

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

Evaluación mediante Dinámica de Fluidos
Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del
laboratorio de Motores como medida de prevención de la
propagación del SARS-CoV-2

Curso: 2021/2022

Modalidad TFG: Trabajo Experimental

Alumno:

Rubén FERNÁNDEZ HIDALGO

Director:

Francisco Domingo MOLINA AIZ



Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

Índice

Índice	i
Índice de figuras	iii
Índice de tablas	vii
Resumen	1
Abstract	2
1. Interés y objetivos	3
1.1. <i>Introducción</i>	3
1.2. <i>Objetivos</i>	5
2. Revisión bibliográfica.....	7
2.1. <i>Covid-19</i>	7
2.1.1. Origen del virus SARS-CoV-2.....	7
2.1.2. Transmisión del virus SARS-CoV-2.....	8
2.2. <i>Ventilación natural</i>	10
2.3. <i>Simulaciones de CFD</i>	12
3. Especificaciones técnicas	17
3.1. <i>Normativa de obligado cumplimiento</i>	17
3.2. <i>Recomendaciones contra el COVID-19</i>	21
4. Material y métodos	25
4.1. <i>Modelo numérico de CFD</i>	25
4.1.1. Ecuaciones de conservación.....	25
4.1.2. Mallado del modelo	26
4.1.3. Modelo de solución	28
4.1.4. Condiciones de contorno	30
4.1.5. Modelización de los alumnos	33
4.2. <i>Medidas experimentales</i>	35
4.2.1. Características geométricas del laboratorio.....	36
4.2.2. Equipos de medida	37
4.2.3. Dispositivo de los ensayos experimentales.....	38
5. Resultados y discusión	41
5.1. <i>Medidas de flujo de aire con ventilación natural</i>	41
5.1.1. Mediciones Ensayo 1	41
5.1.2. Mediciones Ensayo 2	46
5.1.3. Mediciones Ensayo 3	50
5.2. <i>Modelo de CFD</i>	55
5.2.1. Modelo Ensayo 1	55
5.2.2. Modelo Ensayo 2	60
5.2.3. Modelo Ensayo 3	64
5.3. <i>Validación del modelo numérico</i>	69
5.4. <i>Análisis del nivel de confort ambiental generado en el laboratorio</i>	70
5.5. <i>Modelo óptimo del laboratorio:</i>	71
6. Conclusiones	77
7. Integración de las diferentes competencias	79
8. Fases de la realización del TFG y su cronograma asociado	81

Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

9. Bibliografía.....	83
9.1. <i>Referencias Bibliográficas</i>	83
9.2. <i>Normativa</i>	88
9.3. <i>Páginas web</i>	89
10. Planos	91
10.1. <i>Plano de localización del laboratorio de Motores 0.04 del CITE II-A (Universidad de Almería). E 1:50000.</i>	91
10.2. <i>Plano del laboratorio de Motores 0.04 del CITE II-A de la Universidad de Almería, E 1:50.</i>	91
Anexo A. Datos técnicos de los equipos de medida.....	95

Índice de figuras

Figura 1. Ventilación cruzada en un aula mediante apertura de ventanas y puertas (IDAEA-CSIC, 2021).	3
Figura 2. Evolución de CO ₂ en función de la apertura de las ventanas y puertas de un aula (IDAEA-CSIC, 2021).	4
Figura 3. Cronología de eventos COVID-19. Eventos relevantes ocurridos durante la pandemia de COVID-19 en el mundo (Mojica-Crespo y Morales-Crespo, 2020).	7
Figura 4. Tiempo de supervivencia de SARS-CoV-2 con dependencia de la temperatura y la superficie (Riddell et al, 2020).	9
Figura 5. Supervivencia y transmisión de un virus en función de la humedad absoluta (Shaman et al.,2010).	10
Figura 6. Ventilación según el posicionamiento de las aberturas con respecto al viento exterior: orientación paralela (a) y orientación perpendicular (b) (Bordalo Junior, 2010).	11
Figura 7. Zonas de presión positiva (sobrepresión) y negativa (succión) del viento sobre edificaciones con cubierta plana (a) e inclinada (b) (Bordalo Junior, 2010).	11
Figura 8. Distribución de presiones sobre una fachada (Yang et al., 2018).	12
Figura 9. Simulación mediante CFD del comportamiento de un fluido en el interior de una tubería (ANSYS, 2021).	13
Figura 10. Diferentes técnicas de mallado en Ansys de un conducto de presión instalado en una sopladora (Dávalos Fassler, 2020).	14
Figura 11. Principales medidas de prevención contra el SARS-CoV-2 (MS, 2021).	21
Figura 12. Diagrama de flujo para búsqueda de soluciones en la ventilación (IDAEA-CSIC, 2020)...	23
Figura 13. Geometría del modelo numérica importada a SpaceClaim-Ansys desde el programa de CAD Solidworks.	27
Figura 14. Mallado de las ventanas (a) y la puerta (b) mediante el uso del comando <i>Face Sizing</i>	27
Figura 15. Mallado de la unión entre las paredes y el techo mediante el comando <i>Edge Sizing</i>	28
Figura 16. Mallado completo del modelo.	28
Figura 17. Entradas de aire en el modelo numérico de CFD (superficies azules).	30
Figura 18. Implementación de la velocidad del aire (a) de entrada y su temperatura (b) mediante el comando <i>Velocity Inlet</i>	30
Figura 19. Configuración de la mezcla de aire, CO ₂ y vapor de agua del interior de nuestro modelo en la pestaña <i>Species</i> dentro de la ventana de <i>Materials</i>	31
Figura 20. Implementación de la fracción de masa de vapor de agua y la fracción molar de CO ₂ en la pestaña <i>Species</i> dentro de la ventana <i>Velocity Inlet</i>	31
Figura 21. Salida de aire de nuestro modelo (puerta) implementada con la condición <i>Outflow</i>	32
Figura 22. Temperatura de las distintas superficies implementadas con la condición <i>Wall</i> en la pestaña <i>Thermal</i>	32
Figura 23. Situación del laboratorio de docencia 0.04 del Edificio Científico Técnico CITE IIA en el Campus de la Universidad de Almería.	35

Figura 24. Imagen del laboratorio de docencia 0.04 del Edificio Científico Técnico CITE IIA del Campus de la Universidad de Almería.	35
Figura 25. Esquema geométrico acotado del laboratorio de docencia 0.04 del Edificio Científico Técnico CITE IIA del Campus de la Universidad de Almería.	36
Figura 26. Modelo geométrico realizado en Solidworks del laboratorio de docencia 0.04 del Edificio Científico Técnico CITE IIA del Campus de la Universidad de Almería.	36
Figura 27. Equipos de medida usados en el ensayo Testo 440dP (a), Testo 445 (b), Testo 535 (c) y Testo 830-T1 (d).	37
Figura 28. Anemómetro sónico 3D para la medida de la velocidad del aire en el interior del laboratorio.	37
Figura 29. División de la puerta en ocho cuadrículas (a) y de las ventanas en cuatro cuadrículas (b) con los puntos centrales de cada una de ellas en las que se tomaron las medidas (cotas en mm)..	38
Figura 30. Disposición de las ventanas en la pared oeste del laboratorio y sus respectivas divisiones en cuatro partes (a) y de la puerta en la pared este y su división en ocho cuadrículas (b).	39
Figura 31. Disposición del sensor Testo 440dP para medida de velocidad del aire en la puerta en la pared este durante el primer ensayo experimental.	39
Figura 32. Colocación mediante soportes de los equipos de medida usados en el ensayo.	40
Figura 33. Imagen de los anemómetros sónicos 3D empleados en el ensayo.	40
Figura 34. Ubicación acotada en planta de los anemómetros sónicos empleados en el ensayo (medidas en cm).	40
Figura 35. Dirección del aire medida con los dos anemómetros 3D instalados en la zona intermedia del laboratorio del ensayo 1 (15/09/2021).	42
Figura 36. Velocidad del aire del ensayo 1 (15/09/2021).	43
Figura 37. Temperatura del aire del ensayo 1 (15/09/2021).	44
Figura 38. Humedad absoluta del aire del ensayo 1 (15/09/2021).	44
Figura 39. Humedad relativa del aire del ensayo 1 (15/09/2021).	44
Figura 40. Concentración de CO₂ del ensayo 1 (15/09/2021).	45
Figura 41. Dirección del aire tomada por los dos anemómetros 3D instalados en la zona intermedia del laboratorio del ensayo 2 (16/09/2021).	47
Figura 42. Velocidad del aire del ensayo 2 (16/09/2021).	48
Figura 43. Temperatura del aire del ensayo 2 (16/09/2021).	48
Figura 44. Humedad absoluta del aire del ensayo 2 (16/09/2021).	48
Figura 45. Humedad relativa del aire del ensayo 2 (16/09/2021).	49
Figura 46. Concentración de CO₂ del ensayo 2 (16/09/2021).	49
Figura 47. Imagen del laboratorio con los alumnos en su interior durante el desarrollo del ensayo (20/09/2021).	50
Figura 48. Dirección del aire tomada por los dos anemómetros 3D instalados en la zona intermedia del laboratorio del ensayo 3 (20/09/2021).	51
Figura 49. Velocidad del aire del ensayo 3 (20/09/2021) realizado con 19 alumnos dentro del laboratorio.	52

Figura 50. Temperatura del aire del ensayo 3 (20/09/2021) realizado con 19 alumnos dentro del laboratorio.....	52
Figura 51. Humedad absoluta del aire del ensayo 3 (20/09/2021) realizado con 19 alumnos dentro del laboratorio.	53
Figura 52. Humedad relativa del aire del ensayo 3 (20/09/2021) realizado con 19 alumnos dentro del laboratorio.....	53
Figura 53. Concentración de CO₂ del ensayo 3 (20/09/2021) realizado con 19 alumnos dentro del laboratorio.....	54
Figura 54. Distribución de temperaturas en las superficies [K]. Ensayo 1 realizado el 15/09/2021 en el laboratorio sin alumnos.	55
Figura 55. Velocidad del aire en los puntos de la malla numérica correspondientes a la puerta en función de la altura [m/s]. Ensayo 1 realizado el 15/09/2021 en el laboratorio sin alumnos.	56
Figura 56. Dirección y velocidad del aire representado con líneas [m/s]. Ensayo 1.	56
Figura 57. Dirección y velocidad del aire representado con vectores [m/s]. Ensayo 1.	57
Figura 58. Dirección y velocidad del aire representado con vectores [m/s]. Vista en planta. Ensayo 1.	57
Figura 59. Detalle en planta del comportamiento del aire en las proximidades de las ventanas. Ensayo 1.	58
Figura 60. Recorrido de las partículas de vapor de agua contenidas en el aire. Humedad absoluta [kg/kg]. Ensayo 1.	58
Figura 61. Dirección y velocidad del aire representado con vectores en el plano que contiene los anemómetros 3D [m/s]. Vista en planta. Ensayo 1.....	59
Figura 62. Vectores de dirección del aire superpuestos con los obtenidos mediante los anemómetros 3D (vectores rojos). Ensayo 1.	59
Figura 63. Distribución de temperaturas en las superficies [K]. Ensayo 2.....	60
Figura 64. Dirección y velocidad del aire representado con líneas [m/s]. Ensayo 2.	61
Figura 65. Dirección y velocidad del aire representado con vectores [m/s]. Ensayo 2.....	61
Figura 66. Dirección y velocidad del aire representado con vectores [m/s]. Vista en planta. Ensayo 2.	62
Figura 67. Recorrido de las partículas de vapor de agua contenidas en el aire. Humedad absoluta [kg/kg]. Ensayo 2.	62
Figura 68. Dirección y velocidad del aire representado con vectores en el plano que contiene los anemómetros 3D [m/s]. Vista en planta. Ensayo 2.....	63
Figura 69. Vectores de dirección del aire superpuestos con los obtenidos mediante los anemómetros 3D. Ensayo 2.	63
Figura 70. Distribución de temperaturas en las superficies [K]. Ensayo 3.....	64
Figura 71. Trayectoria y velocidad del aire representado con líneas [m/s]. Ensayo 3.....	64
Figura 72. Detalle del movimiento del aire hacia las ventanas representado con vectores [m/s]. Ensayo 3.	65
Figura 73. Trayectoria y velocidad del aire entre los alumnos representado con vectores [m/s]. Ensayo 3.	65

Figura 74. Vectores de dirección del aire superpuestos con los obtenidos mediante los anemómetros 3D. Ensayo 3.	66
Figura 75. Emisión de CO₂ de los alumnos visto en planta. Ensayo 3.	66
Figura 76. Emisión de vapor de agua de los alumnos visto en planta. Ensayo 3.	67
Figura 77. Distribución de CO₂ en el laboratorio. Ensayo 3.	67
Figura 78. Distribución de vapor de agua en el laboratorio. Ensayo 3.	68
Figura 79. Dirección y velocidad del aire. Ensayo 4.1.....	71
Figura 80. Distribución de CO₂ en el laboratorio. Ensayo 4.1.	71
Figura 81. Dirección y velocidad del aire. Ensayo 4.2.....	72
Figura 82. Distribución de CO₂ en el laboratorio. Ensayo 4.2.	72
Figura 83. Dirección y velocidad del aire. Ensayo 4.3.....	73
Figura 84. Distribución de CO₂ en el laboratorio. Ensayo 4.3.	73
Figura 85. Dirección y velocidad del aire. Ensayo 4.4.....	74
Figura 86. Distribución de CO₂ en el laboratorio. Ensayo 4.4.	74
Figura 87. Distribución de CO₂ en el laboratorio. Ensayo 4.5.	75
Figura 88. Distribución de CO₂ en el laboratorio. Ensayo 4.6.	75

Índice de tablas

Tabla 1. Condiciones interiores de diseño según el RITE (BOE, 2007).....	17
Tabla 2. Caudales de aire exterior, en dm^3/s por persona según el RITE (BOE, 2007).....	19
Tabla 3. Calidad del aire percibido, en decipols según el RITE (BOE, 2007).....	19
Tabla 4. Concentración de CO_2 en los locales según el RITE (BOE, 2007).	19
Tabla 5. Elementos del modelo de CFD utilizado en las simulaciones.....	29
Tabla 6. Condiciones de contorno utilizadas para los tres días de ensayo sin y con alumnos.	33
Tabla 7. Características técnicas de los equipos utilizados para la medida de la velocidad del aire, temperatura aire, humedad relativa y concentración de CO_2	38
Tabla 8. Medidas experimentales correspondientes al ensayo 1 (15/09/2021) tomadas en las ventanas con los equipos Testo 445 y Testo 535 y en la puerta con los equipos Testo 858 y Testo 535: velocidad del aire v , temperatura del aire T , humedad relativa HR , humedad absoluta x , concentración de CO_2 C , ventana sur VS y ventana norte VN.....	41
Tabla 9. Medidas experimentales en el ensayo 1 (15/09/2021) tomadas con los anemómetros 3D. Donde la velocidad del aire en el plano horizontal V_{xy} , la temperatura sónica del aire T , la velocidad horizontal en x V_x , la velocidad horizontal en y V_y , la velocidad vertical en z V_z , y la dirección con respecto al eje y ϑ_{yx}	42
Tabla 10. Caudales de entrada y de salida del laboratorio y su variación del ensayo 1 (15/09/2021).	43
Tabla 11. Medidas experimentales correspondientes al ensayo 2 (16/09/2021) tomadas en las ventanas con los equipos Testo 445 y Testo 535 y en la puerta con los equipos Testo 858 y Testo 535: velocidad del aire v , temperatura del aire T , humedad relativa HR , humedad absoluta x , concentración de CO_2 C , ventana sur VS y ventana norte VN.....	46
Tabla 12. Medidas experimentales en el ensayo 2 (16/09/2021) tomadas con los anemómetros 3D. Donde la velocidad del aire en el plano horizontal V_{xy} , la temperatura sónica del aire T , la velocidad horizontal en x V_x , la velocidad horizontal en y V_y , la velocidad vertical en z V_z , y la dirección con respecto al eje y ϑ_{yx}	46
Tabla 13. Caudales de entrada y de salida del laboratorio y su variación del ensayo 2 (16/09/2021).	47
Tabla 14. Medidas experimentales correspondientes al ensayo 3 (20/09/2021) tomadas en las ventanas con los equipos Testo 445 y Testo 535 y en la puerta con los equipos Testo 158, Testo 858 y Testo 535: velocidad del aire v , temperatura del aire T , humedad relativa HR , humedad absoluta x , concentración de CO_2 C , ventana sur VS y ventana norte VN.....	50
Tabla 15. Medidas experimentales en el ensayo 3 (20/09/2021) tomadas con los anemómetros 3D dentro del laboratorio durante el desarrollo de una clase con 19 alumnos. Donde la velocidad del aire en el plano horizontal V_{xy} , la temperatura sónica del aire T , la velocidad horizontal en x V_x , la velocidad horizontal en y V_y , la velocidad vertical en z V_z , y la dirección con respecto al eje y ϑ_{yx}	51
Tabla 16. Caudales de entrada y de salida del laboratorio y su variación del ensayo 3 (20/09/2021) realizado con 19 alumnos dentro del laboratorio.	52
Tabla 17. Comparación de los resultados obtenidos con Fluent y los medidos en el laboratorio....	69

Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

Tabla 18. Análisis del nivel de confort de las condiciones climáticas simuladas con CFD. Velocidad del aire v , temperatura del aire T , humedad relativa HR y concentración de CO_2 C. 70

Tabla 19. Cronograma de la realización de actividades. 81

Resumen

Para analizar la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores de la Universidad de Almería (0.04 del Edificio Científico Técnico II-A) se ha usado el programa de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) Ansys Fluent. Para ello, se tomaron las medidas del laboratorio y se creó un modelo geométrico en tres dimensiones en el programa de diseño asistido por ordenador Solidworks. Para la validación del modelo numérico, se llevaron a cabo tres ensayos experimentales en el laboratorio (los dos primeros sin alumnos y el tercero durante una clase con 19 estudiantes), en los que se midieron la velocidad del aire, la temperatura y humedad y la concentración de CO₂, en dos ventanas de entrada de aire y en la puerta de salida. También se midieron las temperaturas de las superficies del laboratorio para utilizarlas como condiciones de contorno del modelo de CFD. Las diferencias entre los valores medidos y simulados con CFD en la puerta de salida fueron inferiores al 10% para todos los parámetros analizados. Una vez validado el modelo de CFD, se realizaron varias simulaciones con el objetivo de optimizar la capacidad de ventilación del laboratorio. Se consideró que la mejor combinación de apertura de ventanas es la que permite mantener la menor concentración de CO₂ posible y la mayor tasa de renovaciones de aire por hora.

En las simulaciones de CFD, observaremos distintos parámetros del movimiento del aire en el interior del laboratorio, desde que entra por las ventanas hasta que sale por la puerta, como la velocidad, la concentración de CO₂, la humedad relativa, la temperatura o la humedad absoluta. Estos parámetros nos permitirán analizar el nivel de ventilación y, por lo tanto, podremos evaluar el riesgo de contagio si alguno de los alumnos estuviese infectado con el virus SARS-CoV-2. Las simulaciones de CFD permiten observar el recorrido que sigue el aire en el interior del laboratorio, como se mueve entre los alumnos, mostrando las zonas donde la concentración de CO₂ es mayor, y por tanto el riesgo de contagio entre alumnos es máximo. Pudimos observar cómo en una de las esquinas se estanca el aire, concretamente en la esquina que une la pared norte con la del pasillo (observado una concentración de CO₂ de 470 ppm cercana al máximo admisible de 500 ppm). Otra observación fue que cuando la velocidad del aire de entrada entre las ventanas tiene cierta diferencia, este se ve sometido a una mayor turbulencia y, por tanto, su recorrido en el interior del laboratorio es mayor hasta que sale por la puerta.

Las simulaciones con programa Ansys Fluent han permitido determinar la mejor opción para la ventilación del laboratorio. En las últimas simulaciones realizadas con diferentes combinaciones de la apertura de las ventanas, se determinó que la mejor opción, que reduce la concentración máxima de CO₂ interior, se correspondía con la apertura de 4 ventanas más próximas al lado norte. De esta manera, podremos minimizar el riesgo de contagio entre los alumnos.

Abstract

To analyse the ventilation capacity of the Engine Laboratory of the University of Almería (0.04 of the Technical Scientific Building II-A) the Ansys Fluent Computational Fluid Dynamics (CFD) software has been used. To do this, the laboratory measurements were taken and a three-dimensional geometric model was created in the Solidworks computer-aided design program. For the validation of the numerical model, three experimental tests were carried out in the laboratory (the first two without students and the third during a class with 19 students), in which air velocity, temperature and humidity and CO₂ concentration were measured, in two air intake windows and in the exit door. The temperatures of the laboratory surfaces were also measured to be used as boundary conditions of the CFD model. The differences between the values measured and simulated with CFDs at the exit door were less than 10% for all the parameters analyzed. Once the CFD model was validated, several simulations were carried out with the aim of optimizing the ventilation capacity of the laboratory. We considered that the best combination of window opening was the one that allowed maintaining the lowest concentration of CO₂ possible and the highest rate of air renewals per hour.

In the CFD simulations, we will observe different parameters of the movement of air inside the laboratory, from the moment it enters through the windows until it leaves through the door, such as air velocity, CO₂ concentration, relative humidity, temperature or absolute humidity. These parameters will allow us to analyse the level of ventilation and, therefore, we can evaluate the risk of contagion if any of the students were infected with the SARS-CoV-2 virus. CFD simulations allow observing the path that the air follows inside the laboratory, as it moves between the students, showing the areas where the concentration of CO₂ is higher, and therefore the risk of contagion between students is maximum. We were able to observe how in one of the corners the air stagnates, specifically in the corner that joins the north wall with that of the corridor (observing a CO₂ concentration of 470 ppm close to the maximum allowable of 500 ppm). Another observation was that when the velocity of the inlet air between the windows has a certain difference, it is subjected to greater turbulence and, therefore, its path inside the laboratory is greater until it leaves through the door.

Simulations with an Ansys Fluent program have made it possible to determine the best option for laboratory ventilation. In the latest simulations carried out with different combinations of the opening of the windows, it was determined that the best option, which reduces the maximum concentration of indoor CO₂, corresponded to the opening of 4 windows closer to the north side. In this way, we can minimize the risk of contagion among students.

1. Interés y objetivos

1.1. Introducción

La evidencia actual sugiere que el SARS-CoV-2, el virus que causa la pandemia COVID-19, se propaga predominantemente de persona a persona (OMS, 2020). La transmisión de SARS-CoV-2 puede ocurrir a través de un contacto directo, indirecto o cercano con personas infectadas a través de secreciones infectadas como saliva y secreciones respiratorias o sus gotas respiratorias, que se expulsan cuando una persona infectada tose, estornuda o habla (Liu *et al.*, 2020; Huang *et al.*, 2020; Ghinai *et al.*, 2020). Las gotas respiratorias son mayores de 5-10 μm de diámetro, mientras que las gotas de menos de 5 μm de diámetro se conocen como núcleos de gotas o aerosoles (WHO, 2020b). Las personas podrían contraer COVID-19 si están de pie a menos de 1 metro de una persona contagiada con COVID-19, respirando gotas tosidas o exhaladas por ellas. La mayor parte del volumen (> 99%) comprende grandes gotas que viajan distancias cortas (menos de 1 m) y no permanecen suspendidas en el aire (WHO, 2021a).

La mala ventilación en espacios interiores confinados se asocia con el aumento de la transmisión de infecciones del tracto respiratorio como la gripe, la tuberculosis y la infección por rinovirus (Knibbs *et al.*, 2011). De forma similar, la transmisión del nuevo virus SARS-CoV-2 es especialmente efectiva en lugares cerrados, incluyendo los casos presintomáticos de COVID-19 (Lu *et al.*, 2020). La transmisión del SARS-CoV-2 es particularmente eficaz en espacios interiores confinados y concurridos, como lugares de trabajo (Leclerc *et al.*, 2020).

La ventilación es un factor importante para evitar que el virus que causa la COVID-19 se propague en espacios interiores, por lo que una de las medidas de lucha contra la transmisión del virus es la utilización de la ventilación natural (OMS, 2020). La ventilación se refiere a la renovación de aire que consiste en sustituir el aire interior, potencialmente contaminado, con aire exterior, libre de virus (IDAEA-CSIC, 2021). Se considera que la ventilación con aire exterior diluye los contaminantes en espacios cerrados y aumenta el tiempo necesario para la exposición a una dosis infecciosa (ECDD, 2020). Por otro lado, los sistemas de aire acondicionado y ventilación forzada se pueden convertir en posibles focos infecciosos de transmisión del SARS-CoV-2 (Fong Silva *et al.*, 2020)

La ventilación natural consiste en aumentar la renovación de aire interior con aire exterior, abriendo ventanas y puertas para provocar un flujo de aire. Aunque pueda generar una cierta sensación de malestar por las corrientes de aire, o una sensación térmica de frío, está demostrado el beneficio de la renovación de aire por ventilación cruzada para reducir las tasas de contaminantes en locales (IDAE, 2021). La ventilación cruzada, consistente en la apertura de ventanas y puertas en lados opuestos de la habitación (R5 en Fig. 1). En general este tipo de ventilación es más efectiva que la apertura en un solo lado, y por tanto se recomienda su uso. Incluso en edificios con ventilación mecánica es recomendable realizar una ventilación regular con ventanas (IDAE, 2021).

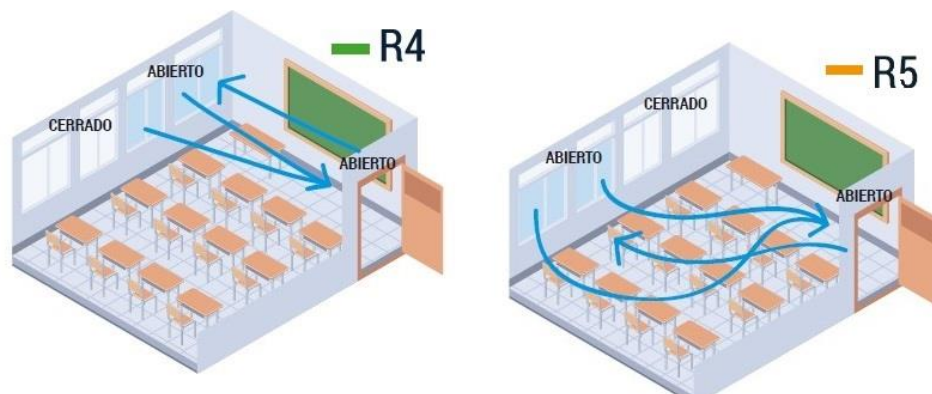


Figura 1. Ventilación cruzada en un aula mediante apertura de ventanas y puertas (IDAEA-CSIC, 2021).

Además, la concentración de CO₂ en espacios interiores cerrados aumenta rápidamente en presencia de personas, que exhalan CO₂ al respirar. La renovación de aire con aire exterior reduce las concentraciones de CO₂ en el interior, siendo la ventilación cruzada el método más eficaz (Fig. 2). Esto favorece la atención y rendimiento de los alumnos, ya que la exposición a concentraciones de CO₂ demasiado elevadas produce aletargamiento y dificulta la atención (IDAEA-CSIC, 2021).

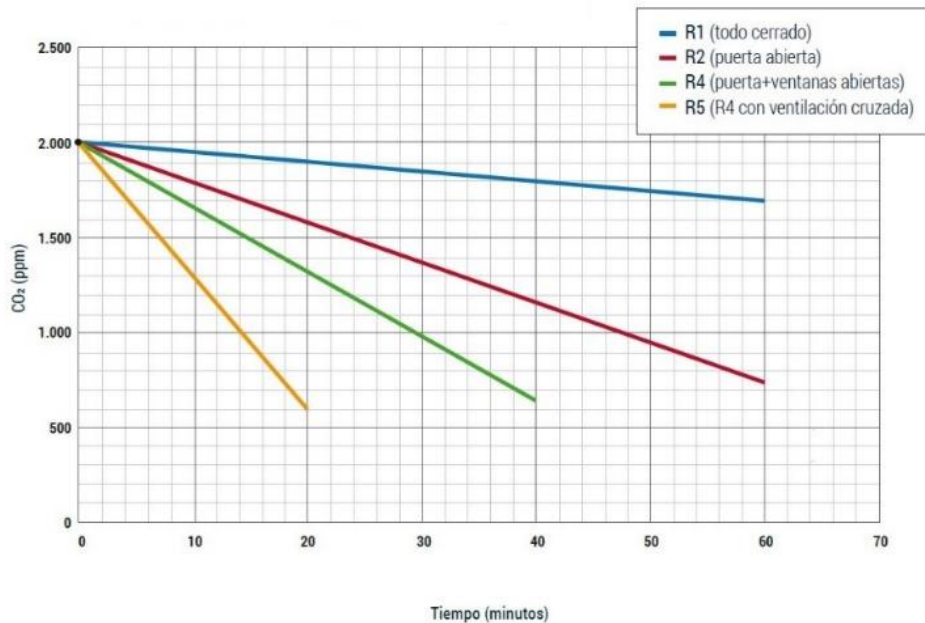


Figura 2. Evolución de CO₂ en función de la apertura de las ventanas y puertas de un aula (IDAEA-CSIC, 2021).

El Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, RITE (BOE, 2007) definido en situación de no-pandemia, indica una ventilación mínima de 12.5 litros por persona y segundo para aulas de enseñanza (IDAEA-CSIC, 2021). La guía de Harvard recomienda, como medida para la reducción de la transmisión del SARS-CoV-2, 5-6 renovaciones de aire por hora para aulas de 100 m², con 35 estudiantes de 9 o más años (Allen *et al.*, 2020). El riesgo cero de contagio no existe, pero cuanto mejor sea la ventilación, menor es el riesgo de contagio (IDAEA-CSIC, 2021).

Existen métodos experimentales para medir la ventilación en un espacio concreto, que generalmente se basan en medidas de CO₂. La tasa de ventilación se puede determinar en función del tiempo que tarda en reducirse la concentración de CO₂, utilizado como gas trazador (Dols y Persily, 1995), ya que en el aire exterior su valor es más o menos constante, siendo actualmente de aproximadamente 420 ppm (IDAEA-CSIC, 2021). La ventilación también se puede medir además de mediante la técnica del gas trazador, mediante medidas de diferencia de presión (Gough *et al.*, 2018). Mediante simulaciones de CFD se puede determinar el caudal de ventilación en un edificio y su tasa de renovación, con la ventaja adicional de poder obtener el patrón de flujo de aire y conocer los puntos de entrada y salida del aire. Esta técnica ha sido utilizada tanto para el estudio de la ventilación en aulas de enseñanza (Angelopoulos *et al.*, 2017) como para el estudio del movimiento de aire en relación con la propagación del SARS-CoV-2 (Bhattacharyya *et al.*, 2020).

1.2. Objetivos

El objetivo principal que pretendemos conseguir es evaluar la capacidad de ventilación natural del laboratorio de Motores de la UAL para prevenir lo mejor posible la propagación del SARS-CoV-2 en su interior, y determinar la apertura óptima de las ventanas y la puerta para reducir al máximo la probabilidad de transmisión del SARS-CoV-2.

