

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA ENERGÉTICA SOSTENIBLE**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***SISTEMA DE VENTILACIÓN EN ESPACIOS
CERRADOS PARA UN CONTROL EFICIENTE DE
AEROSOLES***

| | |
|------------------------|------------------------------|
| Estudiante | <i>Ugarte Anero, Ainara</i> |
| Director | <i>Sancho Saiz, Javier</i> |
| Departamento | <i>Ingeniería Energética</i> |
| Curso académico | <i>2021-2022</i> |

Bilbao, 16, septiembre, 2022



Resumen

La calidad del aire es un parámetro a controlar para poder habitar en un lugar cómodamente. El presente trabajo analiza el trayecto recorrido por los aerosoles exhalados al ambiente en un espacio cerrado causados tanto por el habla como por un estornudo. En él, se analizan tres escenarios; sin ventilación, con ventilación natural y con ventilación mecánica. Para ello, se define un estudio computacional de fluidos multifase basado en técnicas de Eulerian-Lagrangianas donde se tienen en cuenta la temperatura y la humedad relativa ambiente, así como la velocidad del aire y la presión. En cuanto a las partículas la evaporación, la transferencia de masa y la dispersión turbulenta se ha añadido para dar credibilidad al proyecto. La saliva que genera el cuerpo humano se ha modelado como una solución salina de 8,8 g por cada 100 ml. Los resultados muestran que el aula con una instalación de ventilación mecánica ofrece buenos resultados a la hora de un control eficiente de aerosoles, en comparación con un habitáculo sin ventilar o ayudándose de una ventilación natural. El chorro de aire inyectado en el espacio interior ofrece una humedad relativa prácticamente constante y una bajada de temperatura, ralentizando al proceso de evaporación de las partículas. Las pérdidas generadas por la ventilación natural son elevadas en comparación con los otros escenarios, haciendo casi imposible su recomendación.

Palabras clave: Mecánica de fluidos computacional (CFD), ventilación natural, ventilación mecánica, gotitas, destino, evaporación, estornudo, flujo.



Laburpena

Airearen kalitatea kontrolatu beharreko parametroa da, leku eroso batean bizitzeko. Lan honetan, airean egoten diren aerosolen ibilbidea aztertzen da, hizketak eta doministikuak sortutako eremu itxi batean. Bertan hiru agertoki aztertzen dira: aireztapenik gabe, aireztapen naturalarekin eta aireztapen mekanikoarekin. Horretarako, fluido konputazional multifuntzionalen azterketa bat definitzen da, Eul-Lagrangian-en teknikan oinarritua, non kontuan hartzen baitira inguruneke tenperatura eta hezetasun erlatiboa, airearen abiadura eta presioa. Partikulei dagokienez, lurruntzea, masa-transferentzia eta sakabanatze zurrunbilotsua gehitu egin dira proiektuari sinesgarritasuna emateko. Giza gorputzak sortzen duen listua 100 ml-ko 8,8 g-ko gatz-soluzio gisa modelatu da. Emaizak adierazten dute aireztapen mekanikoko instalazioa duen gelak emaitza onak ematen dituela aerosolen kontrol eraginkorra egiteko orduan, aireztatu gabeko gela batekin edo aireztapen naturalarekin alderatuta. Barne-espazioan injektatutako aire-zorrotadak ia konstantea den hezetasun erlatiboa ematen du, eta tenperatura jaitsi egiten da, partikulak lurruntzen mantsotzen. Aireztapen naturalak eragindako galerak handiak dira beste eszenen aldean, eta ia ezinezkoa da gomendatzea.

Hitz-gakoak: Fluidoaren dinamika konputazionala (CFD), aireztapen naturala, aireztapen mekanikoa, tantak, helmuga, lurruntzea, doministikua, fluxua.



Abstract

The air quality is a parameter to be controlled to be able to live in a comfortable place. This paper analyzes the trajectory of aerosols exhaled into the environment in an enclosed space caused by both speech and sneezing. In it, three scenarios are analyzed; without ventilation, with natural ventilation and with mechanical ventilation. To do this, we define a multi-phase computational fluid study based on Eulerian-Lagrangian techniques that takes into account temperature and ambient relative humidity, as well as air velocity and pressure. As for particles evaporation, mass transfer and turbulent dispersion has been added to give credibility to the project. The saliva that the human body generates has been modeled as a saline solution of 8.8 g per 100 ml. The results show that the classroom with a mechanical ventilation system offers good results when it comes to an efficient control of aerosols, compared to a cabin without ventilation or using natural ventilation. The air jet injected into the interior space offers a practically constant relative humidity and a drop in temperature, slowing down the process of evaporation of the particles. The losses generated by natural ventilation are high compared to the other scenarios, making their recommendation almost impossible.

Key words: Computational fluid mechanics (CFD), natural ventilation, mechanical ventilation, droplets, fate, evaporation, sneezing, flow.



ÍNDICE

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN..... | 7 |
| CONTEXTO | 9 |
| Síntomas y propagación..... | 10 |
| Prevención..... | 11 |
| OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO | 12 |
| BENEFICIOS DEL PROYECTO | 13 |
| Beneficios técnicos | 13 |
| Beneficios sociales | 13 |
| MATERIALES Y MÉTODOS | 14 |
| Dominio computacional y condiciones iniciales | 14 |
| Configuración numérica..... | 18 |
| VALIDACIÓN | 20 |
| RESULTADOS..... | 21 |
| a. Recorrido de los aerosoles en los diferentes escenarios..... | 22 |
| b. Masa de aerosoles acumulada en los diferentes escenarios | 25 |
| c. Pérdidas de energía | 28 |
| PRESUPUESTO | 29 |
| Desarrollo del presupuesto..... | 29 |
| <i>Mano de obra</i> | 29 |
| <i>Licencia de software</i> | 30 |
| Presupuesto final | 30 |
| CONCLUSIONES..... | 31 |
| BIBLIOGRAFÍA | 32 |



TABLAS

Tabla 1. Número y porcentaje de hospitalizaciones, ingresos en UCI y defunciones causados por el COVID-19 en personas de más de 60 años en los diferentes periodos que se han dado en la pandemia en España. **Fuente:** CNE. ISCIII. Red Nacional de Vigilancia Epidemiológica.10

Tabla 2. Costes de mano de obra..... 30

Tabla 3. Costes de la licencia de software..... 30

Tabla 4. Costes totales. 30

FIGURAS

Figura 1. Periodos epidémicos de COVID-19 en España. **Fuente:** CNE. ISCIII. Red Nacional de Vigilancia Epidemiológica..... 9

Figura 2. Incidencia de casos de coronavirus en País Vasco frente a la media de España. **Fuente:** Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad, www.epdata.es. 9

Figura 3. Medidas de aislamiento en establecimientos hosteleros aconsejados por el Servicio Vasco de Salud para la prevención del COVID-19. **Fuente:** Osakidetza..... 11

Figura 4. Geometría del dominio computacional. Medidas; X = 8.5 metros, Y = 7 metros y Z = 3.1 metros. El aula se mantiene a una temperatura de 21 °C y una humedad relativa del 42 % a presión atmosférica constante. **Fuente:** Elaboración propia. 14

Figura 5. Gráfico sinusoidal que sigue el flujo del estornudo. Datos experimentales del proyecto de Busco et al., (2020) con un valor máximo de 70 m/s. **Fuente:** Elaboración propia. 15

Figura 6. Distribución log-normal del flujo del estornudo. El rango del diámetro de partícula toma valores de 0 a 1000 μm con un valor medio de 360,1 μm con una desviación estándar del 1.5. **Fuente:** Elaboración propia. 15

Figura 7. Gráfico sinusoidal que sigue el flujo del estornudo. Valores del flujo para simular la acción de un estornudo. **Fuente:** Elaboración propia. 16

Figura 8. Inyectores para simular el flujo del habla y del estornudo. Geometría del aula vista desde arriba donde se especifica el alumno infectado y el profesor. **Fuente:** Elaboración propia.16

Figura 9. Geometría del aula implementando puertas y ventanas. Las ventanas actúan de entrada de aire limpio y por las puertas sale el aire contaminado del aula. **Fuente:** Elaboración propia. 17

Figura 10. Geometría del aula implementado la ventilación mecánica. Dos conductos formados por cuatro espacios que renuevan el aire interior a un flujo de 0.31 m^3/s y un conducto que se encarga de succionar el aire contaminado creado por los humanos habitando el aula. **Fuente:** Elaboración propia..... 17

Figura 11. Mallado cúbico creado para la discretización del modelo a estudiar, compuesto por 10.5^6 celdas. **Fuente:** Elaboración propia. 18

Figura 12. Destino de gotas de agua. Estudio experimental de Hamey, (1982) que consta de dos gotitas de agua puras introducidas en un ambiente de 70 % de humedad relativa a una temperatura de 20°C y se dejan caer libremente por un espacio para observar la distancia que recorren a medida que se van evaporando. Las gotitas tienen un diámetro de 110 μm y 115 μm y tienen una temperatura de 16°C. **Fuente:** Elaboración propia..... 21

Figura 13. Destino de gotas de agua. Estudio experimental de Spillman, (1984) que consta de una gotita de agua pura introducida en un ambiente de 68 % de humedad relativa a una temperatura de 31°C y se deja caer libremente por un espacio para observar la distancia que recorre a medida



que se va evaporando. La gota tiene un diámetro de 170 μm y una temperatura de 25°C. **Fuente: Elaboración propia**..... 21

Figura 14. Recorrido y destino de los aerosoles generados en el aula sin ventilación. El alumno colocado en la primera fila a la derecha es el más afectado. Las partículas con mayor tamaño caen rápidamente al suelo. **Fuente: Elaboración propia**..... 23

Figura 15. Recorrido y destino de los aerosoles generados en el aula con ventilación natural. El alumno colocado en la primera fila a la derecha es el más afectado. Las partículas con mayor tamaño caen rápidamente al suelo. Los aerosoles generados por el habla del profesor toman sentido opuesto al que se vierten. **Fuente: Elaboración propia**. 24

Figura 16. Recorrido y destino de los aerosoles generados en el aula con ventilación mecánica. El alumno colocado en la primera fila a la derecha es el más afectado. Las partículas con mayor tamaño caen rápidamente en la mesa del alumno infectado, debido a la presión de entrada de aire generada por el conducto de ventilación. **Fuente: Elaboración propia**..... 25

Figura 17. Cantidad de aerosoles con una masa específica en cada intervalo de tiempo en un aula sin ventilación. La mayoría de partículas tienen una masa de 0.0025 mg durante los 4 segundos analizados. **Fuente: Elaboración propia**. 26

Figura 18. Cantidad de aerosoles con una masa específica en cada intervalo de tiempo en un aula con ventilación natural. La mayoría de partículas tienen una masa de 0.0025 mg durante los 4 segundos analizados. **Fuente: Elaboración propia**. 26

Figura 19. Cantidad de aerosoles con una masa específica en cada intervalo de tiempo en un aula con ventilación mecánica. La mayoría de partículas tienen una masa de 0.0028 mg durante los 4 segundos analizados. **Fuente: Elaboración propia**. 27



INTRODUCCIÓN

La salud es un estado a cuidar de gran importancia, y más hoy en día, tras la situación de riesgo vivida mundialmente en los últimos tres años a causa de la pandemia del COVID-19. El aislamiento de las personas infectadas con síntomas leves fue el protocolo a seguir para que aquella persona contagiada no propagase el virus, norma marcada por la OMS (Organización Mundial de la Salud). Debido al aislamiento, en un espacio cerrado, la calidad del aire se podría llegar a empeorar debido a la carga vírica que genera la persona aislada (Abouleish, 2021). Y no solo por la norma a cumplir de la persona contagiada, la mayoría del tiempo, los humanos residen en espacios cerrados, como en las oficinas, universidades o en casa, entre otras. Es por ello que mejorar la calidad del aire implica un mejor bienestar para los seres humanos (Liu & Lin, 2021). Por el contrario, un ambiente sin ventilar genera una situación desagradable y perjudicial para la salud, ya que se aumenta el contagio de enfermedades aéreas, como indica Wargocki et al., (2002). Estudios como Bhagat, Davies Wykes, Dalziel, & Linden, (2020) demuestran, que, en interiores, la propagación e infección del virus tiene unas mayores probabilidades de contagio que en exteriores, debido al tiempo de exposición. Según Agarwal et al., (2021) la calidad ambiental interior depende, entre otros factores, del confort térmico. Este término se divide en dos grandes grupos; humedad relativa y temperatura ambiente. Estudios como el de Ugarte-Anero et al., (2022), publicado en la revista *"Science Reports-Nature"* de cuartil Q1, que muestra un proyecto sobre la dinámica que tiene una única gota de saliva, indica que tanto la temperatura ambiente como la humedad relativa son parámetros que afectan directamente al tiempo de evaporación de las gotas de un estornudo humano. Por lo tanto, más tiempo en el ambiente implica una menor calidad del aire y una mayor posibilidad de contagio. En la revista *"Campusa"* se publicó una entrevista de los autores explicándose sobre la importancia del estudio realizado. Por otro lado, Agarwal et al., (2021) informa de que existen técnicas de mejora para cuidar la seguridad de un enfermo por COVID-19 aislado. Enfocándose en controles de ingeniería se destaca la ventilación, tanto natural como mecánica. En particular, la ventilación simple es la que ofrece una mayor probabilidad de infección según Motamedi, Shirzadi, Tominaga, & Mirzaei, (2022).

