y C_μ , se fijarán en la simulación.

4.3. Fase Discreta

Las gotas de agua dentro del aire se modelarán como una fase discreta que pueda interactuar con el medio (aire). Para su modelación se utilizarán ecuaciones diferenciales con una vista Lagrangiana. La ecuación para la velocidad de las gotas es la siguiente [5], en donde p hace referencia a las gotas (partículas) y f al aire (fluido):

$$\frac{d\mathbf{V}_p}{dt} = F_D(\mathbf{V}_f - \mathbf{V}_p) + \left(\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_p} \right) \mathbf{g} \quad (7)$$

En donde:

$$F_D = \left(\frac{18\mu_f}{\rho_p d_p^2} \right) \left(\frac{C_D \text{Re}}{24} \right) \quad (8)$$

Estas gotas variarán sus trayectorias dado su arrastre en el fluido y efecto gravitatorios además del empuje. Dado que se incluyó la ecuación de energía para el aire, las gotas de agua variarán su temperatura considerándolas un sistema concentrado:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_f - T_p) \quad (9)$$

Estas gotas se considerarán inertes, sin posibilidad de evaporación.

4.4. Acoplamiento de Presión

Las ecuaciones antes planteadas se resolverán utilizando el Método de Volúmenes Finitos. Dado que se está asumiendo gas ideal incompresible, la presión está desacoplada de las demás variables al momento de discretizar y resolver las ecuaciones de conservación. Debido al carácter estacionario de la situación, se empleará el método iterativo SIMPLEC para acoplar la presión a las demás variables. Las ecuaciones a resolver en cada paso iterativo son las siguientes [5]:

$$\tilde{u}_{i,P} = -u'_{i,P} \frac{\sum_l a_{l,P}(\mathbf{u}^m) u'_{i,l}}{a_P(\mathbf{u}^m)} \quad (10)$$

$$u'_{i,P} = -\frac{1}{a_P(\mathbf{u}^m) + \sum_l a_{l,P}(\mathbf{u}^m)} \left(\frac{\delta p'}{\delta x_i} \right)_P \quad (11)$$

$$\frac{\delta}{\delta x_i} \left[\frac{1}{a_P(\mathbf{u}^m) + \sum_l a_{l,P}(\mathbf{u}^m)} \left(\frac{\delta p'}{\delta x_i} \right) \right]_P = \left(\frac{\delta u_i^*}{\delta x_i} \right) \quad (12)$$

5. Modelo

5.1. General

Dimensiones

Para la modelación de la transmisión de COVID-19 se usará un modelo de las salas de la USM. En ella se asumirá que existen 14 alumnos más el profesor.

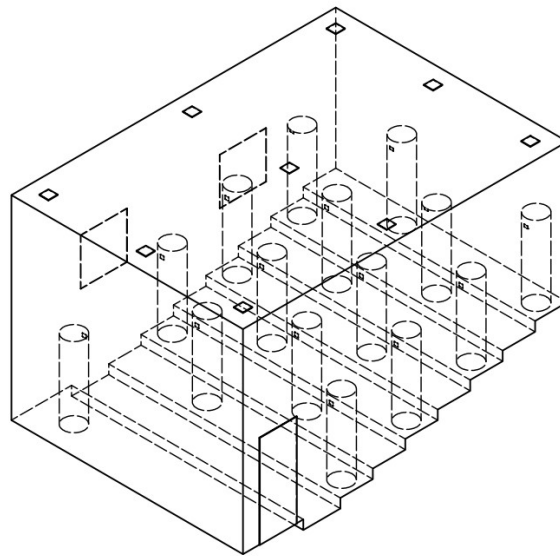


Figura 1: Representación sala de clases y alumnos

Las cotas generales se pueden ver en el siguiente plano:

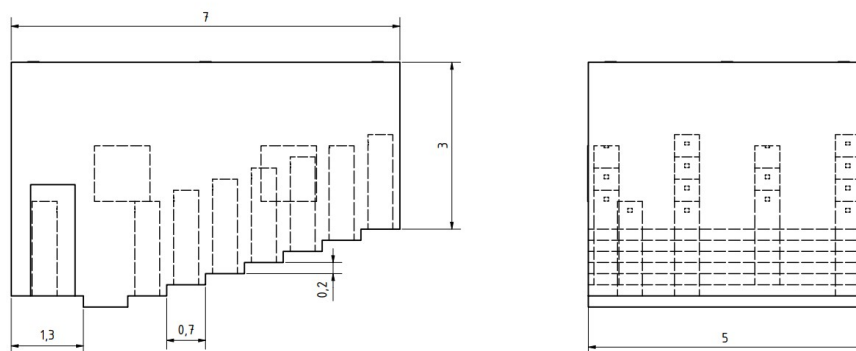


Figura 2: Dimensiones sala de clases

Las personas dentro de la sala se modelarán como cilindros de 1.7 metros de altura y 0.45 metros de diámetro. La boca por la cual saldrá el estornudo será un orificio a 14 centímetros

de la superficie superior de la persona.

A la sala, se le incluirá una puerta de 1.15×2 [m] y 2 ventanas cuadradas de 1×1 [m]. Además, se incluirán 9 entradas de aire en el techo de 0.2×0.2 [m]. Todas las cotas para sus posiciones se ven en los siguientes planos:

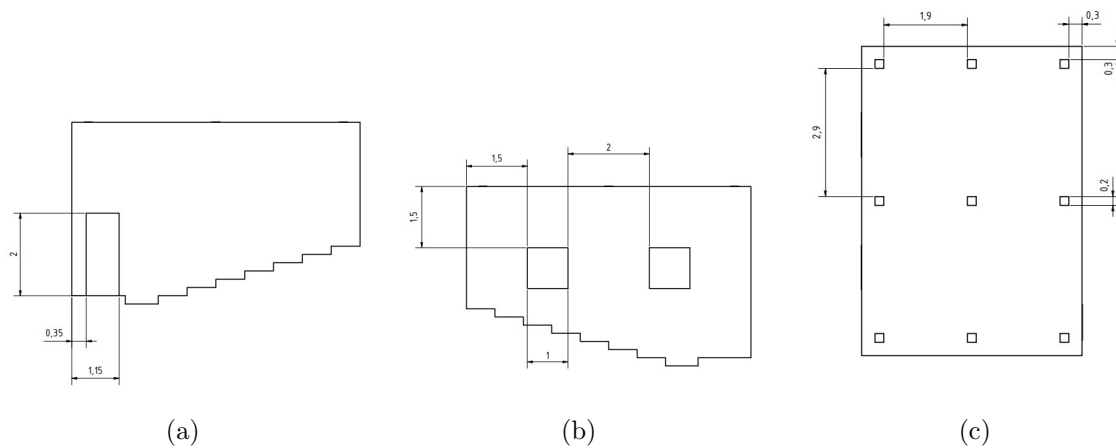


Figura 3: Dimensiones de puerta, ventanas y ventilación

La disposición de los alumnos dentro de la sala se fijó de tal manera que en cualquier dirección exista una distancia mínima de 1 metro. Además, en la siguiente imagen se nota la nomenclatura para identificar a cada persona dentro de la sala.