Para la consecución de este objetivo principal se han definido una serie de subobjetivos específicos:

- Desarrollar un modelo tridimensional de dinámica de fluidos computacional (CFD) del laboratorio que permita analizar las distintas combinaciones posibles de apertura de las ventanas y la puerta.
- Realizar medidas experimentales en el propio laboratorio del movimiento del aire, de la distribución de CO₂, de temperatura y de humedad, con y sin alumnos en el interior.
- Validar el modelo de CFD comparando los valores simulados y medidos de velocidad del aire, temperatura, humedad y concentración de CO₂.
- Analizar el nivel de seguridad del laboratorio con alumnos en su interior en función de la tasa de ventilación y la concentración de CO₂.

Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

2. Revisión bibliográfica

2.1. Covid-19

2.1.1. Origen del virus SARS-CoV-2

Una de las cosas que es interesante conocer para combatir el virus, es su origen. Ya que esto ayudaría mucho a entender muchas de sus características, y quizás, en un futuro, a prevenir otras enfermedades o pandemias. A lo largo de los meses, desde el comienzo de la pandemia, hemos escuchado en los distintos medios diversas teorías sobre el origen del SARS-CoV-2; aunque, por el momento, no se ha descubierto con exactitud de donde procede.

Podemos encontrar coronavirus en una gran cantidad de animales (habitualmente vertebrados), como aves o roedores. Para que estos virus puedan saltar del reservorio animal para infectar a un humano, se requiere típicamente de un animal huésped intermediario (Dominguez y Amador-Bedolla, 2020). Para que se produzca el contagio en los humanos, es necesario que el animal reservorio entre en contacto con otro animal (intermediario) que conviva o habite más cerca de los seres humanos, como, por ejemplo, un mosquito, un cerdo, caballo, etcétera.

Una de las teorías acerca del origen del SARS-CoV-2 es la de su creación de manera malintencionada en un laboratorio, pero esta teoría carece de pruebas que demuestren su validez. Por lo tanto, vamos a considerar dos posibles orígenes que son (1) la selección natural en un animal hospedante o antes de la transferencia zoonótica y (2) la selección natural en humanos tras transferencia zoonótica (Andersen *et al.*, 2020).

▪ Selección natural en un huésped animal antes de la transferencia zoonótica.

Algunos de los primeros casos de los que se tuvo constancia fueron en Wuhan (China), debido a los mercados con animales que allí se celebraban. La notificación de los primeros casos registrados en esta ciudad fue realizada el 31 de diciembre de 2019 (Fig. 3).



Figura 3. Cronología de eventos COVID-19. Eventos relevantes ocurridos durante la pandemia de COVID-19 en el mundo (Mojica-Crespo y Morales-Crespo, 2020).

Se hablaba del murciélago y del pangolín como posibles portadores del virus y se descubrió su presencia en un murciélago (*Rhinolophus affinis*). En una investigación se descubrió que este nuevo coronavirus es a nivel genómico idéntico en el 96,2% a un coronavirus (BatCoV-RaTG13) procedente de

un murciélago de la subespecie antes mencionada de una provincia cercana al lugar donde emergió el nuevo coronavirus (Mojica-Crespo y Morales-Crespo, 2020). Por lo tanto, esto hace pensar, por las similitudes que presentan, que el SARS-CoV-2 puede ser producto de una zoonosis.

▪ **Selección natural en humanos tras transferencia zoonótica**

También es posible que un virus progenitor del SARS-CoV-2 consiguiera pasar del animal portador a los humanos y, de esta forma, adquiriese las características genómicas adecuadas para ser capaz de transmitirse de persona a persona. En el momento en que el virus fue capaz de lograr estas adaptaciones, se fueron descubriendo más casos por parte del sistema sanitario hasta proclamarse como pandemia.

Ciertos estudios en humanos podrían recabar información sobre este tipo de propagación. También podrían ofrecer bastante información los estudios serológicos retrospectivos. De hecho, se realizaron algunos de estos estudios y mostraron exposiciones de bajo nivel a coronavirus similares al SARS-CoV en algunas áreas de China. Sin embargo, dichos estudios no pudieron distinguir si las exposiciones se debieron a infecciones previas con SARS-CoV, SARS CoV-2 u otros coronavirus similares (Andersen *et al.*, 2020).

2.1.2. Transmisión del virus SARS-CoV-2

En cuanto a la propagación y transmisión, como hemos mencionado en la introducción, este virus es capaz de propagarse a través del aire; pero también se ha hablado del contacto por superficie y a través de microgotas. Aunque estas dos últimas vías de contagio han perdido relevancia en la actualidad, vamos a explicar brevemente cada uno de ellos.

▪ **Transmisión por superficies**

Entendemos por transmisión por superficie el caso en el que un sujeto infectado deposita el virus sobre una superficie sobre la que este es capaz de sobrevivir un determinado tiempo y entra en contacto con un individuo sano. Sufrir un contagio de esta manera depende directamente del tiempo que el virus sea capaz de sobrevivir sobre la superficie sobre la que sea depositado.

La vida media que se ha estimado según la superficie es de 6,8 horas en plástico, 5,6 horas en acero inoxidable, 3,5 horas en cartón y 0,8 horas en cobre (van Doremalen *et al.*, 2020). Estos tiempos son relativos, ya que dependerá de la temperatura y humedad del ambiente. Otros estudios más completos sobre este tema estiman (a una temperatura de 20 °C) una vida de hasta 28 días en acero inoxidable, billetes de polímeros o de papel, vidrio y vinilo; y de 14 días en superficies de algodón (Riddell *et al.*, 2020). En este mismo artículo, se muestra como a mayor temperatura se obtiene una supervivencia menor (Fig. 4). Contagiarse de esta manera es menos probable, aunque también es un modo de transmisión a tener en cuenta.

▪ **Transmisión por microgotas**

Se conoce con el nombre de microgotas a las partículas relativamente grandes, de 5-10 μm de diámetro, en comparación con otras que exhalamos (WHO, 2020b). Estas partículas, debido al tamaño que tienen, siguen una trayectoria similar a la de un proyectil, por lo que no son capaces de viajar más de 1 metro (WHO, 2021a). Pueden transmitir el virus si se depositan en la boca o los ojos de una persona que no esté infectada, o también puede depositarse sobre una superficie como hemos hablado en el apartado anterior y producir un contagio por superficie.

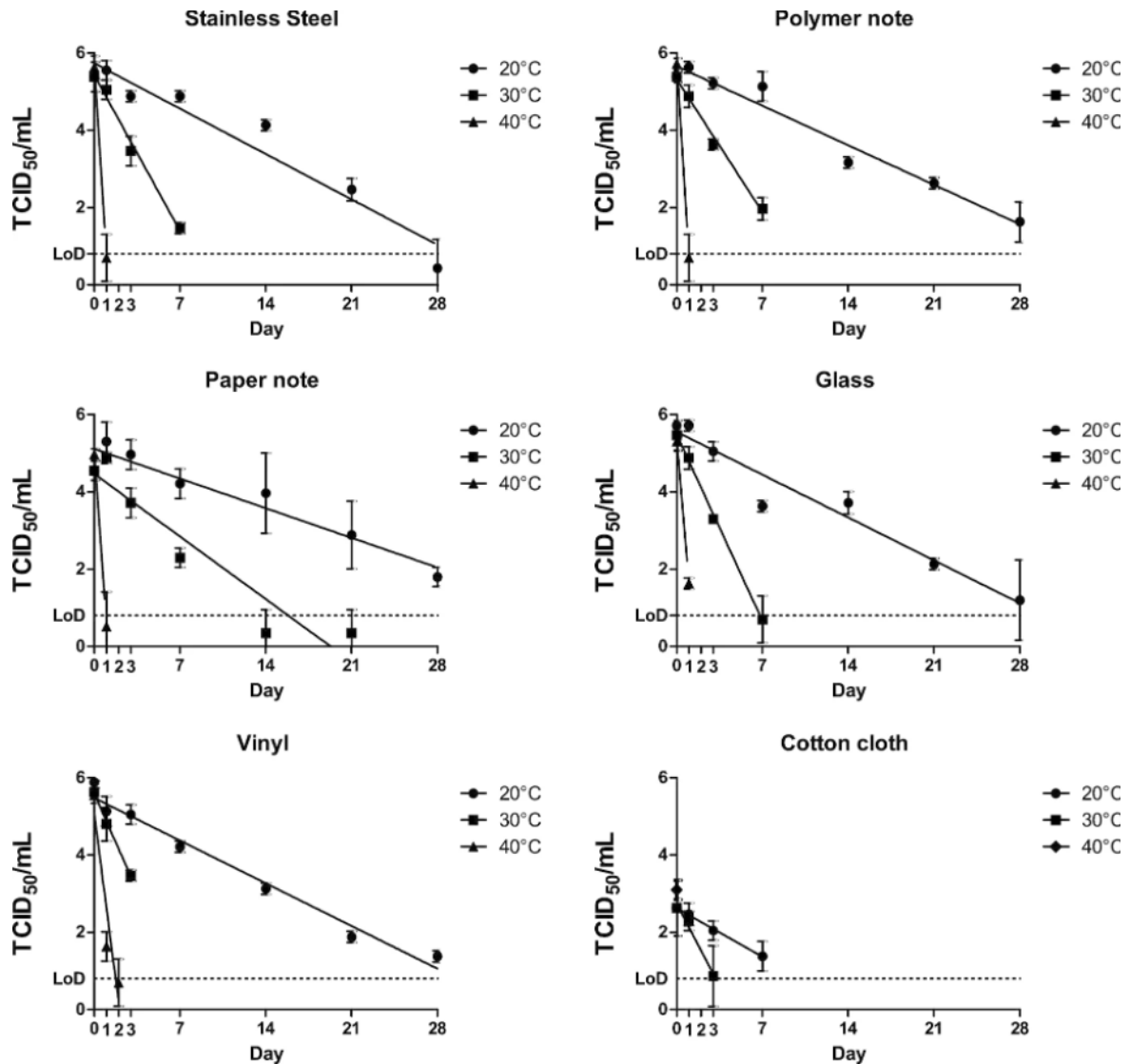


Figura 4. Tiempo de supervivencia de SARS-CoV-2 con dependencia de la temperatura y la superficie (Riddell et al, 2020).

▪ Transmisión aérea

Como hemos mencionado en la introducción, también es posible que el virus se propague a través del aire, debido a las partículas de aerosoles que expulsamos al estornudar, toser o simplemente al hablar. Pero no todas las partículas pueden permanecer en el aire cierto tiempo, sino que para este tipo de transmisión solamente suelen tenerse en cuenta las partículas de menos de $5\mu\text{m}$ de diámetro, denominadas aerosoles (WHO, 2020b). Los aerosoles son capaces de permanecer en el aire y viajar por él bastantes metros, además, pueden seguir prácticamente cualquier trayectoria que podamos imaginar. Por esto decimos que siguen un movimiento Browniano. De esta manera, otro sujeto no infectado que se encuentre próximo al portador del virus (o en la misma habitación) puede contraer el virus con cierta facilidad. La vida media del SARS-CoV-2 en aerosoles se ha estimado en aproximadamente 1,2 h, con intervalos con una confiabilidad del 95% de 0,64 a 2,64 h (van Doremalen *et al.*, 2020). Por tanto, estos aerosoles si permanecen en suspensión tendrían capacidad de contagio durante toda la duración de una clase de 2 horas. Para evitarlo es esencial evacuarlos de las aulas mediante la ventilación.

Hay otros factores que toman una cierta relevancia en la propagación del SARS-Cov-2 como por ejemplo las condiciones ambientales. Anteriormente hemos mencionado como la temperatura influye

en la supervivencia del virus dependiendo de la superficie en la que se encuentre. Ahora vamos a ver como la humedad juega también un papel bastante importante en la transmisión aérea.

Cuando la humedad es elevada, la cantidad de vapor de agua que está contenida en el aire hace que las gotas portadoras del virus aumenten de tamaño y permanezcan menos tiempo en suspensión. Por el contrario, la humedad baja hace que las gotas se asienten más lentamente y permanezcan mayor tiempo en el aire porque se reducen a tamaños más pequeños; por lo que la fricción con el aire permite que puedan llegar más lejos (Shaman *et al.*, 2011). Esto provoca que la tasa de supervivencia y la capacidad de transmisión de los virus disminuyan drásticamente con el aumento de humedad específica (Fig. 5).

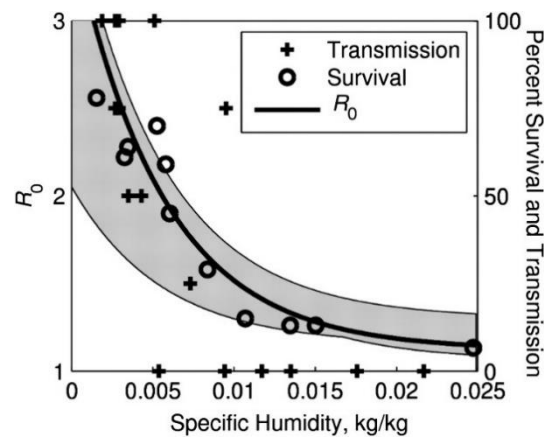


Figura 5. Supervivencia y transmisión de un virus en función de la humedad absoluta (Shaman *et al.*, 2010).

Un último factor a mencionar, aunque pueda parecer obvio, es la actividad humana. Por regla general, en invierno, las personas suelen pasar más tiempo en lugares cerrados donde la ventilación es menor y el espacio es más reducido, favoreciendo la transmisión de algunas enfermedades como el SARS-CoV-2 (GACC-ISCIII, 2020).

Los sujetos infectados con este virus, pueden presentar unos síntomas muy variados desde leves a muy graves; o incluso pueden ser asintomáticos. Los más usuales suelen ser fiebre, tos, mialgia y pérdida de apetito, producción de esputo, dificultad respiratoria, dolor en las articulaciones y la cabeza, escalofríos, etcétera. Otros síntomas menos comunes suelen ser vómitos, congestión nasal, diarrea y congestión conjuntival. El dolor facial y la obstrucción nasal son los síntomas otorrinolaringológicos más relacionados con la enfermedad. El 85,6% y el 88,0% de los pacientes sufren disfunciones olfativas y gustativas, respectivamente (Lechien *et al.*, 2020).

2.2. Ventilación natural

Llamamos ventilación natural a la renovación de aire (suministro y eliminación) de un espacio interior sin la necesidad de usar medios mecánicos. Gracias a ella, conseguimos mejorar el nivel de confort en interiores, disminuir el consumo de electricidad y, además, mejorar la calidad del aire. Puede darse gracias al viento exterior o por una diferencia de presión entre el interior y el exterior provocado por la diferencia de temperatura.

No se debe esperar a que la ventilación natural ocurra sola, sino que debemos de ayudar a ello; por ejemplo, con una buena orientación de las ventanas y de las demás aperturas al exterior. Con una buena orientación de las aperturas con respecto a la dirección del viento se puede conseguir una adecuada ventilación natural (Fig. 6a).

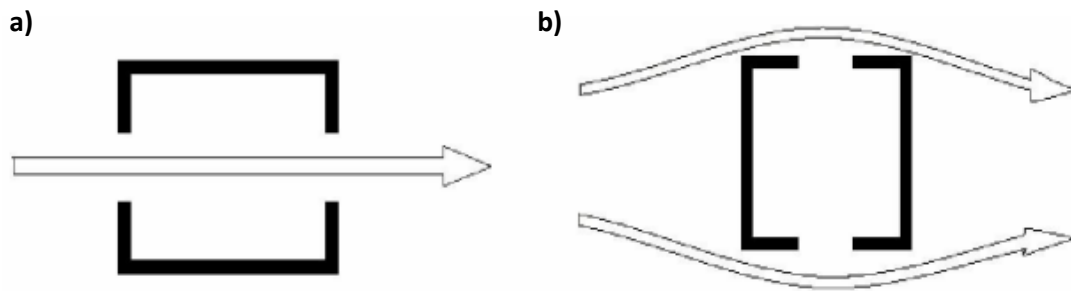


Figura 6. Ventilación según el posicionamiento de las aberturas con respecto al viento exterior: orientación paralela (a) y orientación perpendicular (b) (Bordalo Junior, 2010).