La ventilación natural consiste en la renovación del aire interno mediante la utilización de puertas, ventanas o conductos. Las viviendas que no poseen ventilación mecánica utilizan esta técnica para mejorar la calidad del aire interior. El estudio computacional de Abbas & Dino, (2021) muestra que cada edificación es única y requiere de un estudio específico para poder calcular de manera precisa una buena ventilación en el interior de la vivienda. El estudio matemático de Abbas & Gursel Dino, (2022) simula nueve escenarios de ventilación natural de un aula y asegura que, tanto la altura donde se encuentra instalada la ventana de entrada de aire como la diferencia de altura entrada-salida de aire es un factor que afecta considerablemente a la renovación del aire interior. Las simulaciones computacionales del estudio proporcionado por Zhou, Qian, & Liu, (2018) demuestran que, aunque la ventilación natural proporciona una gran renovación de aire hace falta incluir técnicas de ventilación mecánica. Obtienen como resultado que enfermedades transmitidas al aire a causa de un estornudo se podrían transmitir a aulas adyacentes con un índice de contagio medio de aproximadamente 11%.



En contraposición, la ventilación mecánica introduce la renovación del aire en el interior de un habitáculo gracias a la función de un ventilador. El trabajo numérico realizado por Mirzaie et al., (2021) consta de un aula de estudio con 30 alumnos y un profesor con diferentes velocidades de entrada de aire. Exponen que, tras el estornudo, a medida que la velocidad de entrada de aire aumenta la concentración de partículas exhaladas al ambiente disminuye. También es llamativo, que con una velocidad de entrada de aire baja la persona situada en la primera fila sea la que más riesgo de contagio tenga y en cambio con velocidad de entrada de aire de regeneración más alta las personas de las últimas filas sean las que más expuestas estén, con una concentración de partículas de $2,48 \times 10^{-9}$ kg/m³. Incrementar la entrada de aire renovado al 100% durante una hora aproximadamente, causa una reducción de la masa de aerosoles del 80% lo que significa que la probabilidad de infección se reduce a un 50%, según el modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) realizado por Ho, (2021). Justificado queda la efectividad de esta técnica de ventilación, ya que Srivastava, Zhao, Manay, & Chen, (2021) asegura que la mejor estrategia para reducir a niveles casi despreciables el riesgo de infección sería la combinación de aire exterior 100% y UV-C (ultravioleta-C) en los conductos de ventilación, entre otras, con aire desinfectado por las unidades UV-C de RM3 (Productos de tercera generación de Rheem).

Como se ha podido observar la ventilación es un factor importante para poder controlar las enfermedades de transmisión aéreas. No obstante, una ventilación excesiva genera pérdidas energéticas que afectan gravemente tanto en la habitabilidad del espacio como a la eficiencia energética de este. A continuación, se muestra un proyecto donde se analiza un escenario sometido a tres situaciones diferentes donde las pérdidas de energía generadas chocan con la situación más eficiente para la prevención de enfermedades transmitidas por vía aérea.



CONTEXTO

A principios del mes de marzo, en el año 2020, comenzó lo que ahora se conoce como la pandemia del COVID-19. A día de hoy, en España, se han dado 13.3 Millones de casos, en la Figura 1 se muestran los seis periodos epidémicos de COVID-19 que han ocurrido en España. Actualmente, el coronavirus está mucho más normalizado, pero es una enfermedad infecciosa provocada por el SARS-CoV-2 que ha causado la muerte de 112 mil personas en España. En la Tabla 1 se muestran las hospitalizaciones, ingresos en UCI y defunciones en España en los diferentes periodos. La edad mostrada es a partir de 60 años, edad que se entiende como personas de riesgo. En la Comunidad Autónoma del País Vasco el número de casos asciende a 769.000, hoy por hoy. En la Figura 2 se observa la diferencia de la tasa de casos entre el País Vasco y España. La situación vivida puso el enfoque en sectores como la ciencia en investigar sobre las enfermedades de contagio aéreo.

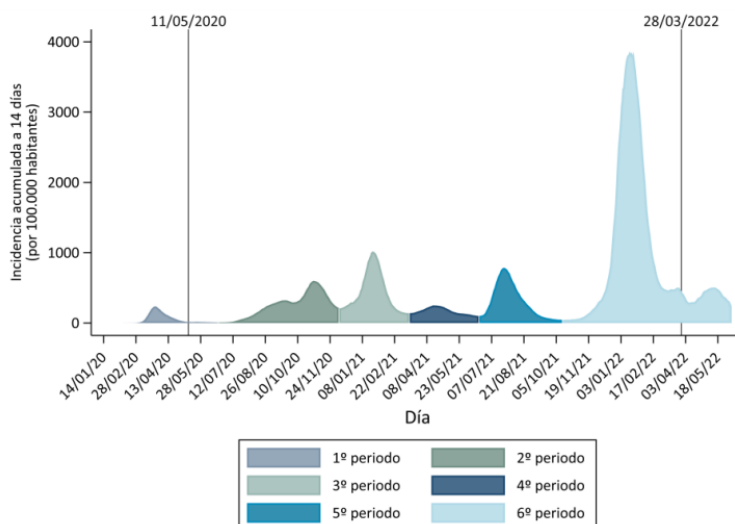


Figura 1. Periodos epidémicos de COVID-19 en España. Fuente: CNE. ISCIII. Red Nacional de Vigilancia Epidemiológica.

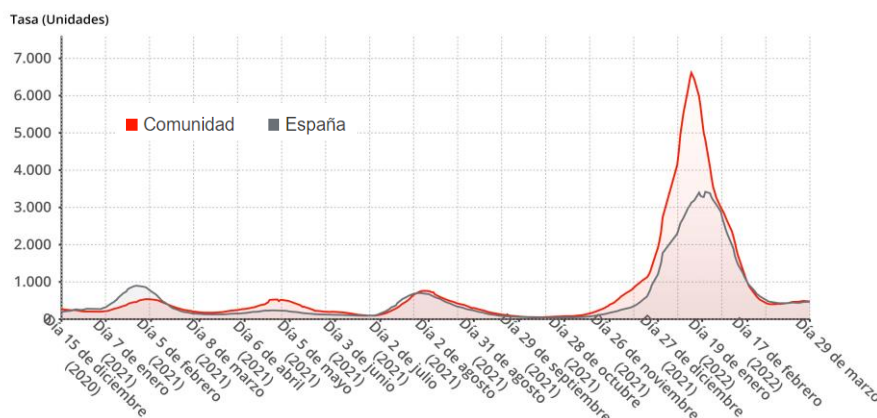


Figura 2. Incidencia de casos de coronavirus en País Vasco frente a la media de España. Fuente: Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad, www.epdata.es.



| | | Hospitalizaciones ¹ | Ingresos en UCI ¹ | Defunciones ¹ |
|----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 1º periodo | Grupo de edad | | | |
| | 60-69 | 19979 (56,6) | 3013 (8,5) | 2747 (7,8) |
| | 70-79 | 23677 (69,7) | 2604 (7,7) | 6798 (20,0) |
| | 80-89 | 22408 (57,0) | 406 (1,0) | 12034 (30,6) |
| | ≥90 | 8053 (41,0) | 73 (0,4) | 6672 (34,0) |
| | Sexo | | | |
| | Mujeres | 33461 (48,7) | 1867 (2,7) | 12828 (18,7) |
| | Hombres | 39953 (68,3) | 4174 (7,1) | 15356 (26,3) |
| | Total | 74117 (57,8) | 6096 (4,8) | 28251 (22,0) |
| | 2º-5º periodo | Grupo de edad | | |
| 60-69 | | 54952 (13,9) | 9833 (2,5) | 6117 (1,5) |
| 70-79 | | 56664 (23,5) | 8106 (3,4) | 12521 (5,2) |
| 80-89 | | 58711 (33,9) | 1341 (0,8) | 23630 (13,7) |
| ≥90 | | 21937 (34,7) | 143 (0,2) | 13636 (21,6) |
| Sexo | | | | |
| Mujeres | | 89215 (18,8) | 6226 (1,3) | 25337 (5,3) |
| Hombres | | 103038 (25,9) | 13194 (3,3) | 30567 (7,7) |
| Total | | 192264 (22,0) | 19423 (2,2) | 55904 (6,4) |
| 6º periodo <28/03/2022 | | Grupo de edad | | |
| | 60-69 | 15773 (3,6) | 2380 (0,5) | 1716 (0,4) |
| | 70-79 | 17046 (6,2) | 1770 (0,6) | 3013 (1,1) |
| | 80-89 | 20736 (12,1) | 459 (0,3) | 5313 (3,1) |
| | ≥90 | 10175 (15,2) | 76 (0,1) | 3879 (5,8) |
| | Sexo | | | |
| | Mujeres | 29076 (5,5) | 1554 (0,3) | 6244 (1,2) |
| | Hombres | 34654 (8,2) | 3131 (0,7) | 7677 (1,8) |
| | Total | 63730 (6,7) | 4685 (0,5) | 13921 (1,5) |
| | 6º periodo ≥28/03/2022 | Grupo de edad | | |
| 60-69 | | 4191 (2,8) | 326 (0,2) | 213 (0,1) |
| 70-79 | | 7783 (5,3) | 481 (0,3) | 474 (0,3) |
| 80-89 | | 10863 (11,6) | 251 (0,3) | 1099 (1,2) |
| ≥90 | | 5391 (16,5) | 34 (0,1) | 941 (2,9) |
| Sexo | | | | |
| Mujeres | | 13058 (5,4) | 384 (0,2) | 1310 (0,5) |
| Hombres | | 15166 (8,4) | 707 (0,4) | 1417 (0,8) |
| Total | | 28228 (6,7) | 1092 (0,3) | 2727 (0,6) |

¹n (% del total de casos de COVID-19 en personas de 60 o más años en el mismo grupo).

Tabla 1. Número y porcentaje de hospitalizaciones, ingresos en UCI y defunciones causados por el COVID-19 en personas de más de 60 años en los diferentes periodos que se han dado en la pandemia en España. **Fuente:** CNE. ISCIII. Red Nacional de Vigilancia Epidemiológica.