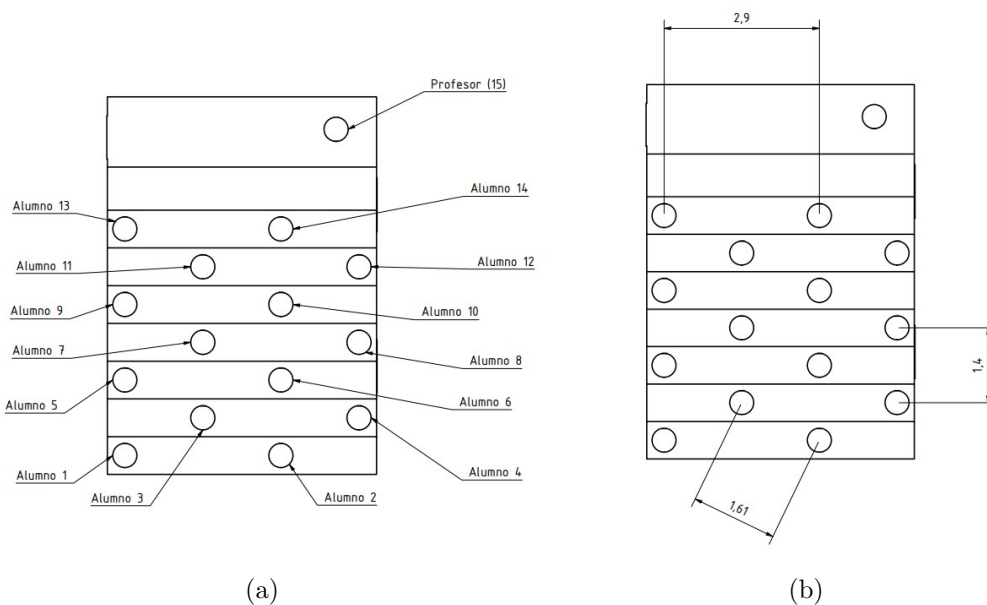


Figura 4: Identificación y distancias alumnos

Condiciones de Borde

Para la modelación se utilizarán las siguientes condiciones de borde para el flujo de aire:

- Entradas de aire en el techo:
 - Flujo másico de 0.5 [kg/s] de aire considerando las 9 entradas.
 - Temperatura de 16 [°C].
- Salida de aire en ventanas y puerta:
 - Se fija presión atmosférica en ambas superficies.
 - Temperatura de 15 [°C] y 16 [°C] en las ventanas y puerta respectivamente.

Para la entrada de aire y gotas de agua por el estornudo, se plantea lo siguiente:

- Flujo de entrada de aire de 0.004 [kg/s].
- Temperatura de 36 [°C].
- Flujo másico de gotas de agua de 10^{-6} [kg/s].
- Velocidad de entrada de 5 [m/s].

Para la modelación de las gotas se asumirán esféricas con una distribución de diámetros con tamaño mínimo de 4 [μm], tamaño medio de 90 [μm] y tamaño máximo de 200 [μm]. Con esta distribución se ingresarán gotas con 20 diámetros dentro de este rango.

Las murallas, el techo, suelo y la superficie de los alumnos se les aplicará la condición de no deslizamiento y se asumirá que cuando una gota impacte una de estas superficies, esta se quedará atrapada.

5.2. Discretización

El interior de la sala de clases por donde fluirá el aire se discretizó con volúmenes finitos tetraédricos utilizando:

- Nodos: 74992
- Elementos: 402912

El mallado del modelo se adjunta a continuación:

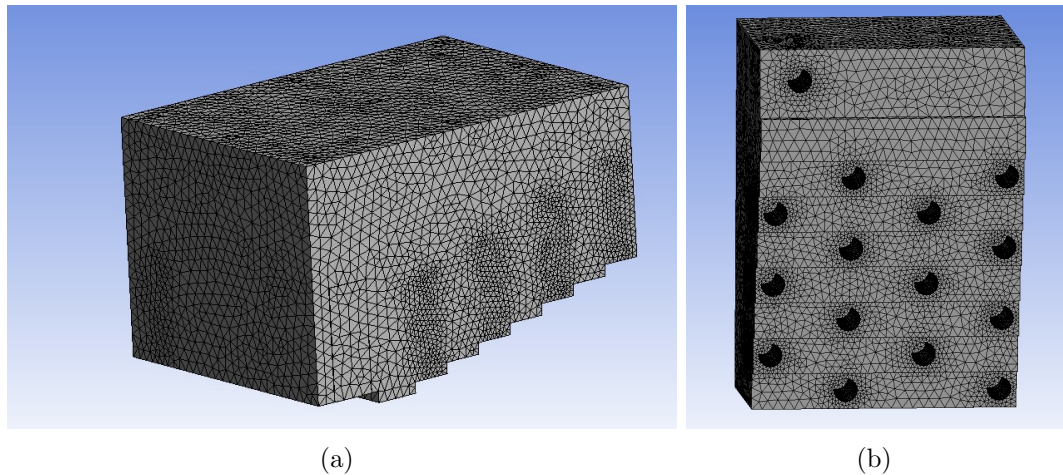


Figura 5: Mallado de la sala de clases y alumnos

5.3. Implementación

Como se dijo anteriormente, la situación se modelará en el software de FLUENT. Se implementará en estado estacionario considerando efectos gravitatorios. En este, se utilizaron los siguientes modelos:

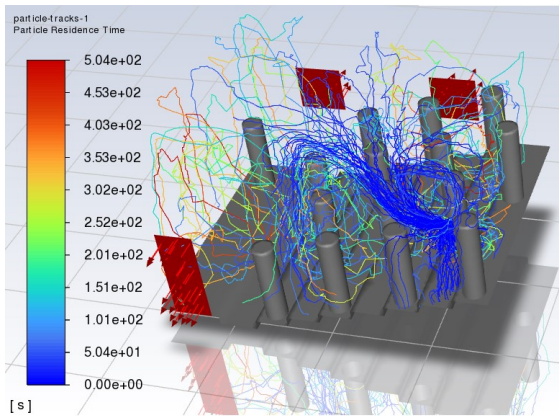
- **Viscous Model:** Modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ realizable. Se selecciona dada su gran capacidad y convergencia para modelar la turbulencia coincidiendo con la teoría. Además, se utiliza dado que no es relevante las soluciones exactas cerca de la pared.
- **Energy Equation:** Se activa para que el modelo sea lo más realista posible. Con esto se pueden incluir las temperaturas y las variaciones de ciertas propiedades con respecto a esta variable.
- **Discrete Phase Model (DPM):** Se incluye para modelar las gotas de agua como una fase discreta en el medio. En este se habilita la interacción de las partículas con el medio y el modelo de Discrete Random Walk. De esta manera se incluye la aleatoriedad por el movimiento Browniano y por la turbulencia.