La ventilación natural presenta ciertas ventajas sobre la ventilación forzada, como, por ejemplo, un menor consumo energético (Hernandez-Calleja, 2010). Pero debemos tener en cuenta algunas consideraciones que pueden influir o pueden hacer que la ventilación natural no sea viable, como pueden ser (Bordalo Junior, 2010):

- La contaminación acústica: en los edificios situados en áreas urbanas con elevados niveles de ruido del tráfico, el potencial para utilizar la ventilación natural puede verse limitado por el ruido excesivo que se introduce a través de las aberturas de ventilación. (Oldham *et al.*, 2012).
- La contaminación ambiental: un exceso de polución en el aire del exterior nos puede obligar a tener que recurrir a otros tipos de ventilación como por ejemplo la forzada e instalar unos filtros en el aire que vamos a suministrar al interior.
- Riesgos o peligros en cuanto a la seguridad por el tamaño de las aberturas: pueden darse casos que por el excesivo tamaño de las aberturas requeridas suponga un peligro para los sujetos que se encuentren en su interior.
- Normativa de edificación: debemos revisar dicha normativa para asegurarnos de cumplirla.
- Otros factores como la climatología, las necesidades de iluminación en el interior, las dimensiones y el diseño del local, las actividades a realizar en su interior, etcétera.

Cuando el viento incide sobre la fachada de un edificio, este crea unas diferencias de presión. Como se intuye, en la fachada sobre la que incide el viento (barlovento) la presión va a ser mayor; y en la fachada sobre la que no incide (sotavento) va a ser menor, provocando una zona de presión negativa o de succión (Fig.7).

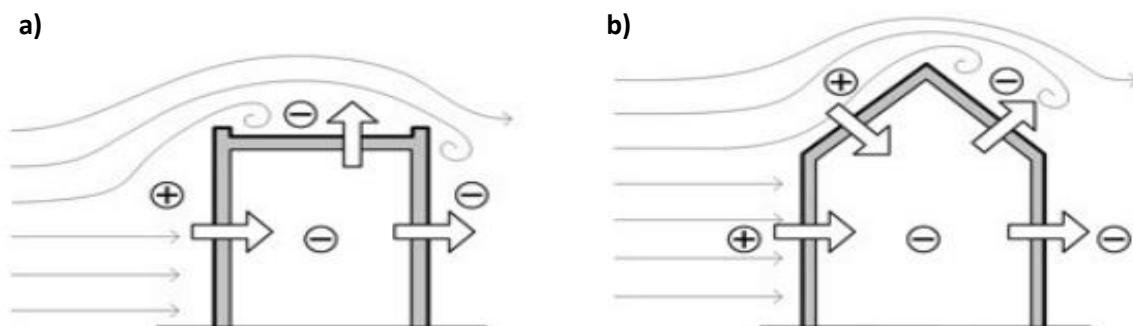


Figura 7. Zonas de presión positiva (sobrepresión) y negativa (succión) del viento sobre edificaciones con cubierta plana (a) e inclinada (b) (Bordalo Junior, 2010).

Las diferencias de temperatura entre el interior y el exterior también dan lugar a una diferencia de presiones, esto se conoce como flotabilidad térmica. Este efecto produce el movimiento del aire por

diferencia de densidades, lo que da lugar a presiones inferiores en la parte baja del edificio y a presiones mayores en la parte superior (Kastillo y Beltrán, 2015). Se establece un plano neutro (*neutral pressure plane*) por debajo del cual la presión es mayor fuera del edificio y el aire entra, y por encima del cual el aire tiene menor presión en el exterior, produciendo la salida del aire caliente (Fig. 8).

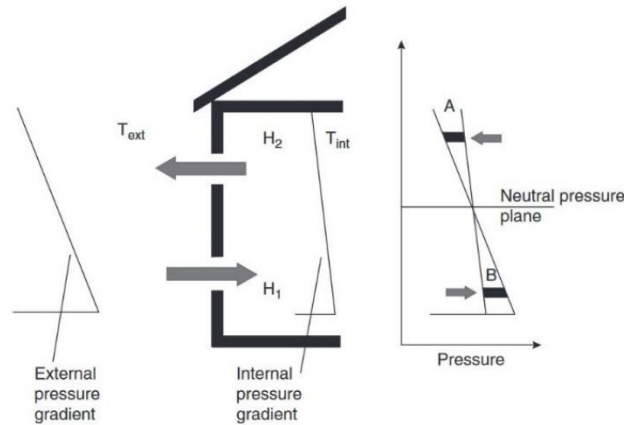


Figura 8. Distribución de presiones sobre una fachada (Yang *et al.*, 2018).

De manera general, la ventilación natural suele cumplir su cometido y proporciona una tasa de renovación de aire acorde a las necesidades del local. Aunque la tasa de renovación de aire puede variar significativamente, los edificios con sistemas modernos de ventilación natural (bien diseñados y funcionando correctamente) pueden lograr solo por el efecto de las fuerzas naturales tasas de renovación de aire muy elevadas, que pueden incluso exceder con creces los requisitos de ventilación mínimos. Sin embargo, estos sistemas presentan algunos inconvenientes (Atkinson *et al.*, 2009):

- Depende de la climatología: es variable, pudiendo ser difícil de controlar y pudiendo obtener tasas de renovación bajas cuando las condiciones meteorológicas no sean adecuadas.
- No se realiza el filtrado del aire como en otros tipos de ventilación.
- Dificultad para controlar la dirección del flujo de aire, esto puede ser interesante, por ejemplo, en un lugar en el que se esté produciendo algún gas indeseado y se requiera su expulsión al exterior.

Estos inconvenientes, entre otros, en muchas ocasiones hacen imprescindible el empleo de otros tipos de ventilación con mayores consumos energéticos y mayor coste económico de instalación; pero que aporten una fiabilidad sostenida en el tiempo.

2.3. Simulaciones de CFD

En la actualidad, la dinámica de fluidos computacional ha cobrado una importante relevancia en la industria por su potencial en diversos ámbitos y aplicaciones, logrando reducir significativamente los costes en la experimentación y el diseño (Norton *et al.*, 2007). Esto ha sido posible gracias a los avances tecnológicos de los ordenadores, ya que son capaces de realizar un gran número de cálculos en un espacio muy corto de tiempo; y, también, al desarrollo de algoritmos para resolver problemas físicos en dichos ordenadores. Además, el uso del CFD también nos permite reducir los tiempos de los ensayos, ya que, si se hicieran de manera tradicional los tiempos serían considerablemente mayores. Por ejemplo, en la industria de la automoción, CFD permite ejecutar ensayos en el túnel del viento, de esta manera, simplificamos mucho dichos ensayos consiguiendo reducir los tiempos y los costos (Kataoka *et al.*, 2020).

La dinámica computacional de fluidos (CFD), comprende las diversas técnicas capaces de predecir el comportamiento de los fluidos, todo ello de manera informatizada mediante simulaciones. Abarca una gran cantidad de aplicaciones, en la industria y también fuera de ella, algunos ejemplos pueden ser: aerodinámica de vehículos, turbomáquinas, planificación y gestión de recursos hídricos, refrigeración en motores y procesos químicos (Iranzo, 2019).

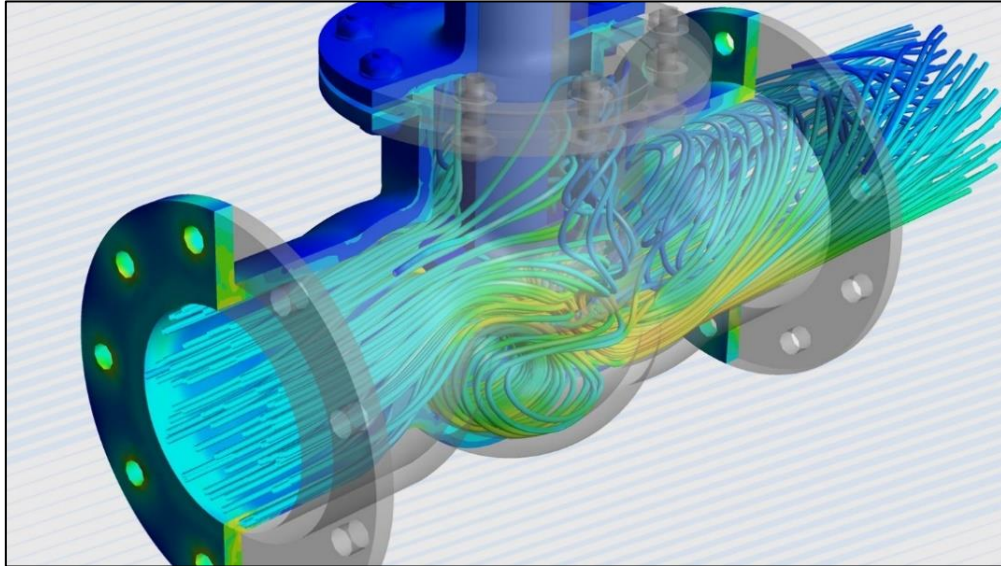


Figura 9. Simulación mediante CFD del comportamiento de un fluido en el interior de una tubería (ANSYS, 2021).

Como hemos mencionado anteriormente, CFD nos permite reducir de manera significativa los tiempos y los costes de los ensayos, además, ofrece la posibilidad de poder llevar a cabo ensayos que serían muy difíciles de realizar experimentalmente, o incluso imposibles algunos de ellos. También nos permite realizar ensayos simulando condiciones peligrosas fuera de los límites habituales de funcionamiento. Algunas aplicaciones de estudios reales en relación con este TFG son, por ejemplo: el diseño de los sistemas de ventilación de edificios (Meiss *et al.*, 2016), la mejora de la ventilación en una habitación de hospital (Méndez *et al.*, 2008), estudio de la ventilación en instalaciones avícolas (Osorio Saraz *et al.*, 2012) y la evaluación del confort térmico en un aula (Angelopoulos *et al.*, 2017).

Los programas de CFD se basan en un proceso que se denomina *discretización espacial* mediante el cual se divide el sistema a estudiar en pequeños elementos donde se calculan las diferentes variables a estudiar. Reemplaza el clásico problema de mecánica de fluidos que se define sobre un *dominio continuo* por un *dominio discreto*. En el discreto, se configura una malla con un número finito de puntos (nodos) en los que se estudian las distintas variables del fluido; a diferencia del continuo que cada variable del fluido se define en todos los puntos del espacio (Blazek, 2015). La CFD permite utilizar las ecuaciones que rigen el movimiento del fluido para una amplia gama de situaciones complejas, proporcionando predicciones cuantitativas. Las ecuaciones de fluidos se reemplazan por aproximaciones discretas en puntos de la malla numérica que deben estar lo suficientemente cerca como para que la solución sea independiente del espaciado entre los puntos (Tyggvason, 2016).

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una ciencia que, con la ayuda de potentes ordenadores, produce predicciones cuantitativas de fenómenos de flujo de fluidos basadas en las leyes de conservación (conservación de masa, cantidad de movimiento, energía, sustancias transportadas y variables turbulentas) que rigen el movimiento de fluidos. CFD ha aumentado en importancia y en precisión; sin embargo, hay que tener en cuenta que sus predicciones nunca son completamente exactas (Hu, 2012).

Para llevar a cabo un análisis completo en CFD debemos de desarrollar una serie de etapas de manera general: en primer lugar, planteamos el problema y definimos los objetivos, en segundo lugar, procedemos a la creación de un modelo sólido en el que generamos el mallado, establecemos las condiciones de contorno y demás propiedades del dominio y, en tercer lugar, tiene lugar la solución numérica del problema planteado y su análisis y comparación con otras simulaciones, con otros ensayos experimentales o con resultados tabulados para proceder a su validación (Fernández del Olmo, 2013).

Las ecuaciones discretas se derivan utilizando elementos finitos o volúmenes finitos, uniendo los diferentes puntos de la malla numérica. Las estrategias de solución que utilizan una malla estructurada regular dan como resultado esquemas numéricos simples, precisos y robustos que son adecuados para geometrías rectangulares. El mallado es una de las etapas más delicadas del proceso de desarrollo del modelo numérico (Fig. 10. Sin embargo, estos esquemas pueden extenderse a dominios más complejos utilizando cuadrículas ajustadas al cuerpo y ecuaciones mapeadas (Tyggvason, 2016).

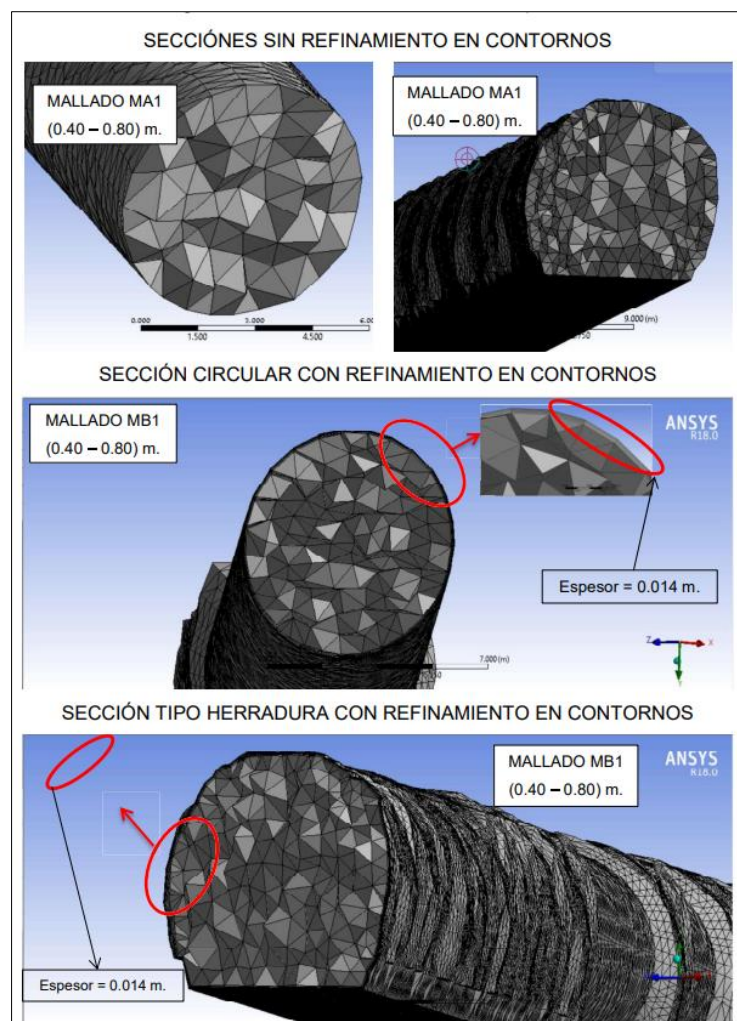


Figura 10. Diferentes técnicas de mallado en Ansys de un conducto de presión instalado en una sopladora (Dávalos Fassler, 2020).

El desarrollo de una simulación de CFD requiere tomar ciertas decisiones como la realización del modelado en dos o tres dimensiones, considerar o no los efectos de la temperatura ambiente, etcétera. Para tomar estas decisiones correctamente se debe de tener bastante experiencia, ya que hasta en los modelos más sencillos nos vemos obligados a realizar algunas hipótesis para simplificarlo

y hacerlo más manejable. Pero debemos de ser conscientes en todo momento de las hipótesis que hagamos, ya que esto influirá en la calidad de la solución aportada por nuestra simulación, si asumimos demasiadas hipótesis, la solución obtenida no podrá ser considerada como absolutamente válida, sino que solo tendrá validez cuando ocurran dichas hipótesis. Si, por el contrario, asumimos muy pocas hipótesis, la solución de nuestra simulación podrá considerarse como válida para todos los casos que hayamos planteado del problema que pretendemos resolver.