Síntomas y propagación

Debido a las partículas exhaladas al ambiente, el virus lo puede propagar una persona infectada desde la boca o la nariz cuando esta tose, estornuda, habla o incluso respira. La dimensión de estas partículas puede ser desde pequeños aerosoles hasta gotitas de mayor tamaño. Debido a la carga vírica, el virus tiende a propagarse más fácilmente en espacios cerrados o cuando se dan situaciones de

aglomeración. Dándose la situación de estar cerca de una persona contagiada se puede estar en riesgo de contagiarse, o tocando una superficie contaminada por el virus y a continuación tocarse la boca, nariz u ojos. Los síntomas más notorios según las OMS son fiebre, tos, pérdida de olfato y del gusto y cansancio. A medida que el virus empezó a mutar y se encontraron diferentes variantes de este los síntomas que se comenzaron a notar fueron; diarrea, dolor de cabeza o garganta, ojos irritados (conjuntivitis) y dolor en el pecho.

Prevención

En un principio, el aislamiento durante tres meses fue la medida más eficaz para evitar el contagio del virus. Seguidamente, el uso de mascarillas, tanto en espacios interiores como exteriores, fue la norma a cumplir acompañada de la distancia de seguridad y la higiene de manos. Un año más tarde de declararse la pandemia mundial, la ciencia posibilitó el desarrollo de una serie de vacunas que consiguieron disminuir la virulencia y mortalidad del virus. Las instituciones se encargaron de generar contenido donde se explicaba y se detallaba medidas y normas a cumplir para la prevención del virus. En la Figura 3 se muestra un boceto de Osakidetza, el servicio Vasco de Salud, de las medidas de aislamiento en establecimientos hosteleros. Como se observa, la ventilación natural es de gran importancia. La Agencia Española de Medicamentos y Productos Sanitarios (AEMPS) informa de la existencia de diferentes test o pruebas que diagnostican si una persona está infectada por el COVID-19. Los test de diagnóstico de COVID-19 se pueden clasificar según su objetivo, si la infección está activa o si la infección está inactiva pero el cuerpo humano ha creado anticuerpos contra el virus. Las pruebas más eficaces y las más accesibles por la humanidad son los test antígenos y las pruebas PCR (Reacción en Cadena de la Polimerasa).



Figura 3. Medidas de aislamiento en establecimientos hosteleros aconsejados por el Servicio Vasco de Salud para la prevención del COVID-19. **Fuente: Osakidetza.**



OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO

El siguiente trabajo fin de máster tiene como objetivo estudiar, mediante técnicas de mecánica de fluidos computacional, los diferentes sistemas de ventilación para un control eficiente de aerosoles. El escenario a presentar es un aula compuesta por un profesor y nueve alumnos. El profesor, mediante el habla, genera aerosoles, y un alumno colocado en la segunda fila estornuda. En un primer lugar, se observa la dispersión y la deposición de los aerosoles exhalados, sin ventilación. A continuación, se muestra el mismo escenario, pero esta vez con dos puertas y tres ventanas abiertas al fondo de la clase, simulando por ella una ventilación natural. Se examina el recorrido de estas partículas. La última simulación computacional a presentar es sustituyendo la ventilación natural por ventilación mecánica. Como resultado final se ofrecen las pérdidas energéticas que se generan en el proceso y la transferencia de calor de los diferentes sistemas de ventilación y el camino que recorren estos aerosoles en los 3 escenarios propuestos. Se comprueba qué escenario es el más eficiente para evitar el contagio. Para dar solución al problema presentado anteriormente, el programa matemático elegido por la autora de este trabajo ha sido el código comercial CFD STAR-CCM+ v.16.02 (Siemens, London, UK). Para ejecutar todas las simulaciones se utilizó un servidor personal en clúster paralelo con Intel Xeon © E5-2609 v2 CPU @ 2.5 GHz (16 núcleos) y 45 GB de RAM. Cada simulación tomó alrededor de 420 h de cómputo.

Se presenta este trabajo con el contexto del Máster de Ingeniería Energética Sostenible, ya que, basándose en las asignaturas cursadas se ha querido dar importancia a aquellas que hablaban sobre la energía y el precio de esta. Así como las que han tratado temas de abastecimiento, pérdidas de energía, calidad, mantenimiento y fluidodinámica. La palabra energía está en boca de no solo los profesionales del sector energético, sino de una amplia mayoría de la sociedad. Las portadas en prensa o los informativos se abren cada día con noticias sobre el precio de la electricidad o sobre el abastecimiento de gas natural en Europa. Primero, el parón mundial de la actividad industrial como consecuencia del COVID-19, el pago de los derechos de emisión de CO₂, y luego la invasión de Ucrania, han provocado una gran fluctuación de los precios. Las variaciones de demanda y la limitación de suministro de países productores han llevado a Europa, dependiente del gas natural importado, y a España en concreto, a sufrir el alza de los precios de la energía. El precio medio de la electricidad en el mercado mayorista ha variado de 47.68€/MWh en 2019 a 111.85€/MWh en 2021, observándose un pronunciado ascenso, según OCU, (2022).

Considerando los efectos que provoca la subida de los costes energéticos a la industria o a usuarios domésticos la Comisión Europea y el Gobierno central han tomado una serie de medidas para atenuar a la subida de precios como el plan REPowerEU por el que se pretende asegurar el llenado mínimo del 90% de los almacenamientos de gas natural o la excepción ibérica por el cual se fija un precio tope al gas utilizado para producir electricidad.



Con esto queda reflejado que además de estas medidas se ha de reducir el consumo energético asegurando el confort térmico. La eficiencia energética persigue este fin, optimizar el recurso energético para alcanzar unos niveles determinados de satisfacción con el entorno térmico y asegurar la comodidad de sus ocupantes. El óptimo diseño de una estancia se ha tenido en cuenta desde tiempo ancestrales, la ganancia solar por medio de la orientación al sur, los materiales y el tipo de estructura son escogidos acordes a la zona climática, así como el aislamiento requerido. La ventilación es otro de los factores que cuenta con un papel protagonista en el diseño previo de los edificios. Un análisis detallado de la situación y necesidades del entorno, previene las pérdidas de calor y como consecuencia disminuye el consumo tanto de equipos térmicos como eléctricos (El Mundo, 2016). El presente trabajo fin de máster pretende combinar el confort de las personas en interiores con el ahorro energético que se podría conseguir tras un buen diseño ingenieril obteniendo mediante programas numéricos de mecánica de fluidos computacional el recorrido de las partículas en movimiento en la atmosfera.

BENEFICIOS DEL PROYECTO

Los beneficios que aporta este proyecto se pueden dividir en dos grupos: beneficios técnicos y beneficios sociales.

Beneficios técnicos

A nivel tecnológico, las imágenes obtenidas del programa matemático, ayudan a futuros proyectos para calcular la disposición de ventanas y puertas en un domicilio para un mejor aprovechamiento energético y circulación del aire. Por el mismo modo, la colocación de los sistemas de ventilación mecánica es importante para reconducir el flujo del aire. Asimismo, se cuestiona si la distancia de seguridad marcada por la OMS es eficiente cuando existe un flujo de aire interior capaz de mover la bolsa de aire a la que están sometidos los ocupantes de la misma.

Beneficios sociales

El beneficio social tras la publicación de este trabajo es la conciencia del ser humano que debe tomar para poder eximir el contagio dentro de un espacio cerrado. Tanto la persona infectada, como los demás ocupantes, dado el caso que se muestra, pueden suponer qué posturas tomar para que las partículas exhaladas al ambiente no recorran diferentes trayectos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Dominio computacional y condiciones iniciales

Implementando técnicas de mecánica de fluidos computacional para tratar de resolver problemas complejos, como es el recorrido y destino que tienen las partículas liberadas al ambiente por seres humanos, se ha considerado la siguiente situación. El siguiente proyecto consta de un aula universitaria de 8.5 X 7 X 3.1 metros (X, Y, Z). Dentro de ella, se encuentran 9 alumnos en 3 filas de 3 alumnos, separados entre ellos 1.5 metros, distancia reglamentaria para el no contagio de enfermedades por vía aérea, como demostró Chillón et al., (2021) en su estudio matemático. En el principio del aula, se encuentra colocado el profesor, separado de la primera fila de alumnos a 1.5 metros de distancia. La altura del profesor y de los alumnos es de 1.76 y 1.45 metros, respectivamente. En la Figura 4 se observa la geometría descrita anteriormente. El dominio computacional se encuentra a una temperatura interior de 21 °C y consta de una humedad relativa de 42% a una presión atmosférica.



Figura 4. Geometría del dominio computacional. Medidas; X = 8.5 metros, Y = 7 metros y Z = 3.1 metros. El aula se mantiene a una temperatura de 21 °C y una humedad relativa del 42 % a presión atmosférica constante. **Fuente:** **Elaboración propia.**

La situación a simular será, una clase donde el profesor da la lección. Para ello, la boca del profesor será un inyector con forma de cono con una inclinación de 15°, donde expelerá al ambiente aerosoles producidos por el flujo del habla. En este caso, el alumno contagiado estará situado en la segunda fila a la derecha. Este estornudará, simulado por un inyector con forma de cono con 45° de inclinación, geometría más aproximada a la forma que toma la boca cuando un humano estornuda, según Dbouk & Drikakis, (2020) , expulsando su saliva contaminada. La velocidad del estornudo toma una curva sinusoidal y tendrá una duración de 450 milisegundos, tomada de los resultados experimentales de Busco, Yang, Seo, & Hassan, (2020). En la Figura 5 se observa la curva sinusoidal que toma la velocidad del estornudo llegando a un valor máximo de 70 m/s. Los resultados de Han, Weng, & Huang, (2013) muestran que el diámetro de las partículas en el flujo expulsado por el estornudo siguen una distribución log-normal con una derivación estándar de 1.5. La Figura 6 muestra la distribución que sigue, con un rango de 0 a 1000 μm donde el valor medio se coloca en un diámetro de 360.1 μm .

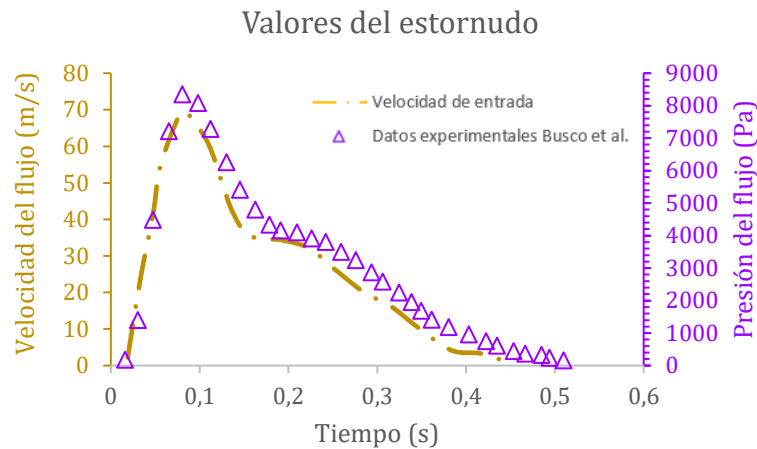


Figura 5. Gráfico sinusoidal que sigue el flujo del estornudo. Datos experimentales del proyecto de Busco et al., (2020) con un valor máximo de 70 m/s. **Fuente: Elaboración propia.**

Por contrario, el habla tendrá una velocidad constante de 4 m/s durante toda la simulación, de acuerdo con el estudio de Gupta, Lin, & Chen, (2010) que entiende que el habla sigue una forma irregular, pero se le puede asimilar a un flujo continuo. Al igual que el flujo del estornudo, los resultados experimentales del proyecto de Chao et al., (2009) demuestran que el habla se asimilar a una distribución log-normal pero esta vez, con un rango de 0 a 600 μm y un valor medio de partícula de 16 μm . La masa generada en el flujo del habla y en el estornudo es de 0.33 mg y 6.7 mg, respectivamente, aunque, igual que en la velocidad del estornudo, la masa generada también sigue una función sinusoidal. Tal y como muestra el estudio experimental de Zhu, Kato, & Yang, (2006) la masa media que un humano expulsa en cada estornudo toma un valor de 6.7 mg de saliva. En la Figura 7 se muestra la gráfica que presenta el flujo del estornudo humano.