Además, para el acoplamiento de la presión se utilizará el método iterativo SIMPLEC dada su rápida convergencia respecto a los otros métodos. La convergencia se monitorizará con los residuales de las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento, energía, energía cinética turbulenta y disipación viscosa.

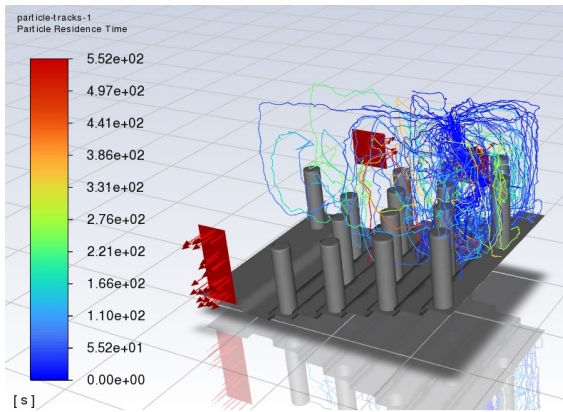
6. Análisis y Resultados

6.1. Propagación por Estudiante

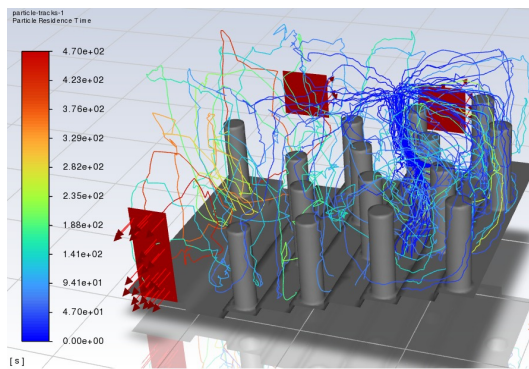
Se presenta la simulación del estornudo para cada alumno en la sala de clases. En cada imagen se sigue la trayectoria de 84 partículas y se grafica su tiempo de residencia.