3. Especificaciones técnicas

3.1. Normativa de obligado cumplimiento

La normativa aplicable que nos incumbe en cuanto a ventilación y calidad de aire está recogida en los siguientes documentos:

- Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) (BOE, 2007).
- Documento Básico de Salubridad del Código Técnico de la Edificación (CTE DB-HS) (BOE, 2019).

La sección 3 del CTE DB-HS se aplica, en los edificios de viviendas, al interior de las mismas, los almacenes de residuos, los trasteros, los aparcamientos y garajes; y, en los edificios de cualquier otro uso, a los aparcamientos y los garajes (se considera que forman parte de los aparcamientos y garajes las zonas de circulación de los vehículos) y, para locales de cualquier otro tipo se considera que se cumplen las exigencias básicas si se observan las condiciones establecidas en el RITE. Concretamente, los artículos que son de aplicación a este TFG son el IT 1.1.4.1 y el IT 1.1.4.2 del RITE; y la sección 3 del CTE DB-HS.

La exigencia de calidad térmica del ambiente se considera satisfecha en el diseño y dimensionado de la instalación térmica, si los parámetros que definen el bienestar térmico, como la temperatura operativa, humedad relativa, velocidad media del aire e intensidad de la turbulencia, asimetrías radiantes, gradiente vertical y temperatura del suelo se mantienen en la zona ocupada dentro de los valores establecidos en la *Instrucción Técnica IT 1. Diseño y Dimensionado*, del RITE (BOE, 2007):

▪ **Temperatura operativa y humedad relativa** (*IT 1.1.4.1.2 Temperatura operativa y humedad relativa*)

1. Las condiciones interiores de diseño de la temperatura operativa y la humedad relativa se fijarán con base en la actividad metabólica de las personas, su grado de vestimenta y el porcentaje estimado de insatisfechos (PPD), según los siguientes casos:
 - a) Para personas con actividad metabólica sedentaria de 1,2 met, con grado de vestimenta de 0,5 clo en verano y 1 clo en invierno y un PPD (porcentaje de personas insatisfechas) menor al 10 %, los valores de la temperatura operativa y de la humedad relativa, asumiendo un nivel de velocidad de aire bajo (<0.1 m/s), estarán comprendidos entre los límites indicados en la tabla 1.

Tabla 1. Condiciones interiores de diseño según el RITE (BOE, 2007).

Condiciones interiores de diseño		
Estación	Temperatura operativa °C	Humedad relativa %
Verano	23...25	45...60
Invierno	21...23	40...50

- b) Para valores diferentes de la actividad metabólica, grado de vestimenta, velocidad del aire y PPD del apartado a) es válido el cálculo de la temperatura operativa y la humedad relativa realizado por el procedimiento indicado en la norma UNE-EN ISO 7730.

2. Al cambiar las condiciones exteriores la temperatura operativa se podrá variar entre los dos valores calculados para las condiciones extremas de diseño. Se podrá admitir una humedad relativa del 35 % en las condiciones extremas de invierno durante cortos períodos de tiempo.

▪ **Velocidad media del aire** (*IT 1.1.4.1.3 Velocidad media del aire*)

1. La velocidad del aire en la zona ocupada se mantendrá dentro de los límites de bienestar, teniendo en cuenta la actividad de las personas y su vestimenta, así como la temperatura del aire y la intensidad de la turbulencia.

2. La velocidad media admisible del aire en la zona ocupada (V), se calculará de la forma siguiente:

Para valores de la temperatura seca t del aire dentro de los márgenes de 20 °C a 27 °C, se calculará con las siguientes ecuaciones:

- a) Con difusión por mezcla, intensidad de la turbulencia del 40 % y PPD por corrientes de aire del 15 %:

$$V = \frac{t}{100} - 0,07 \quad [m/s] \quad (1)$$

- b) Con difusión por desplazamiento, intensidad de la turbulencia del 15 % y PPD por corrientes de aire menor que el 10 %:

$$V = \frac{t}{100} - 0,10 \quad [m/s] \quad (2)$$

3. La velocidad podrá resultar mayor, solamente en lugares del espacio que estén fuera de la zona ocupada, dependiendo del sistema de difusión adoptado o del tipo de unidades terminales empleadas.

▪ **Categorías de la calidad del aire** (*IT 1.1.4.2.2 Categorías de la calidad del aire en función del uso de los edificios*)

En función del uso del edificio o local, la categoría de calidad del aire interior (IDA) que se deberá alcanzar será, como mínimo, la siguiente:

- IDA 1 (aire de óptima calidad): hospitales, clínicas, laboratorios y guarderías.
- IDA 2 (aire de buena calidad): oficinas, residencias (locales comunes de hoteles y similares, residencias de ancianos y de estudiantes), salas de lectura, museos, salas de tribunales, **aulas de enseñanza** (este sería nuestro caso) y asimilables y piscinas.
- IDA 3 (aire de calidad media): edificios comerciales, cines, teatros, salones de actos, habitaciones de hoteles y similares, restaurantes, cafeterías, bares, salas de fiestas, gimnasios, locales para el deporte (salvo piscinas) y salas de ordenadores.
- IDA 4 (aire de calidad baja).

▪ **Caudal mínimo del aire exterior de ventilación** (*IT 1.1.4.2.3 Caudal mínimo del aire exterior de ventilación*)

1. El caudal mínimo de aire exterior de ventilación, necesario para alcanzar las categorías de calidad de aire interior que se indican en el apartado 1.4.2.2, se calculará de acuerdo con alguno de los cinco métodos que se indican a continuación.

A. *Método indirecto de caudal de aire exterior por persona.*

- a) Se emplearán los valores de la tabla 2 cuando las personas tengan una actividad metabólica de alrededor 1,2 met, cuando sea baja la producción de sustancias contaminantes por fuentes diferentes del ser humano y cuando no esté permitido fumar.
- b) Para locales donde esté permitido fumar, los caudales de aire exterior serán, como mínimo, el doble de los indicados en la tabla 2.
- c) Cuando el edificio disponga de zonas específicas para fumadores, estas deben consistir en locales delimitados por cerramientos estancos al aire, y en depresión con respecto a los locales contiguos.

Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

Tabla 2. Caudales de aire exterior, en dm³/s por persona según el RITE (BOE, 2007).

Categoría	dm ³ /s por persona
IDA 1	20
IDA 2	12,5
IDA 3	8
IDA 4	5

B. Método directo por calidad del aire percibido

En este método basado en el informe CR 1752 (método olfativo), los valores a emplear son los de la tabla 3.

Tabla 3. Calidad del aire percibido, en decipols según el RITE (BOE, 2007).

Categoría	dp
IDA 1	0,8
IDA 2	1,2
IDA 3	2,0
IDA 4	3,0

C. Método directo por concentración de CO₂

- a) Para locales con elevada actividad metabólica (salas de fiestas, locales para el deporte y actividades físicas, etc.), en los que no está permitido fumar, se podrá emplear el método de la concentración de CO₂, buen indicador de las emisiones de biofluentes humanos. Los valores se indican en la tabla 4.

Tabla 4. Concentración de CO₂ en los locales según el RITE (BOE, 2007).

Categoría	ppm (*)
IDA 1	350
IDA 2	500
IDA 3	800
IDA 4	1.200

(*) Concentración de CO₂ (en partes por millón en volumen) por encima de la concentración en el aire exterior.

▪ **Calidad del aire interior (CTE DB-HS, Exigencia básica HS 3: Calidad del aire interior) (BOE, 2019)**

1. Los edificios dispondrán de medios para que sus recintos se puedan ventilar adecuadamente, eliminando los contaminantes que se produzcan de forma habitual durante el uso normal de los edificios, de forma que se aporte un caudal suficiente de aire exterior y se garantice la extracción y expulsión del aire viciado por los contaminantes.
2. Para limitar el riesgo de contaminación del aire interior de los edificios y del entorno exterior en fachadas y patios, la evacuación de productos de combustión de las instalaciones térmicas se producirá, con carácter general, por la cubierta del edificio, con independencia del tipo de combustible y del aparato que se utilice, de acuerdo con la reglamentación específica sobre instalaciones térmicas.

▪ **Caracterización y cuantificación de la exigencia** (*CTE DB-HS, Caracterización y cuantificación de la exigencia*) (BOE, 2019)

En los locales habitables de las viviendas debe aportarse un caudal de aire exterior suficiente para conseguir que en cada local la concentración media anual de CO₂ sea menor que 900 ppm y que el acumulado anual de CO₂ que exceda 1.600 ppm sea menor que 500.000 ppm·h, en ambos casos con las condiciones de diseño del apéndice C.

1. Además, el caudal de aire exterior aportado debe ser suficiente para eliminar los contaminantes no directamente relacionados con la presencia humana. Esta condición se considera satisfecha con el establecimiento de un caudal mínimo de 1,5 l/s por local habitable en los periodos de no ocupación.
2. Para los locales no habitables incluidos en el ámbito de aplicación debe aportarse al menos el caudal de aire exterior suficiente para eliminar los contaminantes propios del uso de cada local. En el caso de trasteros, sus zonas comunes y almacenes de residuos los contaminantes principales son la humedad, los olores y los compuestos orgánicos volátiles. En el caso de los aparcamientos y garajes son el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno.

▪ **Condiciones generales de los sistemas de ventilación** (*CTE DB-HS, Condiciones generales de los sistemas de ventilación*) (BOE, 2019)

Vamos a adjuntar parte de la normativa sobre almacenes de residuos, que es lo más cercano a nuestro laboratorio cuando está exento de ocupación. En los almacenes de residuos debe disponerse un sistema de ventilación que puede ser natural, híbrida o mecánica.

A) Ventilación natural

1. Cuando el almacén se ventile a través de aberturas mixtas, éstas deben disponerse al menos en dos partes opuestas del cerramiento, de tal forma que ningún punto de la zona diste más de 15 m de la abertura más próxima.
2. Cuando los almacenes se ventilen a través de aberturas de admisión y extracción, éstas deben comunicar directamente con el exterior y la separación vertical entre ellas debe ser como mínimo 1,5 m.

B) Ventilación híbrida y mecánica

1. Para ventilación híbrida, las aberturas de admisión deben comunicar directamente con el exterior.
2. Cuando el almacén esté compartimentado, la abertura de extracción debe disponerse en el compartimento más contaminado, la de admisión en el otro u otros y deben disponerse aberturas de paso entre los compartimentos.
3. Las aberturas de extracción deben conectarse a conductos de extracción.
4. Los conductos de extracción no pueden compartirse con locales de otro uso.

▪ **Condiciones particulares de los elementos** (*CTE DB-HS, Condiciones particulares de los elementos*) (BOE, 2019)

Las ventanas y puertas exteriores que se dispongan para la ventilación natural complementaria deben estar en contacto con un espacio que tenga las mismas características que el exigido para las aberturas de admisión.

3.2. Recomendaciones contra el COVID-19

Tras el confinamiento domiciliario se fue sustanciando la idea de que la principal vía de transmisión del SARS-CoV-2 es a través del contacto directo con las microgotas exhaladas por los sujetos infectados (ya sea hablando, tosiendo, estornudando, etc.), así como la presencia en el aire de partículas de menor tamaño capaz de permanecer en el aire un tiempo determinado como mencionamos anteriormente (GTM, 2020). Todo esto hizo necesario que se dieran a conocer a la población una serie de medidas y recomendaciones para frenar la propagación del virus en la medida de lo posible.

Las principales medidas de prevención son las siguientes (MS-MEFP, 2020):

- **Lavado y desinfección de manos:** el lavado de manos debe de realizarse de la forma correcta según la técnica de la OMS, en la que se indica que se tienen que frotar entre 20 y 60 segundos en función de la suciedad. Es importante que sean lavadas con agua y jabón, o con una solución a base de alcohol al 70 %, debido a que se demostró que el virus puede permanecer durante días en ciertas superficies, y que con una solución de alcohol de entre el 62 y 71 % disminuye la infectividad después de su exposición de al menos un minuto, por ello es importante lavarse las manos frecuentemente después de haber estado en contacto con alguna superficie u objeto (Mojica y Morales, 2020).



Figura 11. Principales medidas de prevención contra el SARS-CoV-2 (MS, 2021).

- **Evitar tocarse la cara:** si no nos tocamos los ojos, la boca ni la nariz evitamos considerablemente el riesgo de contagio.
- **Distancia de seguridad:** esta es una de las principales medidas de prevención del virus. Hace referencia a la limitación de las personas con las que se tiene contacto y al distanciamiento social, es decir, a mantener una distancia prudencial para evitar que las microgotas que pueden emitir los sujetos infectados alcancen a los sujetos sanos. De forma general, se mantendrá una distancia entre los alumnos de al menos 1,5 metros dentro de los centros de enseñanza (Fig. 11).

- **Uso de mascarilla:** se debe usar la mascarilla siempre en interiores y en exteriores también cuando no sea posible el distanciamiento social. El uso de mascarilla es obligatorio para todo el profesorado con independencia del mantenimiento de la distancia interpersonal. Con la mascarilla logramos parar gran cantidad de microgotas y partículas que pueden contener el virus.
- **Limpieza y desinfección de superficies:** como hemos mencionado en el primer punto de lavado de manos, las soluciones de alcohol disminuyen en gran medida la infectividad (también podemos usar cloro diluido u otros desinfectantes), por lo tanto, es de suma importancia desinfectar con frecuencia las superficies y objetos que usamos diariamente y evitar compartirlos con otras personas.

Como sabemos que la principal vía de propagación es la aérea en espacios interiores, en lo que respecta a la ventilación hay también una serie de medidas, con importante aplicación en lugares como los colegios o las universidades. La *guía para ventilación en aulas* de IDAEA-CSIC (Fig. 12), propone diversas soluciones y recomendaciones para una correcta ventilación en los centros de enseñanza (IDAEA-CSIC, 2021):

- Siempre que sea posible es preferible realizar las actividades al aire libre, y si es inevitable que sea en interior, es recomendable que la ventilación sea natural y cruzada a ser posible (ventanas y puertas enfrentadas).
- En el caso de que la ventilación natural no sea suficiente, podemos suplir esta deficiencia con extractores o impulsores de aire individuales. La guía de la Universidad de Harvard recomienda entre 5 y 6 renovaciones de aire por hora (CSIC, 2020). Cuando la ventilación forzada sea centralizada, debemos de incrementar la tasa de aire procedente del exterior y evitar la recirculación.
- Si no es posible lo anterior deberemos de purificar el aire con ayuda de filtros HEPA (*High Efficiency Particle Arresting*).
- Es importante ventilar las aulas antes y después de su ocupación para renovar por completo el aire que haya en su interior.
- En el caso de ventilación forzada, las salidas hacia el exterior del aire no pueden estar próximas a la entrada para evitar su reintroducción al interior.

Una forma de establecer el nivel de calidad del aire en el interior de edificios es estableciendo un caudal de ventilación necesario en función del nivel de ocupación. Así se considera un valor adecuado para el caudal de aire ventilado de unos 14 litros por persona y segundo (IDAEA-CSIC, 2020). En realidad, el riesgo cero no existe, pero cuanto mayor es la tasa de ventilación menor es la concentración de aerosoles portadores del virus, y por tanto también es menor el riesgo de contagio. Esto se debe a que la concentración de aerosoles en el aire exterior es nula en condiciones normales (cuando no hay una fuente de aire contaminado hacia el exterior en la proximidad de los puntos de entrada del aire de ventilación).

De igual forma, la concentración de CO₂ en el exterior de los edificios suele ser constante, de aproximadamente de unas 420 ppm, aunque precisamente el confinamiento producido como respuesta a la pandemia del COVID-19 ha producido reducciones temporales de dicha concentración (Le Quéré *et al.*, 2020).