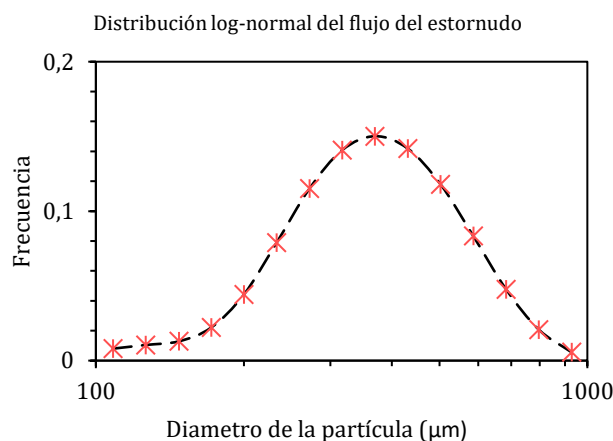


Figura 6. Distribución log-normal del flujo del estornudo. El rango del diámetro de partícula toma valores de 0 a 1000 μm con un valor medio de 360,1 μm con una desviación estándar del 1.5. **Fuente: Elaboración propia.**

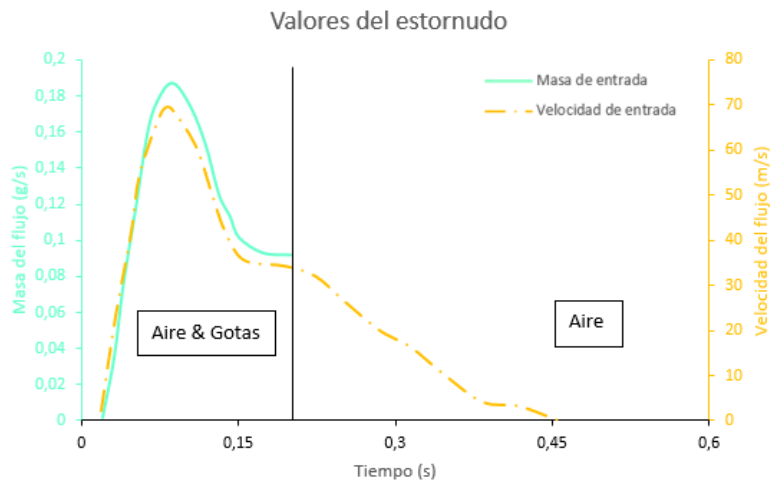


Figura 7. Gráfico sinusoidal que sigue el flujo del estornudo. Valores del flujo para simular la acción de un estornudo. **Fuente: Elaboración propia.**

Tanto los aerosoles contaminados como el habla producida por el profesor, estarán a una temperatura de 36 °C, temperatura media a la que se encuentra el cuerpo humano en una situación normal. El estudio matemático de Ugarte-Anero et al., (2021) incluyó en su trabajo publicado en la revista "Mathematics" de cuartil Q1 la anterior afirmación. La temperatura de los aerosoles comienza a disminuir a medida que vayan tomando la atmosfera interior, (Redrow, Mao, Celik, Posada, & Feng, 2011). Aunque la saliva este compuesta por infinitos elementos, en este proyecto se ha querido hacer una simplificación. Para ello, se analiza el fluido expulsado como una solución salina fisiológica, aproximadamente 0,9 % w/v, validado en el estudio de Xie et al., (2006). En la Figura 8 se muestra en detalle qué alumno esta contagiado y los inyectores tanto del profesor como del alumno.

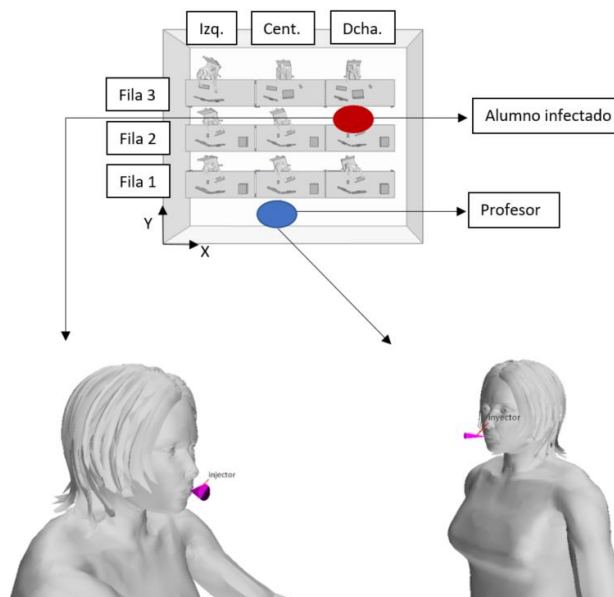


Figura 8. Inyectores para simular el flujo del habla y del estornudo. Geometría del aula vista desde arriba donde se especifica el alumno infectado y el profesor. **Fuente: Elaboración propia.**

Para un segundo escenario, queriendo implementar en él una ventilación natural, se ha añadido al caso anteriormente explicado tres ventanas en la parte trasera del aula de a una altura del suelo de 1 metros, con una anchura de 2 metros y una longitud de 2.3 metros. La separación entre ellas es de 0.5 metros. Por contrario, en el principio de la clase, a ambos extremos, se han colocado dos puertas, de 2 metros de alto y 1 metro de ancho. En la Figura 9 se puede ver esta nueva geometría simulando un aula con ventilación natural. El aire entrará por las ventanas a una velocidad de 2.7 m/s, velocidad que toma una brisa suave, (Ugarte-Anero et al., 2021) y constará de una temperatura externa de 17 °C y humedad relativa del 80% con una presión atmosférica.

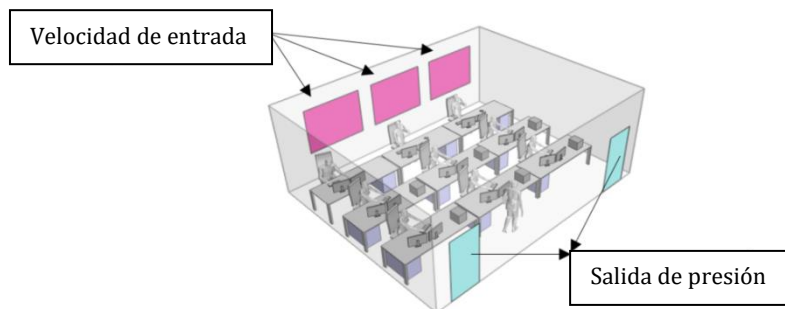


Figura 9. Geometría del aula implementando puertas y ventanas. Las ventanas actúan de entrada de aire limpio y por las puertas sale el aire contaminado del aula. **Fuente: Elaboración propia.**

Queriendo ver la eficacia que tiene la ventilación mecánica, a la situación del primer caso se le ha instalado un sistema de ventilación mecánica. Este sistema de ventilación constará de dos conductos. Cada uno de ellos, tendrá cuatro rendijas de 0.05 m² con una tasa de renovación de aire de 6 (ACH). Según la norma americana ASHRAE 62.1 para aulas, con 6 de renovaciones de aire se llega a un nivel excelente de ventilación. Por el contrario, constan de una tapa de 1.6 m² que absorbe el aire contaminado, a una presión ambiente, (Foster & Kinzel, 2021). En la Figura 10 se muestra un esquema de la geometría que toma esta nueva situación.

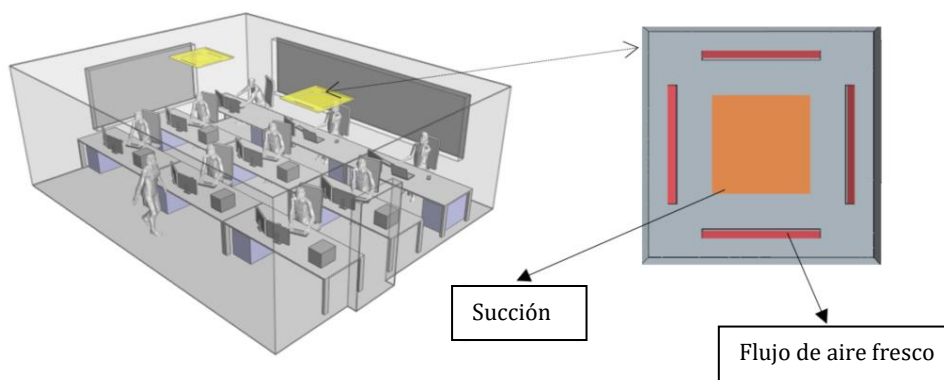


Figura 10. Geometría del aula implementado la ventilación mecánica. Dos conductos formados por cuatro espacios que renuevan el aire interior a un flujo de 0.31 m³/s y un conducto que se encarga de succionar el aire contaminado creado por los humanos habitando el aula. **Fuente: Elaboración propia.**

Un mallado cúbico ha sido el utilizado para poder hacer la discretización del dominio de esta geometría. Se han creado tres volúmenes de control, sumando por ello un total de 10.5^6 (10.513.886) celdas. Como se aprecia en la Figura 11, los volúmenes de control creados han ido de más a menos en detalle, esto es debido a que se necesita más presión entorno a la boca.

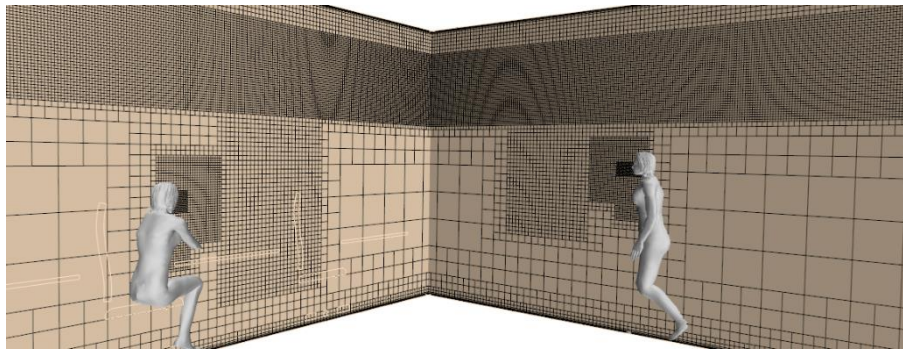


Figura 11. Mallado cúbico creado para la discretización del modelo a estudiar, compuesto por 10.5^6 celdas. **Fuente:** Elaboración propia.

Configuración numérica

El código comercial CFD Star-CCM+ ha sido el utilizado para definir y dar solución al problema numérico que tiene por objetivo estudiar el comportamiento de los aerosoles. Compuesta de dos fases, los casos que constan de ventilación, ya sea natural o mecánica, la fase Eulariana llega a la estabilidad una vez que el aire comienza a renovarse. El aire interior que recorre el aula, así como la brisa que entra por las ventanas, se considera un flujo bifásico, compuesto por aire seco y vapor de agua. Especies no reactivas con las mismas propiedades de velocidad, presión y temperatura. Propiedades como la densidad y la viscosidad son los parámetros que diferencian a estas dos especies, entre otras, valores numéricos sacados del Anexo del estudio de Kukkonen, Vesala, & Kulmala, (1989). Para calcular la unión de las dos especies circulantes en el denominado aire el estudio matemático de Busco et al., (2020) integra la Ecuación 1 para calcular la unión de estas, basado en el método de mezcla ponderada en masa.

$$\varphi_{mix} = \sum_{i=1}^{N=2} \varphi_i Y_i \quad (1)$$

donde N se refiere al número de componentes que existen en la mezcla. φ_i es el valor de la propiedad a determinar del componente de la mezcla y Y_i es la fracción de masa del aire seco y el vapor de agua.