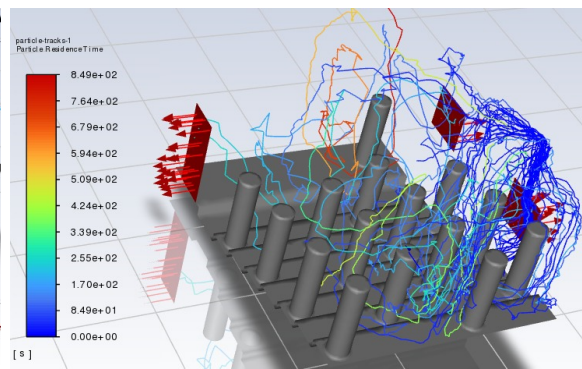
(a) A1



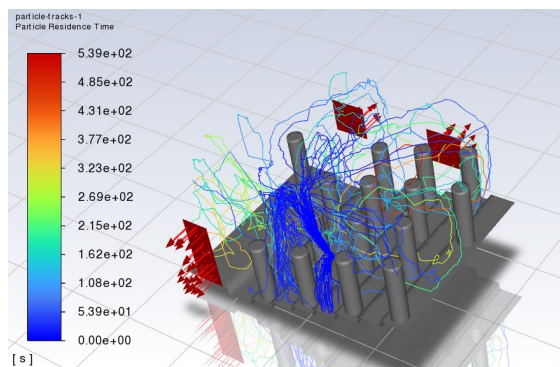
(b) A2



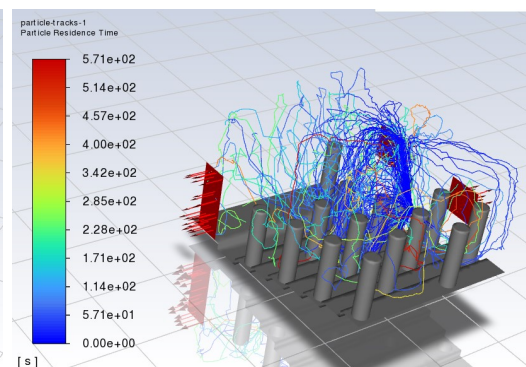
(c) A3



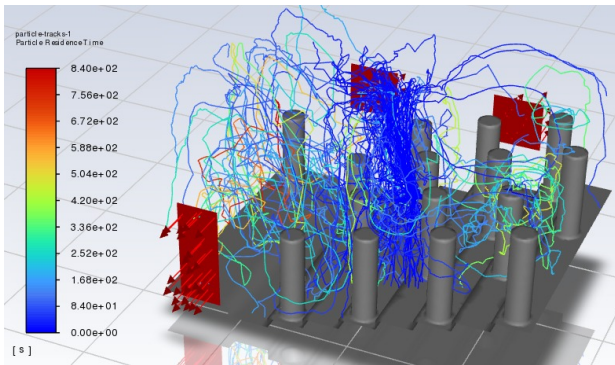
(d) A4



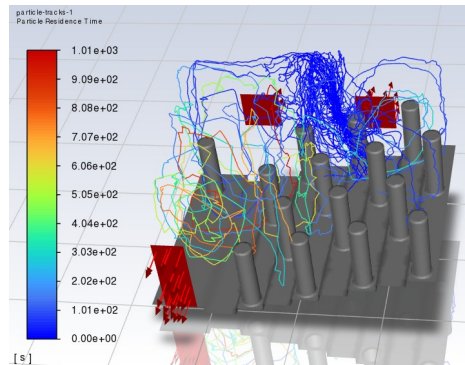
(e) A5



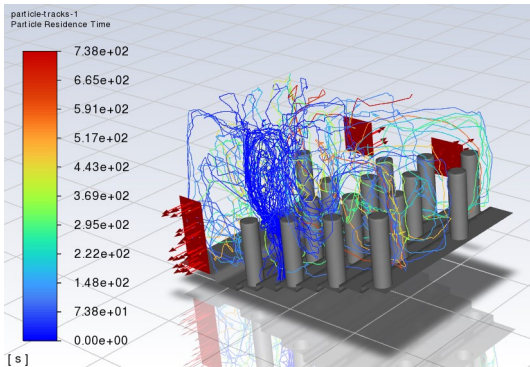
(f) A6



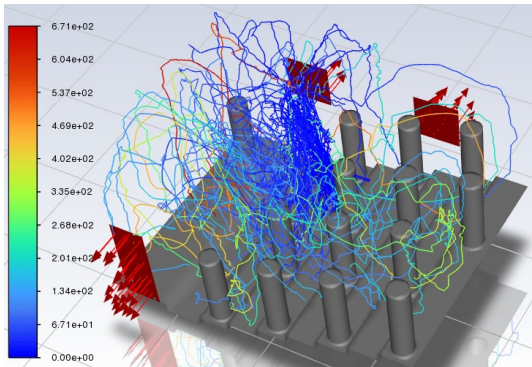
(g) A7



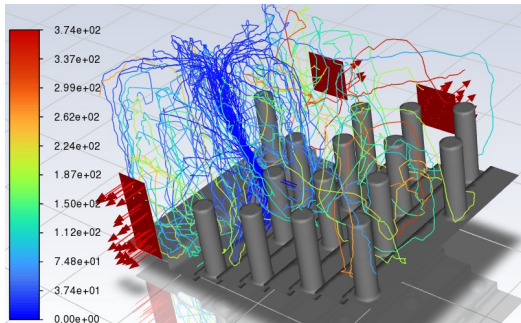
(h) A8



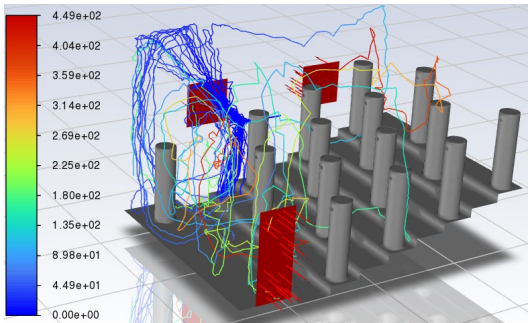
(i) A9



(j) A10



(k) A11



(l) A12

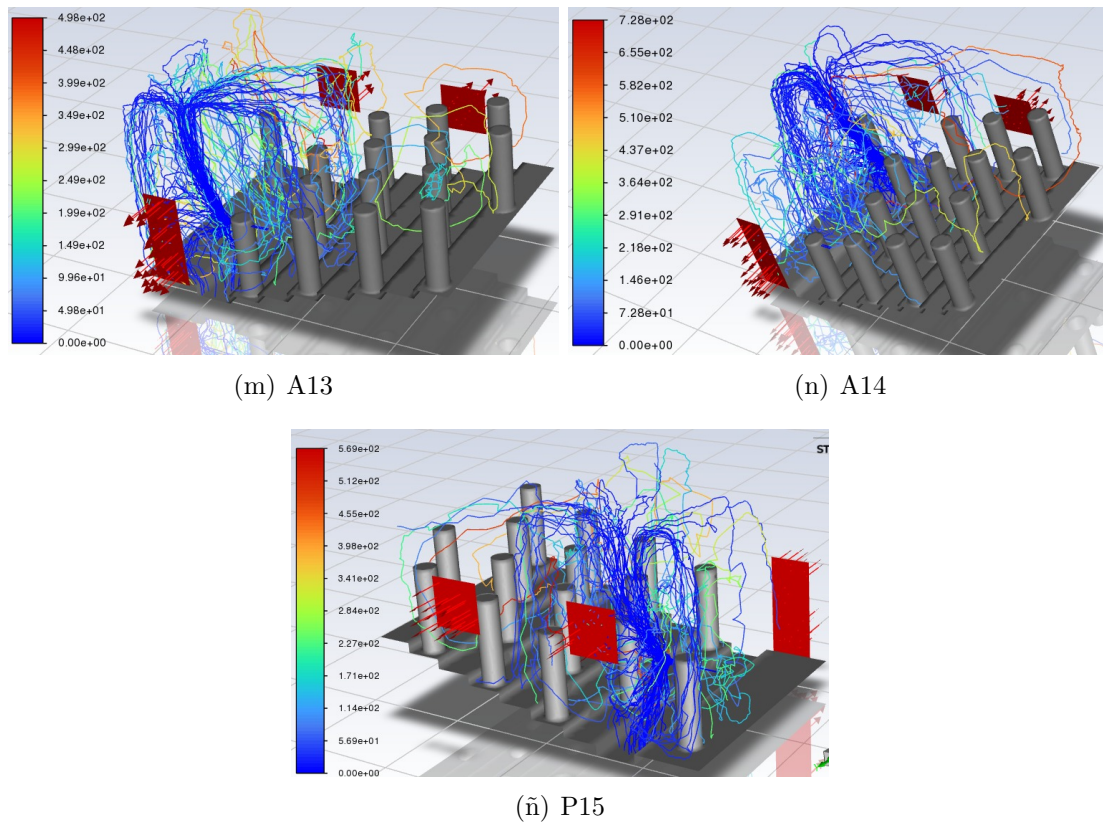


Figura 6: Trackeo de las gotas para el estornudo de cada estudiante y profesor

En las imágenes se nota como las gotas de agua que salen en el estornudo de cada alumno se propagan en la sala de clases. Se nota que la estructura es similar para cada persona, pero su posición es determinante para analizar hacia donde se van estas gotas. Esto es debido a las corrientes creadas por los ventiladores en el techo. En términos comunes, se nota que el flujo mayor de gotas siempre va en la dirección del estornudo y muy pocas partículas recirculan hacia atrás del estudiante. Además, se nota como algunas partículas ascienden al techo y otras van directo hacia el suelo. Este fenómeno se detallará en la siguiente sección. Por último, se nota que en todos los casos, a la persona de adelante del contagiado le llega la mayor cantidad de gotas, y por ende, mayor probabilidad de contagio.

En la siguiente tabla se pueden revisar las distribuciones de tiempo para las gotas en cada estornudo. Este tiempo que se indica es el tiempo en que las gotas se escapan por una de las salidas o se quedan atrapadas en alguna superficie. Además, se incluyen los porcentajes de gotas que se escapan y que se quedan atrapadas en superficies.