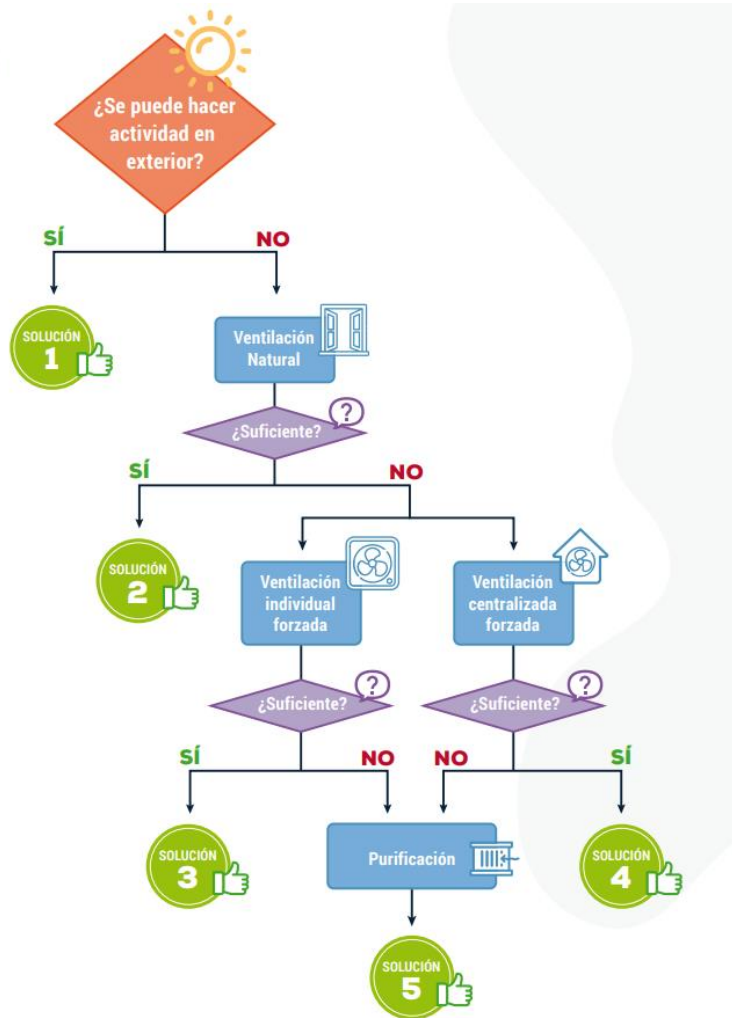


Figura 12. Diagrama de flujo para búsqueda de soluciones en la ventilación (IDAEA-CSIC, 2020).

La estabilidad de la concentración exterior del CO₂ permite que se pueda estimar el nivel de ventilación de un local mediante equipos de medida de la concentración de CO₂. En espacios interiores este valor se puede incrementar considerablemente debido a las emisiones producidas por la respiración de las personas, por ello, con la ventilación, conseguimos renovar el aire y evitar altos valores. Existe por tanto una relación directa entre los niveles de concentración de CO₂ y el riesgo de contagio por COVID-19 (Di Gilio *et al.*, 2021). A partir de la medida de la concentración de CO₂ y con el objetivo de asegurar un nivel adecuado de ventilación en los centros de enseñanza, Di Gilio *et al.* (2021) establecieron una clasificación con 4 niveles de riesgo y sus correspondientes acciones correctivas. El valor de seguridad por debajo del cual no es necesario realizar acciones correctoras lo establecieron en 700 ppm (Di Gilio *et al.*, 2021).

Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

4. Material y métodos

4.1. Modelo numérico de CFD

4.1.1. Ecuaciones de conservación

Las ecuaciones que describen la transferencia de calor y el movimiento de los fluidos se conocen con el nombre de Navier-Stokes, en honor a los físicos Claude-Louis Navier y Gabriel Stokes.

Cuando se aplican a un medio continuo de un fluido, estas leyes de conservación relacionan la tasa de cambio de una propiedad del fluido con unas determinadas fuerzas externas. Las diferentes leyes implicadas son (Norton, 2006):

1. La ley de continuidad (de conservación de la masa), establece que los flujos de masa que entran en un elemento fluido deben equilibrarse exactamente con los que salen.
2. La ley de conservación de la cantidad de movimiento (segunda ley del movimiento de Newton), establece que la suma de las fuerzas externas que actúan sobre una partícula fluida es igual a su tasa de cambio de la cantidad de movimiento lineal.
3. La ley de conservación de la energía (primera ley de la termodinámica), establece que la tasa de cambio de energía de una partícula fluida es igual a la adición de calor y al trabajo realizado sobre la partícula.

Por lo tanto, para hacer cumplir las leyes de conservación mencionadas, los programas de CFD aplican las siguientes ecuaciones (Ansys, 2013):

- **Ecuación de continuidad**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (3)$$

dónde ρ es la densidad del fluido [kg/m³], t es el tiempo, \vec{v} es el vector velocidad [m/s]. S_m representa cualquier fuente definida por el usuario.

La ecuación 3 es la forma general de la ecuación de conservación de la masa y es válida tanto para fluidos incompresibles como compresibles.

- **Ecuación de cantidad de movimiento**

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4)$$

donde P es la presión estática [Pa], $\bar{\tau}$ es el tensor de tensión, y $\rho \vec{g}$ y \vec{F} son la fuerza gravitacional del cuerpo y las fuerzas externas al cuerpo [N/m²], respectivamente. \vec{F} también puede contener otros términos dependiendo del modelo, como en el caso de medios porosos y cuando se añaden fuentes definidas por el usuario.

- **Ecuación energética**

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\alpha_k \vec{v}_k (\rho_k E_k + \rho)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (5)$$

Donde T es la temperatura del fluido [K], k_{eff} es la conductividad efectiva ($\sum \alpha_k (k_k + k_t)$) [W/m·K] y k_t es la conductividad térmica turbulenta, definida según el modelo de turbulencia utilizado. El primer término del lado derecho de la ecuación 3 representa la transferencia de energía debida a la conducción. S_E incluye cualquier otra fuente de calor volumétrica.

▪ **Ecuaciones de transporte para el modelo estándar k - ε**

La energía cinética turbulenta k y su velocidad de disipación ε , se obtienen a partir de las siguientes ecuaciones de transporte:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (7)$$

En estas ecuaciones, G_k representa la generación de energía cinética de turbulencia debido a los gradientes de velocidad media. G_b es la generación de energía cinética de turbulencia debido a la flotabilidad. Y_M representa la contribución de la dilatación fluctuante en la turbulencia compresible a la tasa de disipación general. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ y $C_{3\varepsilon}$ son constantes. σ_k y σ_ε son los números de turbulencia de Prandtl para k y ε , respectivamente. S_k y S_ε son términos fuentes definidos por el usuario.

▪ **Ecuaciones de transporte de sustancias**

El algoritmo de solución de ANSYS/Fuent también permite calcular la fracción de masa (o fracción molar) de los diferentes componentes de un fluido, mediante la correspondiente ecuación de conservación de las sustancias:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{CO_2}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{CO_2}) = -\nabla \cdot \vec{J}_{CO_2} + S_{CO_2} \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{H_2O}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{H_2O}) = -\nabla \cdot \vec{J}_{H_2O} + S_{H_2O} \quad (9)$$

Donde Y_{CO_2} y Y_{H_2O} son respectivamente las concentraciones del CO_2 y del vapor de agua en el aire (fracciones de masa) en [kg/kg]. S_{CO_2} y S_{H_2O} son las posibles fuentes de CO_2 y vapor dentro de los elementos de la malla numérica. En nuestro caso se ha utilizado como fluido una mezcla de aire seco, vapor de agua y CO_2 . Dado que la suma de las concentraciones de las tres sustancias tiene siempre que ser igual a 1, solo se aplican las ecuaciones de conservación (8 y 9) a dos de ellas, calculando la tercera como diferencia con respecto a la unidad. Dado que las concentraciones de CO_2 y vapor de agua son mucho menores que las del aire seco, es recomendable seleccionar como sustancias de cálculo estas dos, siendo la concentración de aire seco la que se calcula de forma indirecta. Para ello es necesario seleccionar en último lugar el aire seco cuando se define el fluido como mezcla de los tres.

4.1.2. Mallado del modelo

Para la simulación con ordenador se ha utilizado el programa de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) Ansys-Fluent, concretamente en su versión de descarga libre 2021 R2 Student (<https://www.ansys.com/academic/students>). A la hora de realizar el modelo 3D se han tenido en cuenta todos los elementos de mayor tamaño que pueden influir en el movimiento del aire, sin profundizar en los objetos de tamaño más reducido que se encontraban por ejemplo sobre las mesas.

La geometría del modelo se implementó primeramente en el programa de diseño CAD 3D Solidworks y posteriormente se importó a la extensión *SpaceClaim* de Ansys como podemos apreciar en la figura 13.

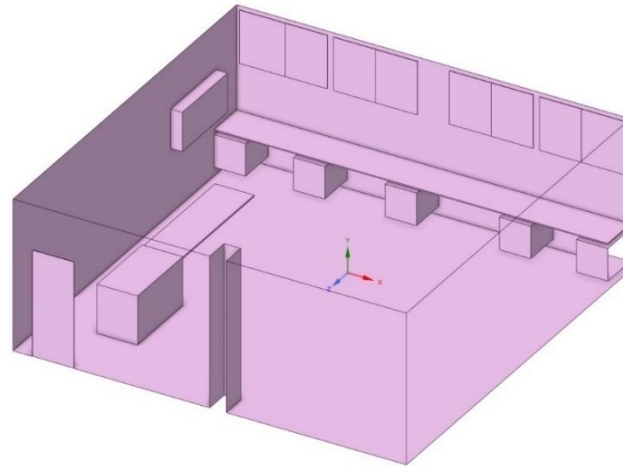


Figura 13. Geometría del modelo numérica importada a SpaceClaim-Ansys desde el programa de CAD Solidworks.

Como se ha comentado anteriormente, para llevar a cabo la simulación de CFD necesitamos tener un número de puntos finitos, ya que Ansys/Fluent trabaja con el método de volúmenes finitos (Molina-Aiz *et al.*, 2010). El mallado de nuestro modelo se ha realizado con la extensión de Ansys denominada *Mesh*.

Dentro de esta extensión, lo primero que hemos definido son los niveles de mallado de las entradas y salidas de aire: hemos escogido un tamaño de malla inferior al resto de elementos (0,05 m) haciendo uso del comando *Face Sizing* para aumentar el nivel de detalle en la resolución del mallado en la puerta y las ventanas (Fig. 14) al tratarse de puntos en los que el flujo de aire va a ser mayor, y en los que tiene mayor interés saber el valor de las variables calculadas (temperatura, velocidad, humedad y concentración de CO₂).

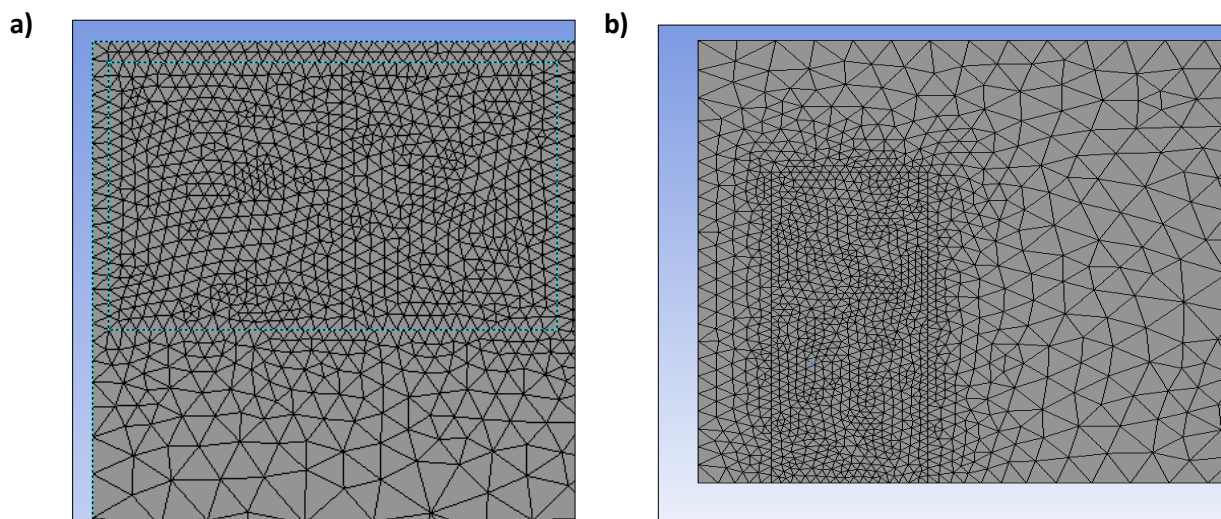


Figura 14. Mallado de las ventanas (a) y la puerta (b) mediante el uso del comando *Face Sizing*.

En segundo lugar, hemos definido el tamaño de mallado de las zonas de unión entre el suelo y las paredes para establecer adecuadamente los puntos de unión mediante el uso del comando *Edge Sizing* con un tamaño de malla de 0,2 m (Fig. 15).

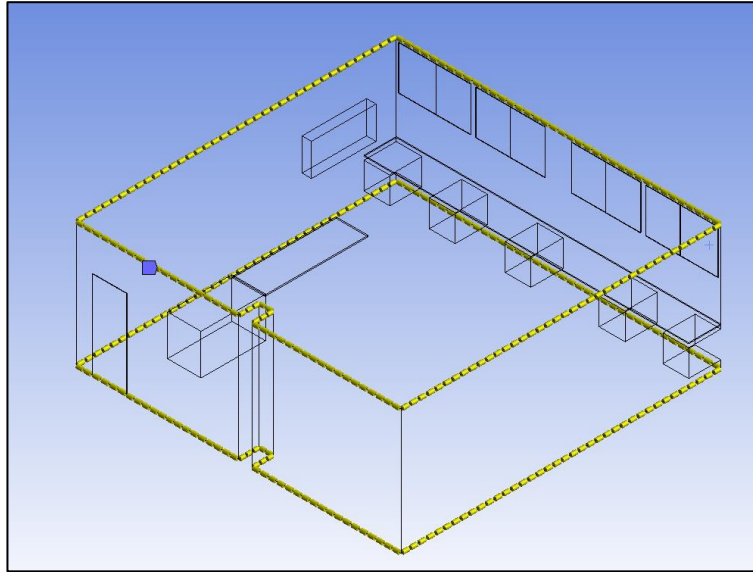


Figura 15. Mallado de la unión entre las paredes y el techo mediante el comando *Edge Sizing*.

Finalmente, se ha realizado el mallado del resto de elementos del modelo de forma predeterminada con un tamaño de malla de 0,2 m (Fig. 16).

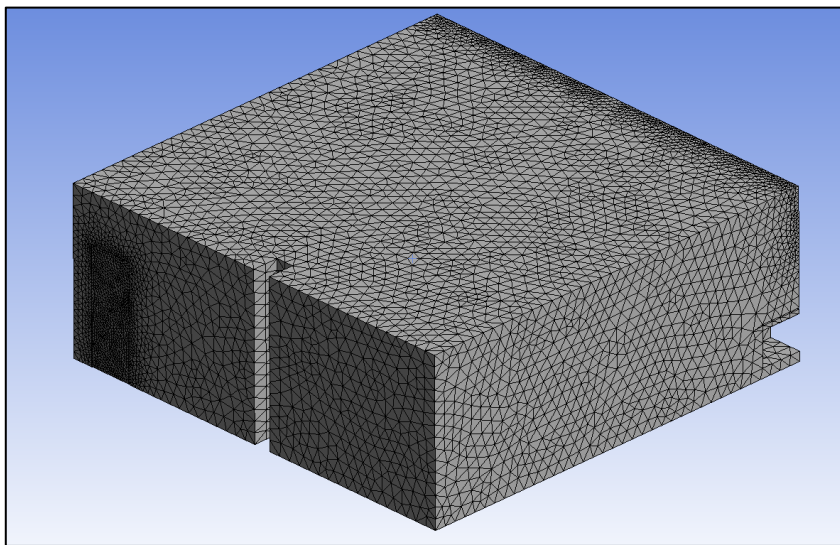


Figura 16. Mallado completo del modelo.