Las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS) promediadas por Reynolds con el modelo de turbulencia k- ω Shear Stress Transport (SST), desarrollado por Menter, (1994) se han introducido en este trabajo. Se empleó el algoritmo UpWind para el acoplamiento presión-velocidad y se utilizó un esquema lineal de segundo orden contra el viento para discretizar la malla. Las Ecuaciones 2 y 3 muestran la fórmula de transporte para la energía cinética y la ratio de disipación.



$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \bar{v}) = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k] + P_k - \rho \beta^* f_{\beta^*} (\omega k - \omega_0 k_0) + S_k \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \nabla \cdot (\rho \omega \bar{v}) = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \nabla \omega] + P_\omega - \rho \beta^* f_{\beta^*} (\omega^2 - \omega_0^2) + S_\omega \quad (3)$$

donde σ_k , y σ_ω , P_k y P_ω se definen como TP (Términos de Producción), en cambio, S_k y S_ω son los términos fuente especificados por el usuario. K_0 y ω_0 son los valores de turbulencia ambiental que contrarrestan la desintegración de la turbulencia. Por otro lado, \bar{v} es la velocidad media, μ es la viscosidad dinámica y f_{β^*} es el factor de modificación de cizalla libre.

La mecánica de fluidos se rige por las leyes de conservación de la masa, Ecuación 4, ley del momento lineal, Ecuación 5, y ley de la energía, Ecuación 6.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \otimes v) = \nabla \cdot (pI) + \nabla \cdot T + f_b \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E v) = f_b \cdot v + \nabla \cdot (v \cdot \sigma) - \nabla \cdot q + S_E \quad (6)$$

donde ρ es la densidad y v es la velocidad continua, definiendo por tanto la ecuación de la conservación de la masa. f_b es el resultado de las fuerzas del cuerpo por unidad de volumen que actúa sobre el continuo, σ es el tensor de tensión, p es la presión, T es el tensor viscoso. Por último, E es la energía total por unidad de masa, q es el flujo de calor y S_E es una fuente de energía por unidad de volumen.

Por otra parte, la fase Lagrangiana, da solución al flujo simulado para el habla y el estornudo. Compuesto de gotitas líquidas esféricas de solución salina fisiológica con una energía que sigue la correlación de Ranz-Marshall. Sometidas a dos fuerzas principales, como es la fuerza de gravedad y la fuerza drag, fórmula que sigue la Ecuación 7.

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho A_p |v_s| v_s \quad (7)$$

donde C_d es el coeficiente de arrastre de la gota que sigue el modelo de Schiller-Naumann, A_p es el área de la gota y v_s es la velocidad de deslizamiento de la gota.

Una vez que las gotas se expelen al aire e interactúan con el medio, las partículas, bajo los efectos de las fuerzas superficiales, comienzan a distorsionarse y a romperse. El modelo de ruptura por analogía de Taylor (TAB) se incluyó en este trabajo para poder tener en cuenta el comportamiento que presentan las partículas. Otro de los fenómenos que comienza a tener efecto sobre las partículas es el efecto de la evaporación, debido a la diferencia de temperatura entre las gotitas y el medio ambiente. El modelo cuasi-estable se ha implementado en el proyecto para dar solución a este fenómeno. Este



modelo consiste en que las gotas pierdan masa, determinado por el número de Sherwood. La Ecuación 8 expresa la tasa de cambio de la masa de gotas debido a la evaporación.

$$\dot{m}_p = g^* \times A_s \ln(1 + B) \quad (8)$$

donde B es el número de transferencia de Spalding, g^* es la conductancia de transferencia de masa y A_s es la superficie de la gota. La presión de saturación afecta considerablemente al efecto de la evaporación. Esta presión, al tratarse de gotas compuestas por una solución salina, se calcula atendiendo a la Ecuación 9, también llamada ley de Raoult, Xie et al., (2006).

$$P_{va,s} = X_d P_{va}(T_w) \quad (9)$$

donde $P_{va,s}$ es la presión de saturación de la gota en la mezcla salina, P_{va} es la presión de equilibrio del agua a una temperatura específica marcada por la Ecuación de Antoine y X_d es la fracción molar de la gota, véase la Ecuación 10.

$$X_d = \left(1 + \frac{6im_s M_w}{\pi \rho_L M_s (d_p)^3} \right)^{-1} \quad (10)$$

donde M_w y M_s son el peso molecular de agua y de soluto (NaCl), respectivamente; m_s la masa de soluto en la gota; d_p el diámetro de la gota, y el factor iónico "i" es igual a 2.

VALIDACIÓN

Un modelo numérico como el que se presenta en el siguiente trabajo tiende a tener un modelo experimental que valide los resultados obtenidos. Como este estudio se centra en el destino y recorrido que hacen los aerosoles debido a las corrientes que se puedan generar por la ventilación, los parámetros a validar son el recorrido y el diámetro de la gotita. A tal efecto, se han utilizado datos experimentales para dar credibilidad a este nuevo proyecto por crear. Los datos experimentales han sido cogidos de los estudios de Hamey, (1982) y Spillman, (1984). Los trabajos numéricos de Ugarte-Anero et al., (2022), Busco et al., (2020) y Xie et al., (2006) también utilizan este método para validar sus trabajos. El estudio de Hamey, (1982) consiste en dos gotitas de agua pura de 110 μm y 115 μm de diámetro con una temperatura de 16°C. Estas dos gotitas se introducen en un ambiente con un 70% de humedad relativa y una temperatura de 20°C y se dejan caer libremente controlando como disminuye su diámetro a medida que estas avanzan. En la Figura 12 se puede ver el resultado obtenido.

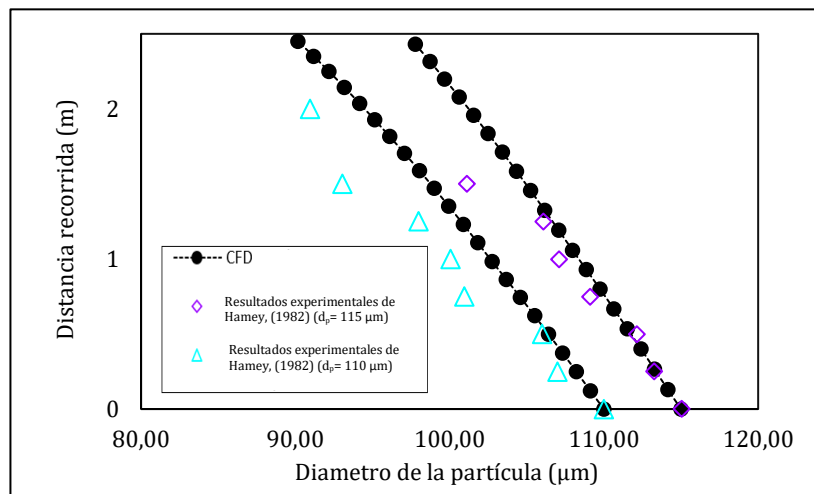


Figura 12. Destino de gotas de agua. Estudio experimental de Hamey, (1982) que consta de dos gotitas de agua puras introducidas en un ambiente de 70 % de humedad relativa a una temperatura de 20°C y se dejan caer libremente por un espacio para observar la distancia que recorren a medida que se van evaporando. Las gotitas tienen un diámetro de 110 µm y 115 µm y tienen una temperatura de 16°C. **Fuente: Elaboración propia.**

Del mismo modo, el estudio de Spillman, (1984) consiste en lo mismo, pero variando los parámetros. En este caso el diámetro de la gota es de 170 µm a una temperatura de 25°C en un ambiente con características de RH=68% y $T_{ext}=31^{\circ}\text{C}$. En la Figura 13 se ve los datos conseguidos.

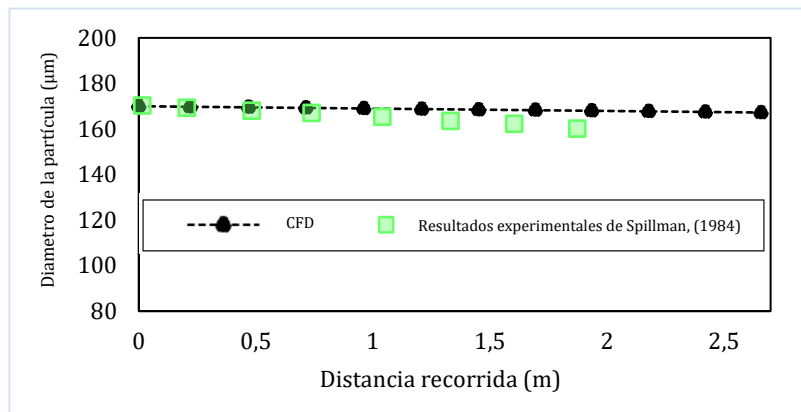


Figura 13. Destino de gotas de agua. Estudio experimental de Spillman, (1984) que consta de una gotita de agua pura introducida en un ambiente de 68 % de humedad relativa a una temperatura de 31°C y se deja caer libremente por un espacio para observar la distancia que recorre a medida que se va evaporando. La gota tiene un diámetro de 170 µm y una temperatura de 25°C. **Fuente: Elaboración propia.**

RESULTADOS

Los resultados obtenidos se muestran en los siguientes puntos:



a. Recorrido de los aerosoles en los diferentes escenarios

La influencia de los sistemas de ventilación sobre los aerosoles ha sido estudiada en este apartado. Para ello, en las imágenes, se puede observar el recorrido de los aerosoles exhalados al ambiente por el profesor, mediante el habla, y por el alumno, a través de un estornudo contaminado, en tres situaciones diferentes: sin ventilación, con ventilación natural y con ventilación mecánica. La saliva generada y expulsada al ambiente, ya sea por el habla o por el estornudo, tiene las mismas características, y está modelada como una solución salina. La única diferencia que se encuentra en ella es que los aerosoles generados por el alumno están contaminados por el virus. Los resultados demuestran, en las tres situaciones, que las partículas con mayor tamaño caen al suelo mientras que los aerosoles inferiores a $20\ \mu\text{m}$ se esparcen por el entorno del aula. En cambio, las partículas mayores de $500\ \mu\text{m}$ recorren el aula en la dirección del estornudo hasta chocar la pared, en menos de 1 segundo. La Figura 14 muestra el recorrido de los aerosoles en un aula sin ventilación, el alumno colocado una fila más adelante que el alumno contagiado es el más afectado por ellos. En el segundo 0,5 los aerosoles impregnan al alumno de la primera fila. Prácticamente, para el segundo 4 todos los aerosoles han caído al suelo. Las partículas generadas en el habla caen verticalmente sin ningún movimiento externo. Consecuentemente, cuando la ventilación utilizada es de manera natural, el alumno colocado enfrente del alumno contagiado es el más afectado. En este caso las partículas llegan a chocar con la pared en el segundo 0,5, por lo que se ve que el alumno colocado en primera fila también las recibe. Después del segundo 2 apenas hay cambio en la escena, ya que para el segundo 1 todas las partículas se han depositado en la mesa del alumno de la primera fila, como se puede ver en la Figura 15. Los aerosoles generados por el habla toman dirección contraria a la que se arrojan al entorno, hasta tocar con el techo. Las partículas con diámetro mayor a $500\ \mu\text{m}$ se depositan debajo de la mesa del alumno de primera fila, y a medida que pasa el tiempo su diámetro va disminuyendo.