Tabla 1: Tiempo y porcentajes de las trayectorias de las gotas

Persona	Tiempo Mínimo [s]	Tiempo Medio [s]	Tiempo Máximo [s]	Gotas que Escaparon	Gotas Atrapadas
Alumno 1	0.005	107.4	616.2	11.46 %	88.54 %
Alumno 2	0.005	128.6	770.7	16.25 %	83.75 %
Alumno 3	0.005	109.8	751.7	10.00 %	90.00 %
Alumno 4	0.004	84.7	916.5	43.33 %	56.67 %
Alumno 5	0.005	125.7	768.6	20.00 %	80.00 %
Alumno 6	0.005	123.1	412.6	17.50 %	82.50 %
Alumno 7	0.003	97.6	862.1	11.25 %	87.50 %
Alumno 8	0.003	84.9	776.9	26.25 %	72.50 %
Alumno 9	0.003	116.8	764.5	21.25 %	78.75 %
Alumno 10	0.004	96.0	670.4	13.75 %	86.25 %
Alumno 11	0.003	111.5	677.8	18.75 %	81.25 %
Alumno 12	0.004	105.5	670.7	48.75 %	51.25 %
Alumno 13	0.003	99.6	626.7	38.75 %	61.25 %
Alumno 14	0.003	87.9	727.6	20.25 %	79.75 %
Profesor 15	0.002	90.4	800.8	27.50 %	72.50 %

Para la evaluación de la posición crítica, se comparará el tiempo medio de vida de las gotas y los porcentajes respectivo si es que escaparon por las ventanas, o quedaron atrapados en una superficie. Cabe destacar que la simulación de las gotas se corrió de tal forma que ninguna gota quedó libre en el aire.

Se aprecia que los alumnos que tuvieron un mayor tiempo medio fueron los alumnos 2, 5 y 6. Esto se puede deber tanto por la lejanía que existen desde las puertas y ventanas, y de las corrientes de aire que se puedan formar en estos sectores. Estos alumnos son de la parte central trasera de la sala de clases. En estos casos, los tiempos medios alcanzan los 120 segundos aproximadamente. Por otra parte, los alumnos que tuvieron el menor tiempo medio fueron los alumnos 4, 8 y 14. Claramente estos son los alumnos que se encuentran cerca de las ventanas, lo que pueda implicar que un porcentaje importante de gotas se escape inmediatamente después del estornudo. Coincide que estos alumnos tienen porcentajes de escape sobre el 20 %, teniendo tiempos medios de 85 segundos aproximadamente.

Para complementar este análisis, hay que destacar que no solo es relevante encontrar el alumno con mayor tiempo medio para encontrar la posición crítica. El porcentaje de gotas atrapadas significa que las gotas quedaron atrapadas en superficies, dentro de las cuales se puede encontrar otro alumno. Los alumnos con mayor porcentaje de gotas atrapadas son el 1, 3 y 7. Se nota que los alumnos 1 y 3 tienen tiempos medios elevados pero no son los mayores. De todas formas,

incluyendo el efecto del porcentaje de gotas atrapadas, se considera a estos alumnos críticos, junto al 2 y 5. Es importante destacar que esta elección se hizo considerando las imágenes de las trayectorias que tienen las gotas, presentadas anteriormente. El alumno 7 pese a tener un gran porcentaje de gotas atrapadas, no se considera crítico dado su poco tiempo medio de residencia, pero es el que sigue el listado de los alumnos críticos. De todas formas, este alumno se encuentra en el centro de la sala, por ende, las corrientes de aire son fundamentales para mejorar el porcentaje mencionado.

En el análisis, es importante destacar las mejores posiciones para poder estornudar, y así evitar contagios dentro de la sala. Se nota que los alumnos de las primeras filas tienden a tener tiempos medios menores y porcentajes de escape mayores. Además, tienen poca o nula gente delante, los cuales son los principales afectados frente a un estornudo de una persona. De esta manera, se estima que la mejor posición para estar contagiado serían los alumnos 12, 13 y 14.

En resumen la gran mayoría de los alumnos críticos se encuentran en la zona central trasera de la sala, lejos de la puerta y ventanas por donde se escapa el aire. Se debe tener un mayor cuidado con éstos, ya que el comportamiento del flujo de las gotas al estornudar, como se visualiza en las imágenes anteriores, afectaría a los individuos que se encuentran por delante de ellos.

6.2. Flujos en Estornudo

Para poder realizar un mejor análisis de la situación, es importante ver las causas de las diferentes trayectorias de las gotas. Además de las corrientes de aire, se revisarán los diámetros de las gotas y su temperatura.