4.1.3. Modelo de solución

El modelo numérico está constituido por su geometría, por el mallado que establece el tamaño de los volúmenes finitos en los que se divide el espacio, por las condiciones de contorno que dan los valores conocidos en algunos puntos del dominio de cálculo, por las ecuaciones de conservación a resolver en cada volumen y por los elementos de cálculo que permiten obtener la solución (Tabla 5). En algunos casos, el trabajar con diferentes elementos de solución puede producir diferentes valores de salida del modelo, variar el tiempo de cálculo necesario para obtener una solución o incluso provocar la no convergencia del proceso de cálculo y no obtener ninguna solución (Molina-Aiz *et al.*, 2010).

Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

Tabla 5. Elementos del modelo de CFD utilizado en las simulaciones.

Elementos del modelo	Valores	
Programa de cálculo	ANSYS/FLUENT 2021 R2 Student	
Método de discretización	Elementos finitos (<i>Finite Volume Method</i> , FVM)	
Algoritmos de control		
Pressure-velocity coupling:	SIMPLE	
Opciones y algoritmos de solución		
Time:	Steady	
Space:	2D	
Formulation:	Implicit	
Solver:	Pressure Based	
Velocity Formulation:	Absolute	
Discretization schemes		
Differencing schemes		
Convergence Criteria		
Gradient:	Green-Gauss Cell Based	-
Pressure:	Body force weighted	0.001
Momentum:	2st-order upwind	0.001
Turbulent Kinetic Energy:	2st-order upwind	0.001
Specific Dissipation Rate:	2st-order upwind	0.001
H ₂ O:	2st-order upwind	1×10 ⁻⁶
CO ₂ :	2st-order upwind	1×10 ⁻⁷
Energy:	2st-order upwind	1×10 ⁻⁶
Factores de relajación en el proceso iterativo (<i>Under-Relaxation Factors</i>)		
Pressure:	0.3	
Density:	1	
Body forces:	1	
Momentum:	0.7	
Turbulent Kinetic Energy:	0.8	
Turbulent Dissipation Rate:	0.8	
Turbulent viscosity:	1	
H ₂ O:	1	
CO ₂ :	1	
Energy:	1	
Condiciones ambiente (<i>Operating Conditions</i>)		
Modelo - Valor		
Referencia		
Operating Pressure (Pa):	101325	ANSYS, 2013
Gravity g_y (m s ⁻²):	-9.81	ANSYS, 2013
Operating Temperature (K)	288.16	ANSYS, 2013
Specified operating density (kg m ⁻³)	1.225	ANSYS, 2013
Propiedades del fluido		
Material type:	Mixture-template (H ₂ O, CO ₂ y aire)	
Density (kg m ⁻³):	Incompressible-ideal gas law: $\rho=101354/(287.05 \cdot T)$	
Viscosity (kg m ⁻¹ s ⁻¹):	Sutherland law: $\mu=1.458 \times 10^{-6} \cdot T^{3/2} / (T+110.4)$	
Specific heat (J kg ⁻¹ K ⁻¹):	Mixing-law	
Thermal conductivity (Wm ⁻¹ K ⁻¹):	Constant: $k=2.42 \times 10^{-3}$	
Diffusivity (m ² s ⁻¹):	Dilute approximation	
Water vapour in air	$D_{H_2O-air}=2.178 \times 10^{-5}$	Massman, 1998
Carbon dioxide in air	$D_{CO_2-air}=1.381 \times 10^{-5}$	Massman, 1998
Modelo de turbulencia		
k-epsilon	Standard	
Near-wall treatment	Enhanced wall treatment	
Options	Thermal Effects + Viscous Heating+ Full Buoyancy	

Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

4.1.4. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno hacen referencia a los valores de las variables del aire (velocidad, temperatura, humedad y concentración de CO_2) medidos en cada una de las entradas y salidas de aire, y a la temperatura de las superficies el interior del laboratorio. En primer lugar, se implementaron las condiciones de contorno en las ventanas por las que entraba el aire exterior (Fig. 17) haciendo uso de los datos medidos experimentalmente en el laboratorio (ver apartado 4.2).

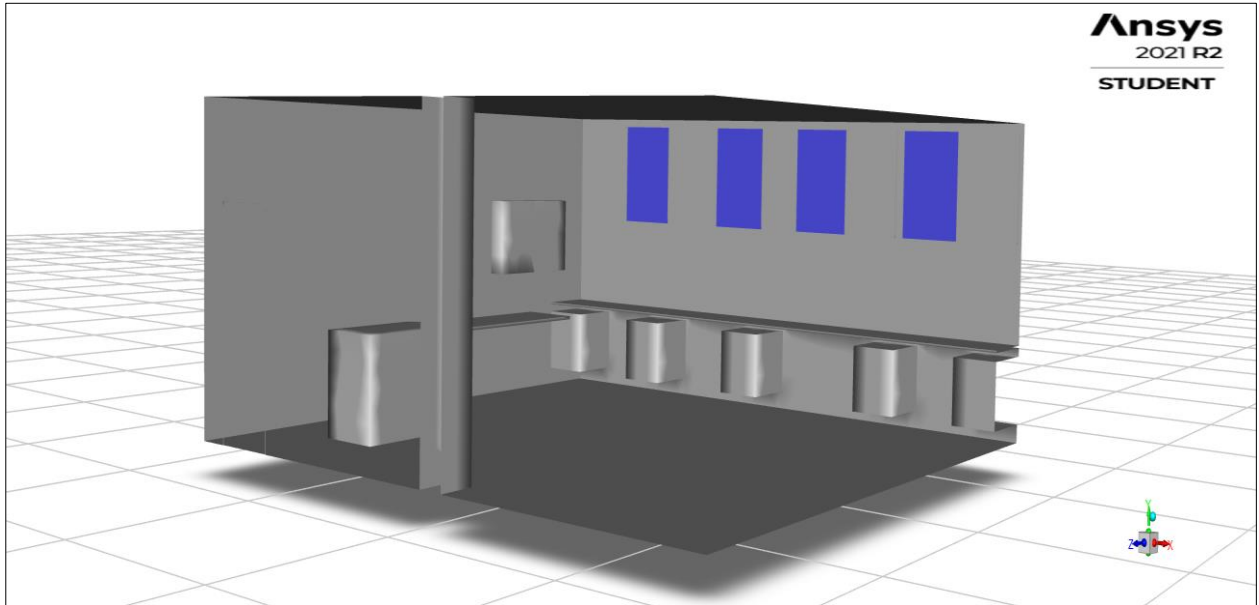


Figura 17. Entradas de aire en el modelo numérico de CFD (superficies azules).

Para modelizar la entrada del aire a través de las ventanas, se utilizó la condición de contorno *Velocity Inlet* del programa ANSYS/Fluent, que permite introducir valores de velocidad, temperatura y concentraciones de H_2O y CO_2 . Lo primero que vamos a introducir son los valores medidos con anterioridad en el laboratorio de velocidad de aire y temperatura (Fig. 18).

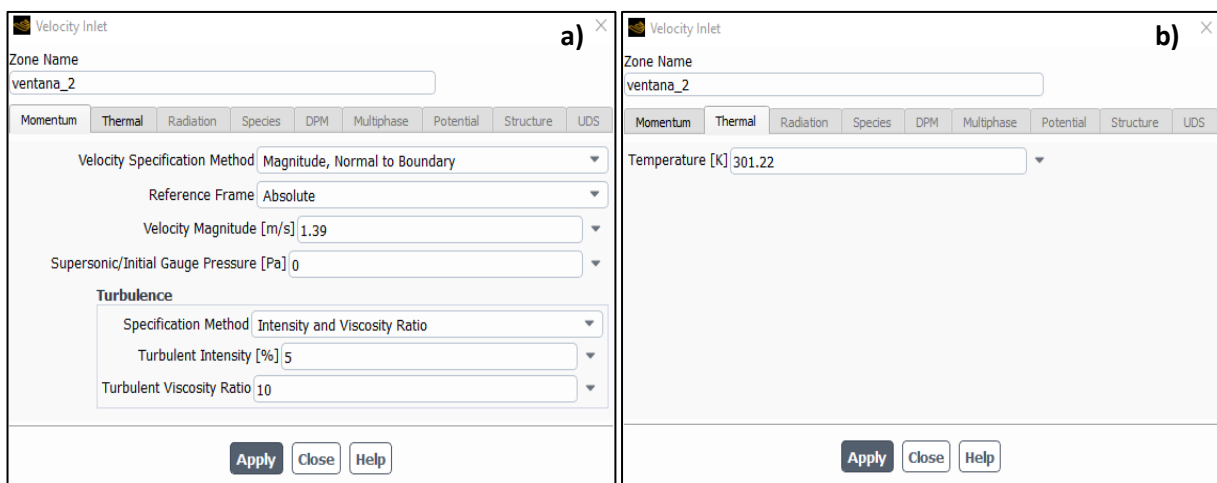


Figura 18. Implementación de la velocidad del aire (a) de entrada y su temperatura (b) mediante el comando *Velocity Inlet*.

Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

A la hora de implementar el nivel de humedad y de concentración de CO₂ nos encontramos que no se hace de una forma tan sencilla y directa. Debemos incluir como fluidos el CO₂ y el vapor de agua, para después tener la posibilidad de utilizarlos en la mezcla mediante el modelo *mixture-template* (Tabla 5) en la pestaña *species* (Fig. 19).

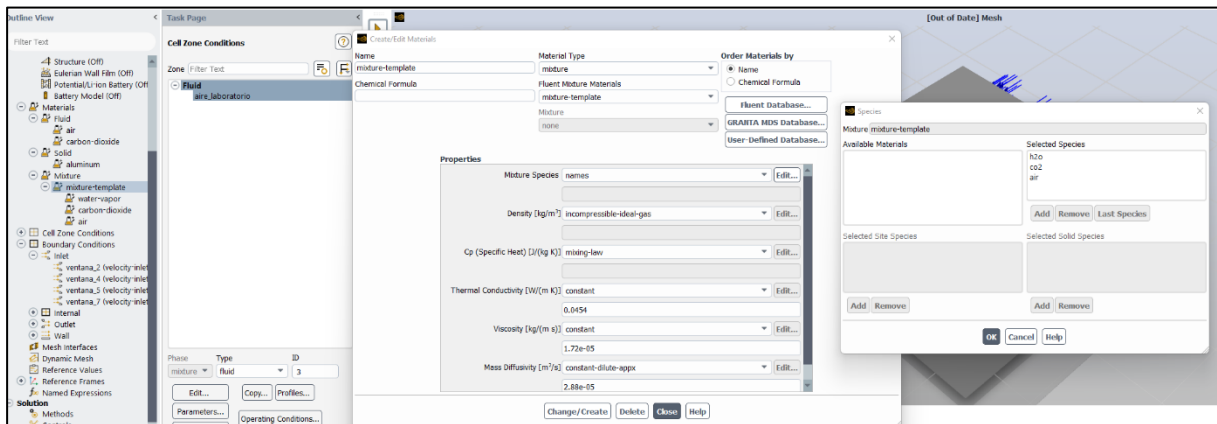


Figura 19. Configuración de la mezcla de aire, CO₂ y vapor de agua del interior de nuestro modelo en la pestaña *Species* dentro de la ventana de *Materials*.

A continuación, seleccionamos la pestaña de *species* e introducimos los valores medidos experimentalmente de fracción de masa de vapor de agua (equivalente a la humedad absoluta) y de CO₂ en fracción molar (Fig. 20).

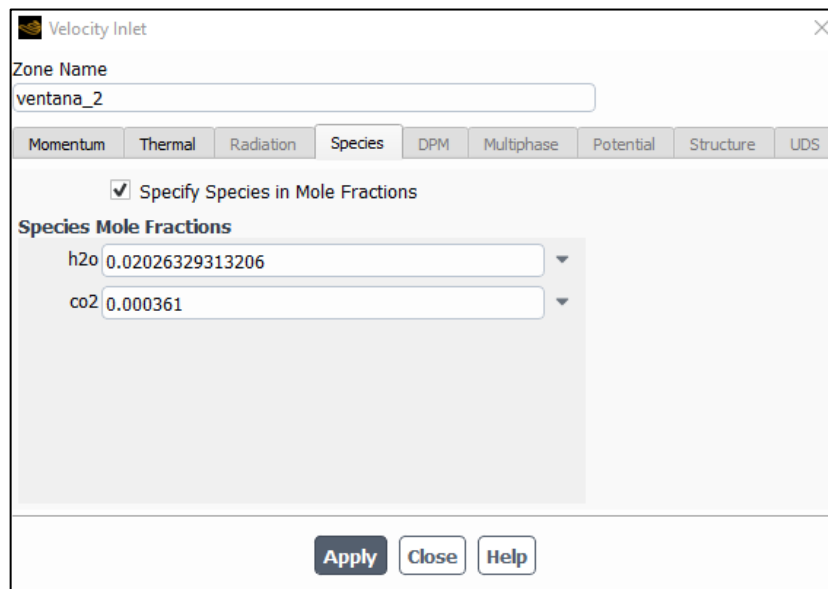


Figura 20. Implementación de la fracción de masa de vapor de agua y la fracción molar de CO₂ en la pestaña *Species* dentro de la ventana *Velocity Inlet*.

La principal salida de aire de nuestro modelo (aunque podría darse el caso que una parte del aire saliese por alguna venana si las tenemos todas abiertas) es la puerta que se encuentra en la pared Este, dando acceso al pasillo. Para asignar dicha puerta como salida le aplicamos la condición de contorno *outflow*, con una tasa de salida del 100% (suponemos que todo el aire entrante por las ventanas tendrá que salir por la puerta). En ella será donde se validen los datos de los ensayos con los tomados físicamente en el laboratorio (Fig. 21).

Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

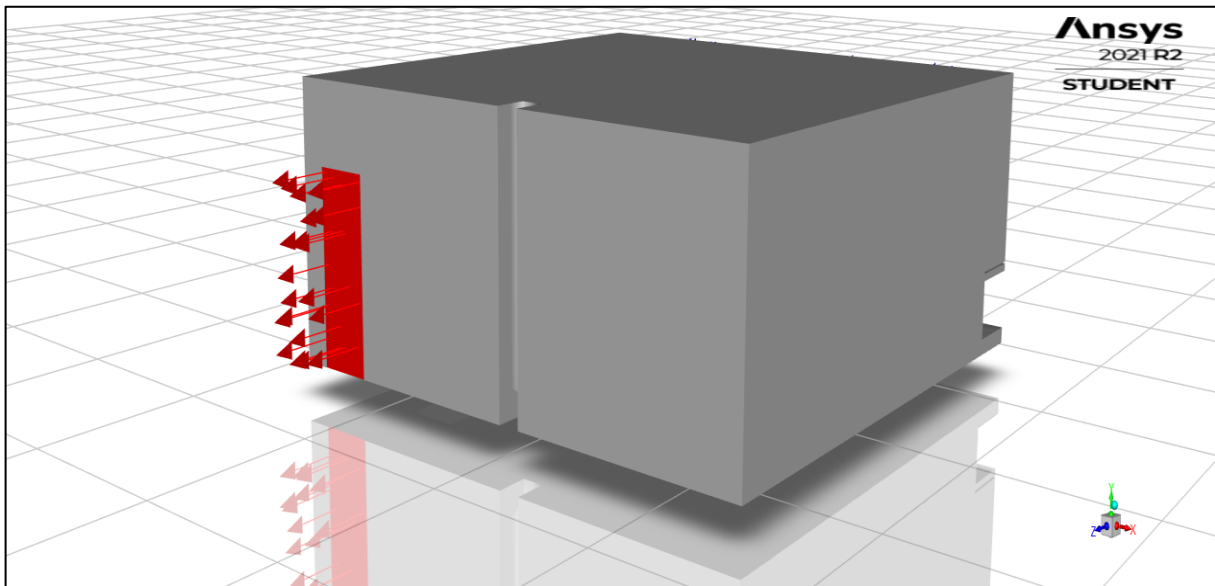


Figura 21. Salida de aire de nuestro modelo (puerta) implementada con la condición *Outflow*.