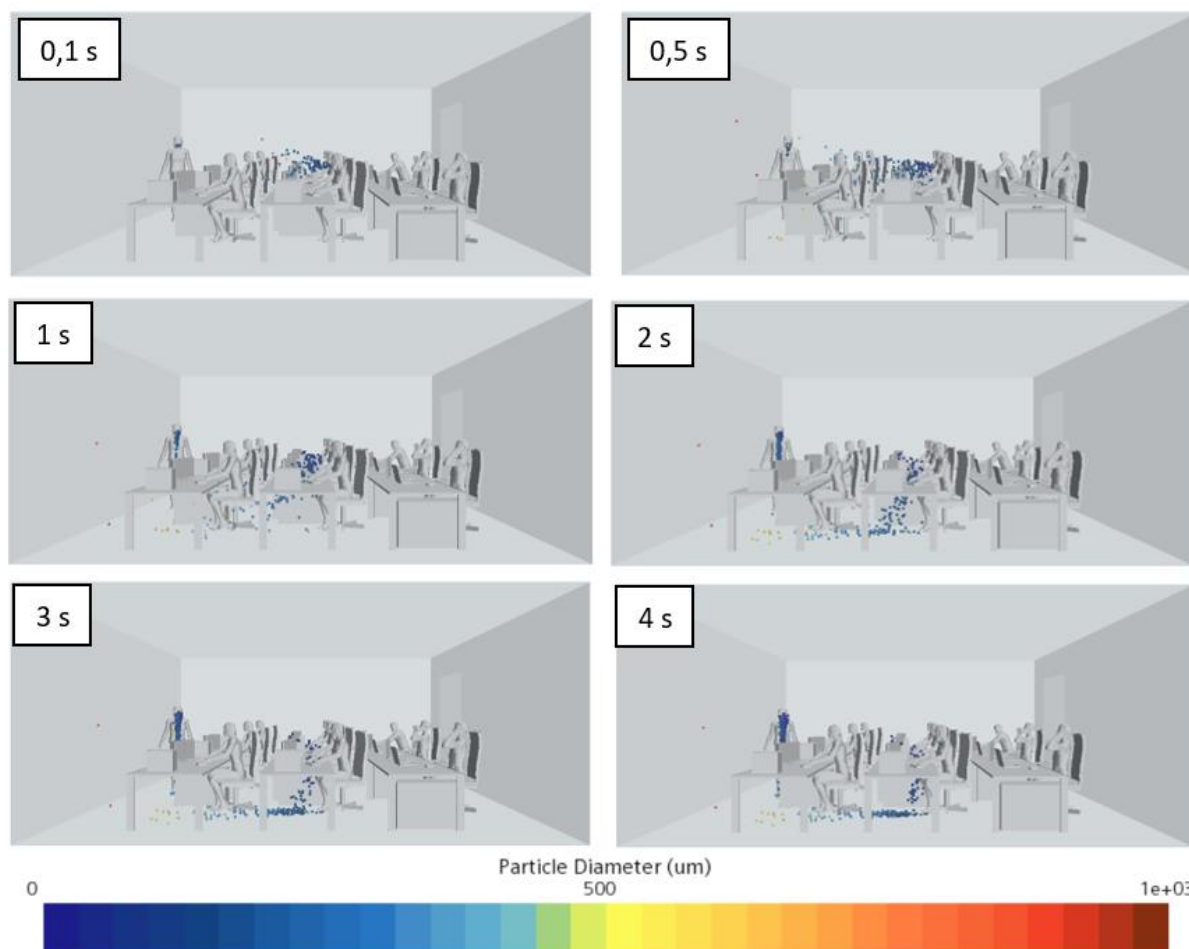


Figura 14. Recorrido y destino de los aerosoles generados en el aula sin ventilación. El alumno colocado en la primera fila a la derecha es el más afectado. Las partículas con mayor tamaño caen rápidamente al suelo. **Fuente: Elaboración propia.**

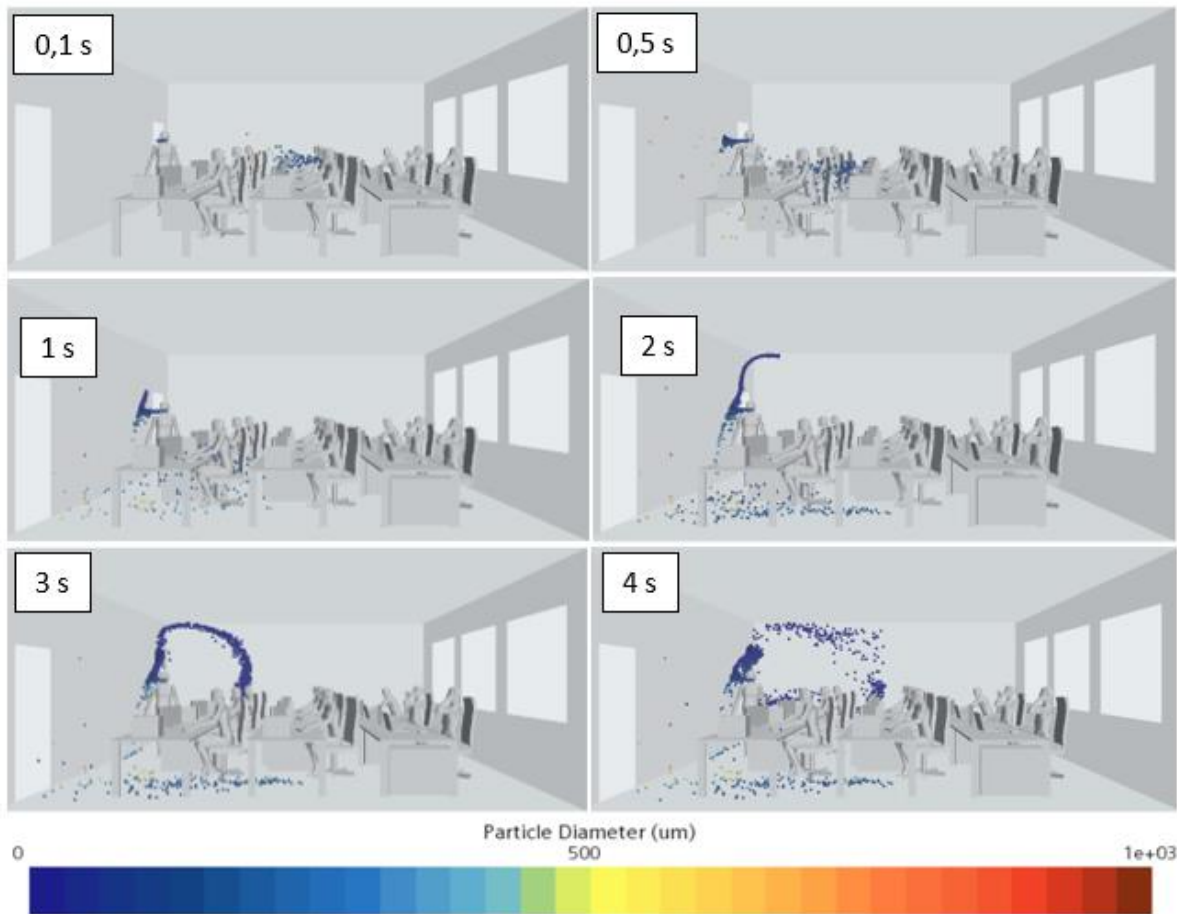


Figura 15. Recorrido y destino de los aerosoles generados en el aula con ventilación natural. El alumno colocado en la primera fila a la derecha es el más afectado. Las partículas con mayor tamaño caen rápidamente al suelo. Los aerosoles generados por el habla del profesor toman sentido opuesto al que se vierten. **Fuente: Elaboración propia.**

Por último, en la Figura 16, se ofrece el recorrido de los aerosoles cuando la habitación está sometida a una ventilación mecánica. Los aerosoles toman diferentes recorridos. Las partículas contaminadas con mayor tamaño de diámetro caen sobre la mesa del alumno que estornuda. Desde el segundo 0,1 hasta el segundo 0,5 es el intervalo de tiempo donde más expuesto se encuentra el alumno de primera fila. A partir del segundo 3 los aerosoles de diámetro menor a $15 \mu\text{m}$, por la presión que ejerce la ventilación mecánica ascienden hacia el conducto, succionándolos. Los aerosoles expulsados por el habla del profesor, igual que en la situación de sin ventilación, caen verticalmente sin ningún movimiento fuera de lo normal.

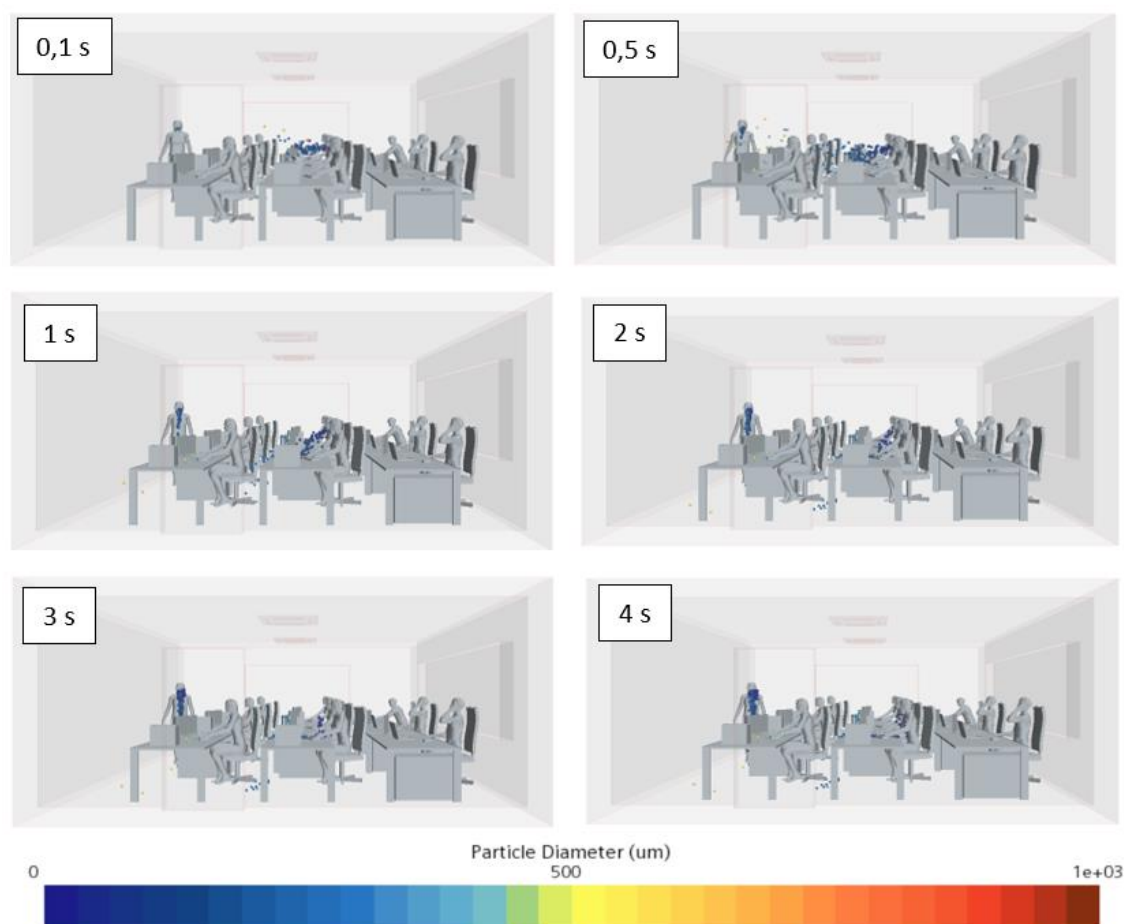


Figura 16. Recorrido y destino de los aerosoles generados en el aula con ventilación mecánica. El alumno colocado en la primera fila a la derecha es el más afectado. Las partículas con mayor tamaño caen rápidamente en la mesa del alumno infectado, debido a la presión de entrada de aire generada por el conducto de ventilación. **Fuente: Elaboración propia.**

b. Masa de aerosoles acumulada en los diferentes escenarios

La carga vírica que la persona contagiada genera es un parámetro de gran importancia a controlar por los médicos para poder prevenir el contagio de una manera más fácil. Los programas de CFD tienen la limitación de no poder dar resultados en relación con este parámetro. No obstante, se analiza que cantidad de aerosoles consta de una masa específica en cada intervalo de tiempo acumulado en el aula en los tres escenarios presentados en dicho proyecto. La Figura 17, la Figura 18 y la Figura 19 muestran los gráficos creados para estudiar la masa de las partículas en el aula sin ventilación, con ventilación natural y con ventilación mecánica, respectivamente, durante 3.5 segundos. Para analizar estos datos, se ha optado por analizar el segundo 0.5, ya que es cuando el estornudo se ha completado y se observa que es el instante de tiempo donde el aula consta de más gotitas. En el segundo 0,5, en el aula sin ventilación existen alrededor de 9 millones de gotitas con una masa de 0.0025 mg, las otras masas son casi despreciables debido a que solo existen 100 gotitas con esa masa específica. La mayor

masa que se obtiene es de 0.4 mg. La situación en el habitáculo con ventilación natural es aproximadamente similar a la descrita anteriormente. Donde se obtiene una diferencia clara es en la ventilación mecánica, existen 5,5 millones de partículas dispersas en el aire con una masa de 0.0028 mg. Igual que en los otros casos, las demás masas las conforman una cantidad despreciable de partículas. En este escenario, las partículas con mayor masa alcanzan los 0.45 mg. En los tres casos se puede apreciar cómo, gracias al fenómeno de la evaporación, a medida que avanza el tiempo las partículas de masa inferior aumentan.