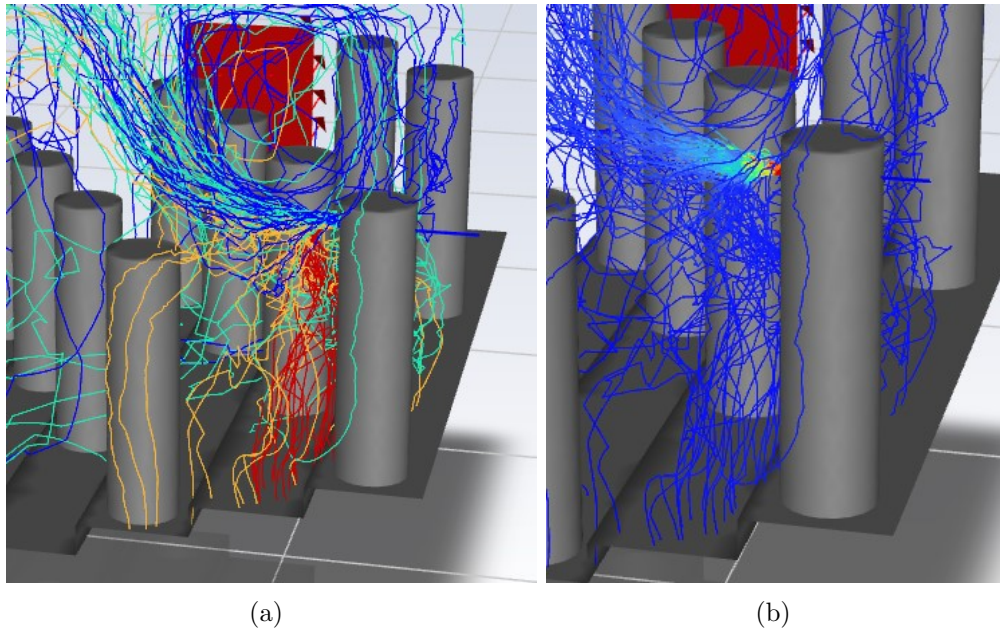


Figura 7: Movimiento de gotas respecto a: (a) el diámetro (b) la temperatura

En la figura (8.a) se nota las diferencias en trayectorias para los diámetros de las gotas. Para diámetros mayores a $50\text{ }\mu\text{m}$, las gotas tienden a caer directamente al suelo. Mientras mayor el diámetro (líneas naranjas a rojas), mayor pronunciada la caída. Por otra parte, para diámetros menores a $50\text{ }\mu\text{m}$, las gotas tienden a ascender y seguir las corrientes de vientos existentes, fenómeno que ocurrió con todos los alumnos. Complementando lo anterior, en la imagen se puede apreciar como las menores gotas entran a un vórtice sobre el alumno. En la figura (8.b) se puede notar la temperatura de las gotas. Aunque se observe que estas se enfrían de manera rápida al salir de la boca, se nota que las gotas que quedan con mayor temperatura logran ascender, mientras las que se enfrían rápido caen inmediatamente.

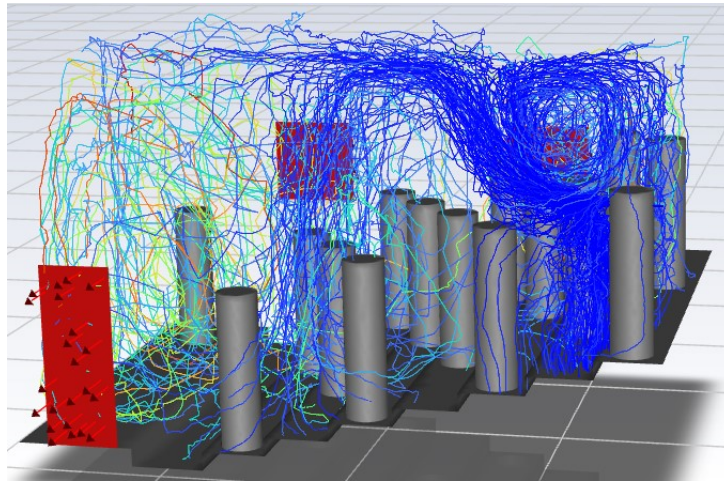


Figura 8: Trackeo de 500 partículas

En la figura (9) se visualizan de mejor manera las trayectorias si se trackean 500 partículas. Se nota claramente como las que ascienden siguen los vórtices o estructuras que tiene el flujo, mientras que las que descienden lo hacen inmediatamente. Es importante destacar que no siempre las gotas seguirán explícitamente las corrientes de aire debido a que tienen un comportamiento impredecible y aleatorio. Esto provoca que las partículas infectadas puedan llegar a cualquier sector de la sala. Por esta razón, es importante controlar la renovación de aire para evitar el asentamiento de estos en lugares no deseados.

6.3. Renovación de Aire

Los resultados obtenidos respecto a la propagación del estornudo para cada estudiante depende tanto de la característica de las gotas, como también de los flujos de aire existentes. En la sala de clases, las principales corrientes que aparecen son producto de las ventilaciones que existen en el techo. La siguiente imagen muestra como se distribuyen las líneas de corriente:

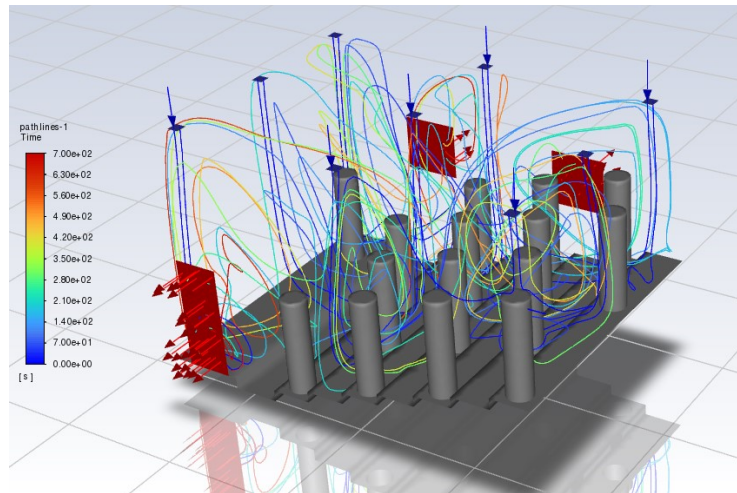


Figura 9: Líneas de corriente de la ventilación

Para una mejor visualización, se incluyen vistas frontales y superiores.

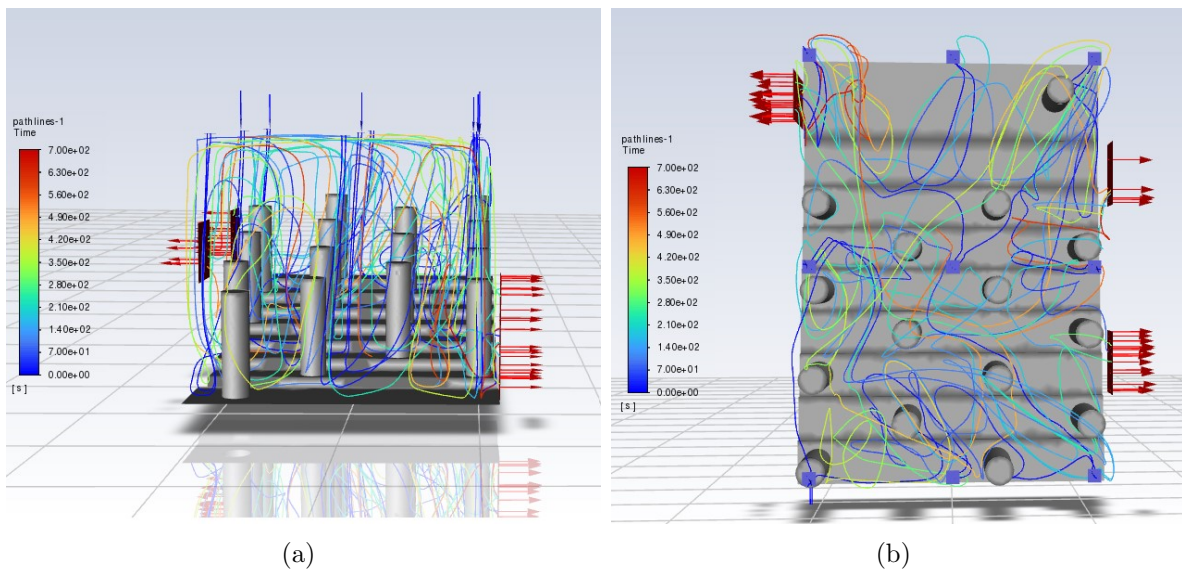


Figura 10: Vista superior y frontal

En las imágenes se nota que la mayoría de las líneas salen por la puerta, lo que significa que el aire tiende a evacuarse hacia ese lugar. De todas formas, existen líneas que salen por ambas

ventanas. Además, las corrientes permanecen un tiempo medio de 200 segundos antes de salir (los colores muestran el tiempo) con un máximo de 700 segundos. Las líneas que permanecen más tiempo en la sala, tienden a quedarse estancadas en vórtices.

Adicionalmente, considerando el volumen total de la sala de clases y el flujo másico de entrada, se pudo estimar en términos aproximados el tiempo necesario para renovar completamente el aire dentro de la sala. Esto da un tiempo de 260 segundos, lo que da 14 renovaciones de aire por hora. De todas formas, este resultado no es del todo válido dado que existen líneas de corriente que se demoraban 700 segundos en salir, pero sirve como un aproximado para la evaluación. Este tiempo se encuentra bastante razonable pero se debería intentar disminuir en condiciones especiales como una pandemia para evitar posibles contagios.

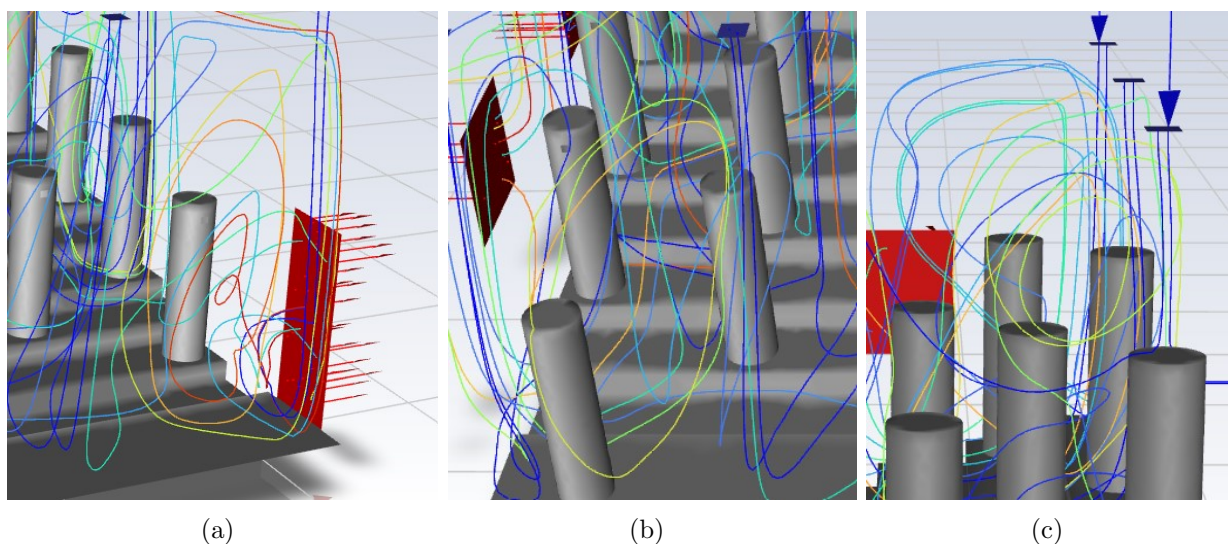


Figura 11: Vórtices en: (a) puerta (b) ventana y sobre profesor (c) sobre alumnos 1, 3 y 5

En la imagen (11) se visualiza como se forman 3 vórtices grandes en la sala de clases. El primero es un vórtice formado en la puerta, donde se nota como el aire se queda estancado un tiempo antes de salir. El segundo corresponde a uno formado sobre el profesor cerca de la ventana. De la misma forma que el primero, el aire se queda estancado un tiempo en esta zona. Estos dos vórtices pueden no ser peligrosos para una transmisión de COVID-19 de manera masiva, ya que acumula aire en zonas donde no hay tanta gente, y además por esta misma razón, nadie estornudará en esta zona. Por último, se aprecia que se genera un vórtice de menor tamaño sobre los alumnos 1,3 y 5. Este se considera peligroso ya que un estornudo de uno de estos 3 alumnos puede dejar el virus estancado un tiempo, y es lo que reflejan los resultados de la sección anterior.

En las entradas de aire la velocidad es de 1.14 [m/s] . Se estimó la potencia eléctrica necesaria en los ventiladores de las entradas comparando con catálogos existentes. Se evaluó un equipo de acondicionamiento de aire modelo Atlas Cassete. Pese a ser mayor en tamaño a los planteados en el modelo, se piensa que tendrá el mismo efecto. Considerando que en total se tiene un flujo másico de aire de 0.5 [kg/s] , se obtiene que el flujo de aire por equipo es de 0.055 [kg/s] .



Figura 12: Ventilador Atlas Cassete

Con esto, un ventilador Atlas Cassete tendría un consumo energético de 0.29 [kW] . Considerando el consumo total por los 9 ventiladores, se tiene un consumo energético de 2.61 [kW] .

En comparación a las entradas de aire, en las salidas la velocidad del aire es mucho menor. Esto se debe a las grandes áreas de la puerta y ventanas establecidas. En la modelación, se obtuvieron velocidades máximas cercanas a los 0.3 [m/s] en la puerta y 0.1 [m/s] en las ventanas. Notar que el flujo que sale por estas superficies debe ser igual al flujo que entra por el techo.

6.4. Convergencia

Cabe destacar que se monitorio la convergencia de la solución mediante los residuales de las ecuaciones de conservación planteadas en el marco teórico.