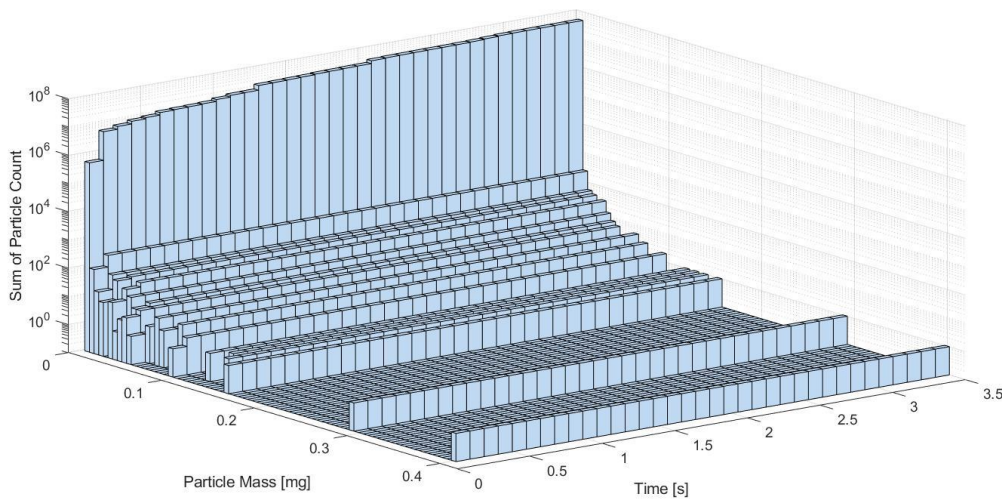


Figura 17. Cantidad de aerosoles con una masa específica en cada intervalo de tiempo en un aula sin ventilación. La mayoría de partículas tienen una masa de 0.0025 mg durante los 4 segundos analizados. **Fuente: Elaboración propia.**

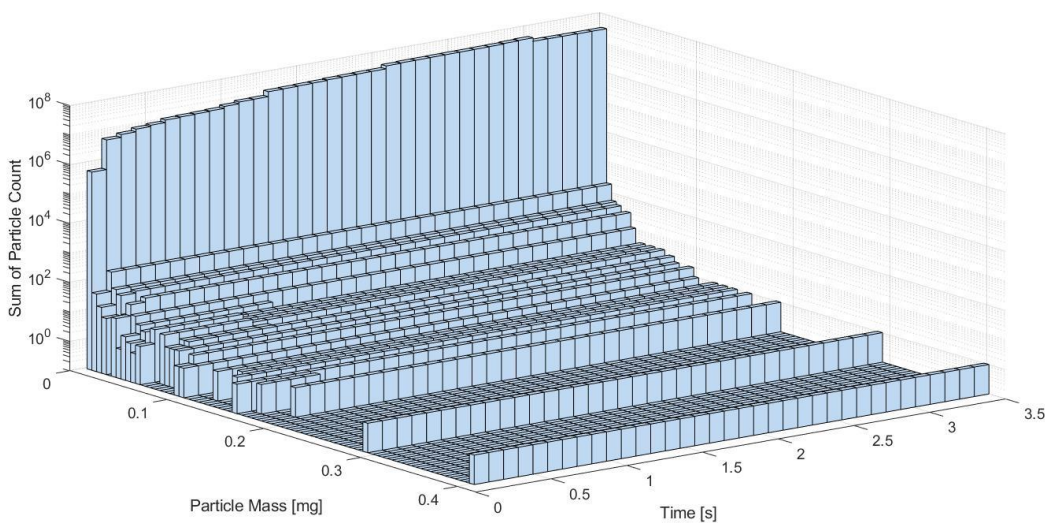


Figura 18. Cantidad de aerosoles con una masa específica en cada intervalo de tiempo en un aula con ventilación natural. La mayoría de partículas tienen una masa de 0.0025 mg durante los 4 segundos analizados. **Fuente: Elaboración propia.**

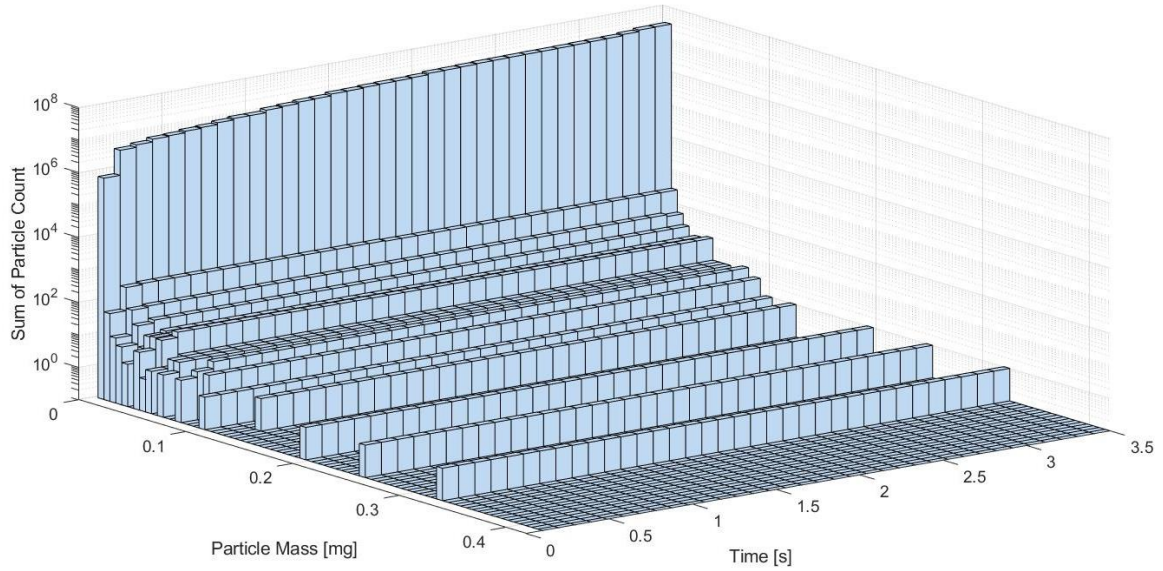


Figura 19. Cantidad de aerosoles con una masa específica en cada intervalo de tiempo en un aula con ventilación mecánica. La mayoría de partículas tienen una masa de 0.0028 mg durante los 4 segundos analizados. **Fuente:** **Elaboración propia.**



c. Pérdidas de energía

La transferencia de calor a través de una pared plana se puede considerar como unidimensional, (Cengel & Ghajar, 2007). Para calcular las pérdidas de energía generadas en estos casos se utilizan la Ley de Fourier para la conducción y la Ley de Newton del enfriamiento para la convección, mostradas en las Ecuaciones 11 y 12, respectivamente.

$$Q_{conducción} = A \times \frac{T_{alta} - T_{baja}}{dX} \times \lambda \quad (11)$$

$$Q_{convección} = A \times (T_{alta} - T_{baja}) \times h \quad (12)$$

donde λ es la conductividad térmica del material, A es el área perpendicular a la transferencia de calor (m^2), dX es el espesor del material (m) y h es el coeficiente de transferencia de calor por convección. T_{alta} se refiere a la temperatura interior y T_{baja} a la temperatura exterior, en este caso.

Los datos a tener en cuenta para poder resolver el siguiente problema que se plantea son los siguientes; El área total de las ventanas que componen el aula es de $13,8 m^2$ y está formada por 2 cristales de 8 mm de espesor, separados por 2 centímetros de distancia. La conductividad térmica del vidrio es de $0.81 W/mK$ y la del aire de $0.026 W/mK$. El coeficiente de transferencia de calor por convección entre cristales toma el valor de $4 W/m^2K$ y el del exterior $15 W/m^2K$. La temperatura dentro de la habitación es de $21^{\circ}C$ y la exterior de $17^{\circ}C$, en cambio, cuando existe ventilación mecánica la temperatura interior desciende a $19^{\circ}C$. Teniendo todo esto en cuenta, a continuación, se muestran los resultados obtenidos:

- $Q_1 = 38.8 W$
- $Q_2 = 19.4 W$
- $Q_3 = 828 W$

Podemos observar como el escenario con ventilación natural es la que más pérdidas de energía se obtienen, seguido del de sin ventilación.



PRESUPUESTO

En la siguiente sección, se especifican los costos asociados con la preparación de un proyecto de este tipo. Se ha visto que se trata de investigación de dinámica de fluidos computacional que requiere de licencia de software y el trabajo del investigador. Por consiguiente, los costes se dividirán de la siguiente manera:

Desarrollo del presupuesto

Mano de obra

La Tabla 2 muestra las horas empleadas por el investigador. Se diferencian tres grandes grupos; investigación previa, que acapara la definición del problema, la revisión bibliográfica y el diseño conceptual de las mediciones a realizar; el modelado de estudio, mallado, simulación y representación gráfica de las situaciones consideradas; corrección de posibles fallos e informe final y conclusiones. A continuación, se definen las tareas mencionadas anteriormente:

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA. Mediante esta tarea se pretende adquirir un conocimiento profundo en cuanto a las tendencias en el estado del arte. Se trata de obtener información acerca de las líneas de actuación vigentes y analizar e investigar la información disponible de modo que se puedan lograr los mejores resultados posibles.

DISEÑO CONCEPTUAL DE LAS MEDICIONES A REALIZAR. Obtención de los datos de tamaño de partículas en suspensión, temperatura del aire, humedad relativa y partículas exhaladas al ambiente tras un estornudo. Así como información de los diferentes sistemas de ventilación mecánica disponibles en el mercado.

MALLADO: Diseño del mallado del dominio. Mallado preciso para poder analizar de manera exacta lo que ocurre en cada punto de la geometría.

SIMULACIÓN: En este apartado entra el diseño de la geometría, las condiciones físicas, tanto con un modelo “*steady*” como con un modelo “*unsteady*” tras incluir la fase lagrangiana. Colocación de los inyectores y sus características principales. Incluye la implementación de la función de humedad relativa.

REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS SITUACIONES CONSIDERADAS: Una vez finalizada la simulación, la creación de diversos gráficos y de imágenes representativas entrarían dentro de esta tarea.