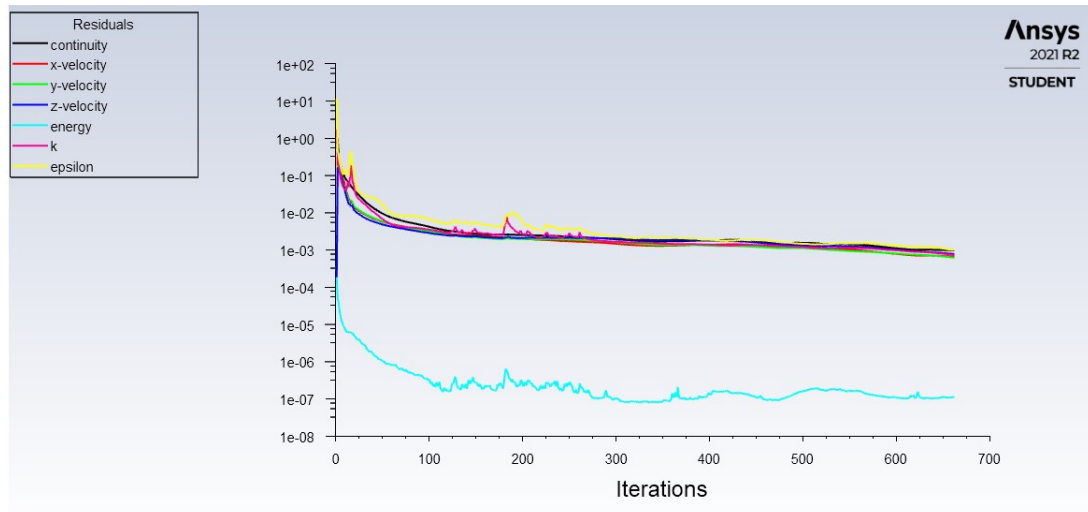


Figura 13: Residuales

Este comportamiento fue similar para todas las simulaciones realizadas en este trabajo. La mayoría de las veces, se llegaron a menos de 700 iteraciones dado que los residuales alcanzaron valores menores a 10^{-4} . De todas formas, se sabe que los residuales no son suficientes para validar la solución numérica obtenida, pero considerando que las dispersiones de las gotas siguen la teoría física, se validan los resultados obtenidos.

6.5. Posibles Mejoras

Del análisis realizado en las secciones anteriores, se notan los siguientes problemas en la ventilación y la dispersión de gotas en el aire:

1. Los alumnos de la parte trasera y central de la sala son los más críticos para estornudar, con una posibilidad alta de contagiar a un alumno.
2. Las gotas más pequeñas tienden a ascender en la sala, lo cual sin corrientes que las obliguen a bajar, puede provocar que las gotas lleguen a todos los sectores.
3. Existen vórtices en la zona trasera de la sala, lo que puede generar retención de gotas.

En base a estos problemas detectados, sería posible evaluar una nueva disposición de ventiladores con modificaciones a estos mismos. Con esto, se plantean 3 mejoras:

1. Para reducir el aire que se pueda estancar en la parte trasera de la sala se pueden incluir ventiladores en la pared del fondo. De esta manera se obliga al aire a salir de esta zona para evacuarse por las salidas.
2. Para evitar que las gotas de menor diámetro asciendan al techo y se puedan dispersar al resto de la sala, hay que generar corrientes que obliguen a las gotas a quedarse abajo. El gran problema de los ventiladores es que emiten aire solo en dirección vertical. Si estos se modifican para emitir aire en todas las direcciones, se podría evitar que aire recircule hacia arriba, creando solo corrientes descendientes. De esta manera, se reduce el radio de contagio. Además, se les podría aumentar el flujo másico de entrada y su velocidad.
3. Se nota que en la pared de la puerta, no existe una salida de aire para la zona de atrás. Es por esto, dado que no es posible poner una ventana por la disposición de las salas en la universidad, se plantea fijar un equipo que pueda succionar aire de esta zona. De esta manera, cualquier retención de gotas en el aire va a poder ser evacuado sin la necesidad que estas tengan que recorrer la sala completa para escapar.

Claramente estas medidas necesitan su modelamiento y posterior evaluación para verificar que van a solucionar los problemas planteados, pero conceptualmente, deberían mejorar la solución. Éstas lograrán evitar grandes zonas de estancamiento y reducir los tiempos medios de residencia de las gotas en el aire. Junto a estas soluciones, se podría disminuir el tiempo de la renovación de aire, lo que ayudaría a disminuir las posibilidades de contagio. Todas las medidas mencionadas podrían aumentar los costos de mantenimiento e implementación, pero deben ser llevadas a cabo dada la pandemia existente.

7. Conclusión

Con todo lo expuesto anteriormente se puede concluir que la aplicación de estudios numéricos en la modelación de un estornudo de una persona, en este caso mediante el software Fluent, contribuyen de gran forma en el análisis y evaluación del comportamiento de las gotas que son expuestas al momento de salir por una persona infectada. Esto puede generar grandes propuestas en las mejoras en la parte de ventilación en espacios cerrados donde tengan que compartir una cierta cantidad de personas, más aún cuando están saliendo más variantes del COVID-19.

En línea de lo mencionado se comprueba que las personas críticas son las que se encuentran más alejadas de las zonas donde puedan escapar las gotas infectadas, más aún cuando se forman puntos de estancamientos y vórtices en las cercanías de los alumnos, lo que sería un desastre para todo aquel que se encuentre cerca. En el caso modelado, estos serían los de la zona central y trasera de la sala de clases. Además, se pudo obtener una evaluación de la renovación del aire de la sala de clases, obteniendo un tiempo cercano a 4.3 minutos. Con estos datos, se pudo estimar el consumo energético necesario para el funcionamiento de los ventiladores.

El modelo logró representar la situación concordando con la teoría física. El movimiento del flujo como se tenía conocimiento en un principio sería impredecible, pero este comportamiento se pudo influenciar a través de una serie de entradas y salidas de aire, lo que aportaba en la distinción de lugares críticos a mejorar. Ésto respaldado también gracias a la refinación de la malla, la cual es clave para saber los sectores de interés donde se pueden generar casos interesantes a evaluar.

Es importante destacar que la situación se implementó utilizando $k - \varepsilon$ como modelo de turbulencia y SIMPLEC como acoplamiento de presión, pero se espera que la misma situación se pueda implementar con distintos modelos para aproximar el comportamiento lo más posible a la realidad, disminuyendo los errores característicos de cada uno.

En un futuro, se espera poder incluir la evaporación de las gotas emitidas en el estornudo para simular de mejor manera la situación y comprobar el comportamiento de las demás salas de clases de la universidad. De esta manera, se podrán plantear soluciones a todas las salas y así, poder realizar clases de manera segura.

8. Referencias

Referencias

- [1] Fox, McDonald's. *Introduction to Fluid Mechanics*. 8th Edition (2011)
- [2] Klaus A. Hoffmann, Steve T. Chiang. *Computational Fluid Dynamics*. 4th Edition (2000)
- [3] Mohammad-Reza Pendar, José Carlos Páscoa. *Numerical Modeling of the Distribution of Virus Carrying Saliva Droplets During Sneeze and Cough* (2020)
- [4] Giacomo Busco, Se Ro Yang, Joseph Seo, et al. *Sneezing and Asymptomatic Virus Transmission* (2020)
- [5] ANSYS, Inc. *ANSYS Fluent Theory Guide* (2015)