CORRECCIÓN DE POSIBLES FALLOS: Analizados los datos, si por parte del investigador se percataría de alguna anomalía las tareas “SIMULACIÓN” y “REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS SITUACIONES GENERADAS” tendrían que volverse a realizar.

INFORME FINAL Y CONCLUSIONES. Al finalizar esta última tarea, el equipo que compone este proyecto, se compromete a realizar un informe final las principales actividades desarrolladas durante el periodo en que consiste el proyecto, así como las conclusiones finales.

| Tipo de trabajo | Tiempo (h) | Coste unitario (€/h) | Coste total (€) |
|----------------------|------------|----------------------|-----------------|
| Investigación previa | 150 | 8 | 1200 |
| Modelado | 350 | 10 | 3500 |
| Corrección | 50 | 8 | 400 |
| Informe final | 30 | 8 | 240 |
| Subtotal | - | - | 5340 |

Tabla 2. Costes de mano de obra.

Licencia de software

A continuación, se presentan, en la Tabla 3, los costos generados por la licencia del software utilizado durante el desarrollo del estudio. Como se ha mencionado anteriormente, en este trabajo, se utilizó el código comercial CFD Siemens STAR CCM+ versión 16.02 (2021) (Siemens, Londres, Reino Unido). Para ejecutar todas las simulaciones se utilizó un servidor personal en clúster paralelo con Intel Xeon © E5-2609 v2 CPU @ 2.5 GHz (16 núcleos) y 45 GB de RAM. La geometría y el mallado también se realizó con este programa.

| Software | Cantidad (Cores) | Coste unitario (€/Core) | Coste total (€) |
|-------------------|------------------|-------------------------|-----------------|
| Siemens STAR-CCM+ | 16 | 120 | 1920 |

Tabla 3. Costes de la licencia de software.

Presupuesto final

Por último, se muestra en la Tabla 4 el presupuesto final del proyecto. Como se observa, el coste total de este proyecto asciende a un valor de 7260 €.

| Tipo de coste | Coste total (€) |
|----------------------|-----------------|
| Mano de obra | 5340 |
| Licencia de software | 1920 |
| Total | 7260 |

Tabla 4. Costes totales.



CONCLUSIONES

En este trabajo, se presentó un modelo numérico de CFD basado en técnicas Eulerianas-Lagrangianas para analizar la eficiencia de los diferentes sistemas de ventilación para un control eficiente de aerosoles. El aula, compuesta por 9 alumnos y un profesor, se encuentra a una temperatura de 21°C y una humedad relativa del 41%. Se obtiene como resultado principal, que el escenario que mejor protege a las personas no contagiadas de un estornudo contaminado es el aula que se encuentra con una instalación de ventilación mecánica. Las partículas exhaladas al ambiente toman diferentes recorridos, pero la mayoría se arrojan sobre la mesa del estudiante contagiado, impidiendo por ello el recorrido por el aula. Esto es debido al aire externo que se inyecta en el aula desde el techo. Con la ventilación natural, las partículas tienden a coger más velocidad debido al aire externo entrante por las ventanas, ayudando por ello a una mayor exposición de las partículas en el entorno. El estudio numérico de Ugarte-Anero et al., (2021) demuestra como afecta la velocidad del viento en la distancia de seguridad. Aunque en ese artículo publicado en la revista *“Mathematics”* se discute la efectividad de las máscaras protectoras, se puede llegar a observar como una masa de aire externa tiene gran influencia en las partículas flotantes del entorno. Como consecuencia de una menor temperatura, aunque la humedad relativa se mantenga constante, en el aula debido a la inyección del aire de ventilación mecánica, la masa que se acumula en el habitáculo es mayor cuando la ventilación es mecánica. El proceso de evaporación de las gotitas inyectadas en el ambiente se realiza a un tiempo menor. La investigación realizada por Ugarte-Anero et al., (2022) observa de que trata este proceso de evaporación, es por ello, que se confirma que en el escenario con menor temperatura la masa de las gotitas es mayor, tal y como se explica en la revista *“Nature”* que incluye este artículo. Los datos demuestran que tanto en el escenario sin ventilación y con ventilación natural la masa acumulada es similar en los cuatro segundos simulados en este proyecto, por lo que la gran diferencia que se obtiene en estos dos escenarios es el recorrido y destino de los aerosoles.

Consecuentemente, a la hora de analizar las pérdidas de energía en el aula, el escenario con ventilación mecánica es el que menos pérdidas obtiene debido a que la diferencia de temperatura entre el aula y el exterior es menor. En el caso de la ventilación natural, las pérdidas de energía generadas son elevadas en comparación con los otros dos casos. Por lo tanto, observando los resultados de este trabajo, se puede concluir que la ventilación mecánica es una buena medida a la hora de llevar un control de los aerosoles en los espacios cerrados, en comparación con un aula sin ventilar o con una ventilación natural.



BIBLIOGRAFÍA

- Abbas, G. M., & Dino, I. G. (2021). The impact of natural ventilation on airborne biocontaminants: A study on COVID-19 dispersion in an open office. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 29(4), 1609-1641.
- Abbas, G. M., & Gursel Dino, I. (2022). COVID-19 dispersion in naturally-ventilated classrooms: A study on inlet-outlet characteristics. *Journal of Building Performance Simulation*, 15(5), 656-677. <https://doi.org/10.1080/19401493.2022.2063946>
- Abouleish, M. Z. (2021). Indoor air quality and COVID-19. *Public Health*, 191, 1. doi: 10.1016/j.puhe.2020.04.047.
- Agarwal, N., Meena, C. S., Raj, B. P., Saini, L., Kumar, A., Gopalakrishnan, N., et al. (2021). Indoor air quality improvement in COVID-19 pandemic: Review. *Sustainable Cities and Society*, 70, 102942. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102942>
- Bhagat, R. K., Davies Wykes, M. S., Dalziel, S. B., & Linden, P. F. (2020). Effects of ventilation on the indoor spread of COVID-19. *Journal of Fluid Mechanics*, 903, F1. doi:10.1017/jfm.2020.720
- Busco, G., Yang, R., Seo, J., & Hassan, Y. A. (2020). Sneezing and asymptomatic virus transmission. *Physics of Fluids* 32, 073309. <https://doi.org/10.1063/5.0019090>
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2007). *Transferencia de calor y masa* McGraw-Hill Interamericana.
- Chao, C. Y. H., Wan, M. P., Morawska, L., Johnson, G. R., Ristovski, Z. D., Hargreaves, M., et al. (2009). Characterization of expiration air jets and droplet size distributions immediately at the mouth opening. *Journal of Aerosol Science*, 40(2), 122-133. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2008.10.003>
- Chillón, S. A., Ugarte-Anero, A., Aramendia, I., Fernandez-Gamiz, U., & Zulueta, E. (2021). Numerical modeling of the spread of cough saliva droplets in a calm confined space. *Mathematics*, 9(5), 574. <https://doi.org/10.3390/math9050574>
- Dbouk, T., & Drikakis, D. (2020). On coughing and airborne droplet transmission to humans. *Physics of Fluids (1994)*, 32(5), 53310-053310. doi:10.1063/5.0011960



- El Mundo. (2016). *El 99% de las viviendas españolas sufre pérdidas de calor innecesarias*. <https://www.elmundo.es/economia/2016/01/20/569f66c8ca47412d618b45dc.html>
- Foster, A., & Kinzel, M. (2021). Estimating COVID-19 exposure in a classroom setting: A comparison between mathematical and numerical models. *Physics of Fluids*, 33(2), 021904. <https://doi.org/10.1063/5.0040755>
- Gupta, J. K., Lin, C., & Chen, Q. (2010). Characterizing exhaled airflow from breathing and talking. *Indoor Air*, 20(1), 31-39. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2009.00623.x>
- Hamey, P. Y. (1982). The evaporation of airborne droplets. (Grainfield Institute of Technology), 48-58.
- Han, Z. Y., Weng, W. G., & Huang, Q. Y. (2013). Characterizations of particle size distribution of the droplets exhaled by sneeze. *Journal of the Royal Society Interface*, 10(88), 20130560. <https://doi.org/10.1098/rsif.2013.0560>
- Ho, C. K. (2021). Modelling airborne transmission and ventilation impacts of a COVID-19 outbreak in a restaurant in guangzhou, china. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 35(9), 708-726. <https://doi.org/10.1080/10618562.2021.1910678>
- Kukkonen, J., Vesala, T., & Kulmala, M. (1989). The interdependence of evaporation and settling for airborne freely falling droplets. *Journal of Aerosol Science*, 20(7), 749-763. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(89\)90087-6](https://doi.org/10.1016/0021-8502(89)90087-6)
- Liu, J., & Lin, Z. (2021). Energy and exergy analyze of different air distributions in a residential building. *Energy and Buildings*, 233, 110694. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110694>
- Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8), 1598-1605. doi:10.2514/3.12149
- Mirzaie, M., Lakzian, E., Khan, A., Warkiani, M. E., Mahian, O., & Ahmadi, G. (2021). COVID-19 spread in a classroom equipped with partition – A CFD approach. *Journal of Hazardous Materials*, 420, 126587. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126587>
- Motamedi, H., Shirzadi, M., Tominaga, Y., & Mirzaei, P. A. (2022). CFD modeling of airborne pathogen transmission of COVID-19 in confined spaces under different ventilation strategies. *Sustainable Cities and Society*, 76, 103397. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103397>



- OCU. (2022). *Precio de la luz: Las facturas siguen al alza*. <https://www.ocu.org/vivienda-y-energia/gas-luz/informe/precio-luz>
- Redrow, J., Mao, S., Celik, I., Posada, J. A., & Feng, Z. (2011). Modeling the evaporation and dispersion of airborne sputum droplets expelled from a human cough. *Building and Environment*, 46(10), 2042-2051. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.04.011>
- Spillman. (1984). Evaporation from freely falling droplets. *Aeronaut. J.*, 88(875), 181-185.
- Srivastava, S., Zhao, X., Manay, A., & Chen, Q. (2021). Effective ventilation and air disinfection system for reducing coronavirus disease 2019 (COVID-19) infection risk in office buildings. *Sustainable Cities and Society*, 75, 103408. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103408>
- Ugarte-Anero, A., Fernandez-Gamiz, U., Aramendia, I., Zulueta, E., & Lopez-Guede, J. M. (2021). Numerical modeling of face shield protection against a sneeze. *Mathematics*, 9(13), 1582. <https://doi.org/10.3390/math9131582>
- Ugarte-Anero, A., Fernandez-Gamiz, U., Portal-Porras, K., Zulueta, E., & Urbina-Garcia, O. (2022). Computational characterization of the behavior of a saliva droplet in a social environment. *Scientific Reports*, 12(1), 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10180-5>
- Wargocki, P., Sundell, J., Bischof, W., Brundrett, G., Fanger, P. O., Gyntelberg, F., et al. (2002). Ventilation and health in non-industrial indoor environments: Report from a european multidisciplinary scientific consensus meeting (EUROVEN). *Indoor Air*, 12(2), 113-128. doi: 10.1034/j.1600-0668.2002.01145.x
- Xie X., Li Y., Chwang AT., Ho PL., Seto WH., (2006). How far droplets can move in indoor environments-revisiting the Wells evaporation-falling curve. *Indoor Air*. 2007 Jun;17(3):211-25. doi: 10.1111/j.1600-0668.2007.00469.x.
- Zhou, Q., Qian, H., & Liu, L. (2018). Numerical investigation of airborne infection in naturally ventilated hospital wards with central-corridor type. *Indoor and Built Environment*, 27(1), 59-69. <https://doi.org/10.1177/1420326X16667177>
- Zhu, S., Kato, S., & Yang, J. (2006). Study on transport characteristics of saliva droplets produced by coughing in a calm indoor environment. *Building and Environment*, 41(12), 1691-1702. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.06.024>