Finalmente, en el interior se introducen en Fluent las temperaturas de las distintas superficies que se midieron con el termómetro de infrarrojos. Para ello, a las paredes se les asigna la condición de contorno *Wall* y se introduce la temperatura en grados kelvin en la pestaña *Thermal* (Fig. 22).

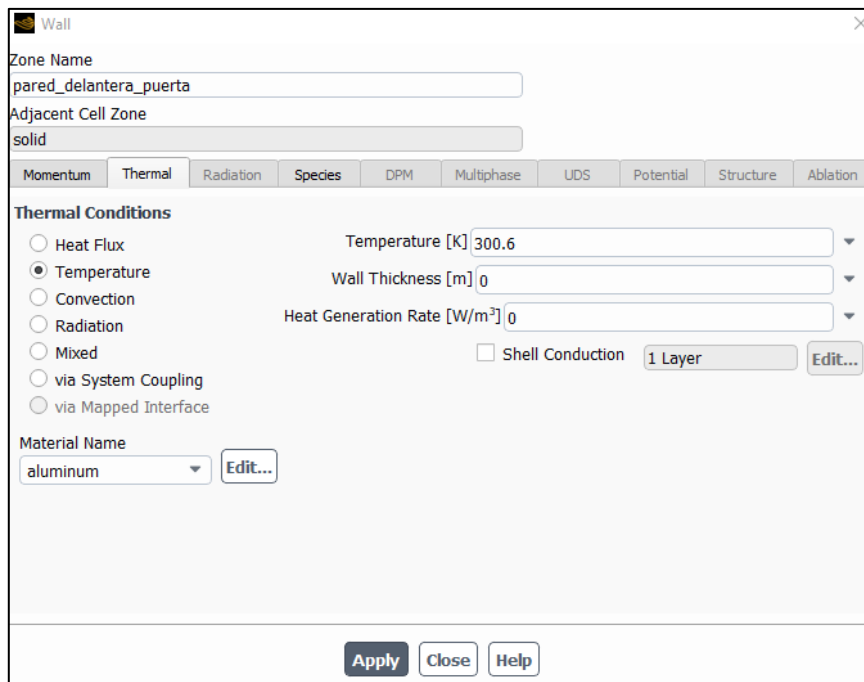


Figura 22. Temperatura de las distintas superficies implementadas con la condición *Wall* en la pestaña *Thermal*.

Para la validación del modelo se realizaron ensayos experimentales con cuatro de las ventanas abiertas. Debido a la necesidad de reducir el tiempo de medida (y evitar grandes variaciones en las condiciones climáticas exteriores, principalmente la velocidad y dirección del viento) solo se midieron los parámetros climáticos en dos de las 4 ventanas. Estos valores han sido utilizados como condiciones de contorno para las simulaciones de validación (Tabla 6).

Tabla 6. Condiciones de contorno utilizadas para los tres días de ensayo sin y con alumnos.

Superficie	Ventana Sur				Ventana Norte				
Condición	Flujo de entrada (<i>Velocity inlet</i>)				Flujo de entrada o pared (<i>Wall</i>)				
Fecha del ensayo	v [m/s]	T [°C]	x [kg/kg]	C [ppm]	v [m/s]	T [°C]	x [kg/kg]	C [ppm]	
15/09/2021	1,39	28,07	0,0127	361	0,71	27,8	0,0129	362,5	
16/09/2021	0,38	24,8	0,0148	375	0,57	24,7	0,0145	373,5	
20/09/2021	0,32	26,6	0,0131	375,5	0,10	26,5	0,0133	375,5	
Condiciones de contorno interiores									
Superficie	Suelo	Techo	Pared N	Pared E	Pared S	Pared O	Mesas	Cabezas de las personas	
Condición	Pared (<i>Wall</i>)							Fuente (<i>Source terms</i>)	
Fecha del ensayo	T_s [°C]	T_s [°C]	T_s [°C]	T_s [°C]	T_s [°C]	T_s [°C]	T_s [°C]	q_x [kg/m ³ ·s]	q_c [kg/m ³ ·s]
15/09/2021	27,125	27,125	27,35	27,45	27,375	27,775	27,125	0	0
16/09/2021	27,125	27,125	27,35	27,45	27,375	27,775	27,125	0	0
20/09/2021	26,4	27,3	26,7	26,4	26,8	26,2	26,4	0,001537	8,6077x10 ⁻⁴

Para poder aproximar mejor los caudales de aire simulados a los reales, el caudal de ventilación a través de las dos ventanas en las que no se midió la velocidad de forma experimental, se determinó como el valor medio de la diferencia entre los caudales medidos experimentalmente de salida por la puerta y de entrada por las dos ventanas centrales. El resto de condiciones de temperatura, humedad y concentración de CO₂, fueron las medidas en las dos ventanas centrales (Tabla 6).

4.1.5. Modelización de los alumnos

Los alumnos presentes en el aula producen una triple interacción con el aire a través del intercambio de energía, vapor de agua y CO₂. La energía liberada por las personas se puede modelizar de forma directa, añadiendo un término fuente de energía en el volumen de los cuerpos, o se puede realizar de forma indirecta a través de la temperatura de su superficie. Las personas durante el proceso de respiración liberan vapor de agua al ambiente, a la vez que CO₂.

La energía disipada en la respiración de los seres humanos R se puede estimar en función del peso corporal P utilizando relaciones alométricas que determinan la tasa metabólica estándar como una función de potencia del peso corporal (Peters, 1983):

$$R [W]=3,89 \cdot P [kg]^{0,79} \quad (10)$$

También se puede estimar a partir del calor medio cedido por una persona en actividad sedentaria como un estudiante sentado en clase, mediante el valor de 70 [W·m⁻²] por unidad de superficie corporal indicado por la norma UNE-EN ISO 8996 "Ergonomía del ambiente térmico. Determinación de la tasa metabólica" (AENOR, 2005). La superficie corporal también se puede estimar mediante relaciones alométricas en función del peso corporal como (Livingston y Lee, 2001):

$$S [m^2]=0,1173 \cdot P [kg]^{0,6466} \quad (11)$$

Considerando un peso medio de los estudiantes de 65 [kg], la Ec. (10) daría un valor de 105.2 [W/persona], mientras que el valor indicado por la norma UNE-EN ISO 8996 junto con la Ec. (11) proporcionan un valor de 122 [W·persona⁻¹] (con una superficie corporal de 1,74 [m²]).

La tasa de respiración también se puede estimar como producto de la frecuencia respiratoria promedio de 10 [min⁻¹], el volumen aproximado de aire respirado de 0,5 [L] y la concentración media de CO₂ del aire expulsado de 3,5% (Marieb y Hoehn, 2013), obteniendo una tasa individual promedio de aproximadamente 251 [gC·d⁻¹·persona⁻¹], casi idéntica a la estimación de 257 [gC·d⁻¹·persona⁻¹] derivada estrictamente de relaciones alométricas (Prairiey Duarte, 2007). Este último valor se corresponde con una tasa de emisión media por persona de 2,975x10⁻⁶ [kgC·s⁻¹·persona⁻¹].

El flujo másico de aire respirado por una persona varía entre 1,43x10⁻⁴ [kg·s⁻¹] y 3,28 x 10⁻³ [kg·s⁻¹] dependiendo del nivel de actividad física (Dutta y Chattopadhyay, 2021). Una persona de corpulencia media (73 [kg]) en actividad sedentaria, con un gasto energético de 105 [W], produce un caudal medio

Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

de respiración de $10,3 \text{ [L}\cdot\text{min}^{-1}]$ (Sharkey y Gaskill, 2001), equivalente a $1,72\times 10^{-4} \text{ [m}^3\cdot\text{s}^{-1}]$. Para una densidad del aire de $1,148 \text{ [kg}\cdot\text{m}^{-3}]$ (correspondiente a una temperatura media en el laboratorio de 28°C y una humedad de 55%), supone un flujo másico respiratorio de $1,97\times 10^{-4} \text{ [kg}\cdot\text{s}^{-1}]$. La pérdida media de agua por respiración es de aproximadamente $29,5 \text{ [mg}\cdot\text{L}^{-1}]$ (Ferrus *et al.*, 1980), que para un caudal de respiración estimado de $171,7\times 10^{-3} \text{ [L}\cdot\text{s}^{-1}]$ supone $5,06\times 10^{-6} \text{ [kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{persona}^{-1}]$ de vapor de agua.

Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

4.2. Medidas experimentales

El laboratorio estudiado es el 0.04 del Edificio Científico Técnico II-A situado en el Campus de la Universidad de Almería (Fig. 23).



Figura 23. Situación del laboratorio de docencia 0.04 del Edificio Científico Técnico CITE IIA en el Campus de la Universidad de Almería.

Este laboratorio es el utilizado en las clases prácticas de las asignaturas de Motores y Máquinas Agrícolas y de Termotecnia. En la pared Oeste que comunica con el exterior se sitúan cuatro ventanas de corredera, y en la pared opuesta (Este) se sitúa la puerta que comunica con el pasillo de acceso (Fig. 24).



Figura 24. Imagen del laboratorio de docencia 0.04 del Edificio Científico Técnico CITE IIA del Campus de la Universidad de Almería.

4.2.1. Características geométricas del laboratorio

En primer lugar, se realizó un esquema con todos los elementos estructurales existentes dentro del laboratorio con todas las medidas de la geometría del laboratorio (Fig. 25).

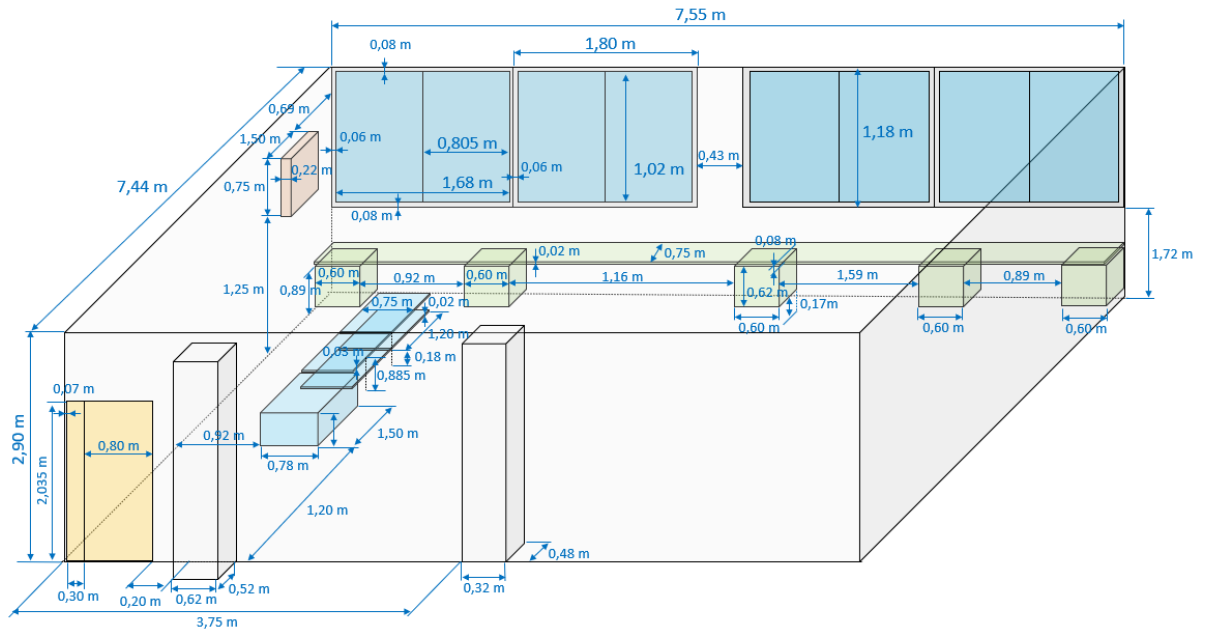


Figura 25. Esquema geométrico acotado del laboratorio de docencia 0.04 del Edificio Científico Técnico CITE IIA del Campus de la Universidad de Almería.

A partir del esquema con las medidas se realizó el modelo geométrico en Solidworks (Fig. 26) para posteriormente importarlo a Ansys y llevar a cabo las simulaciones de ventilación.

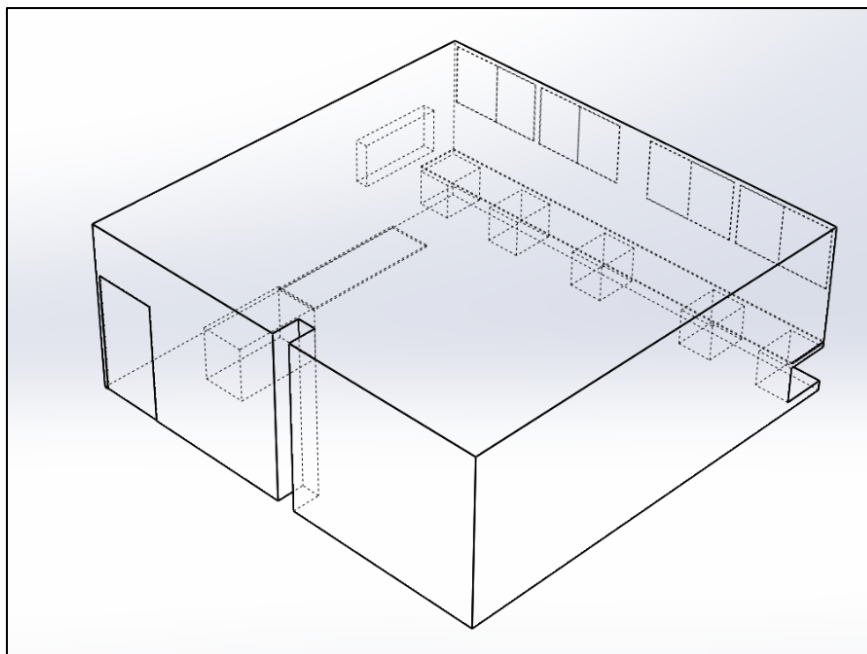


Figura 26. Modelo geométrico realizado en Solidworks del laboratorio de docencia 0.04 del Edificio Científico Técnico CITE IIA del Campus de la Universidad de Almería.

4.2.2. Equipos de medida

Las medidas en el laboratorio se realizaron utilizando dos equipos portátiles 440 dP (Instrumentos Testo S.A., Cabrils, España) con sensores intercambiables para la medida de temperatura, humedad, concentración de CO₂ (Testo 158) y velocidad del aire (Testo 858) (Fig. 27a) y Testo 445 (Fig. 27b) y. También se utilizaron un equipo Testo 535 (Fig. 27c) para la medida de la concentración de CO₂ y un termómetro de infrarrojos Testo 830-T1 (Fig. 27c) para la medida de las temperaturas de todas las superficies del laboratorio.



Figura 27. Equipos de medida usados en el ensayo Testo 440dP (a), Testo 445 (b), Testo 535 (c) y Testo 830-T1 (d).

También se utilizaron dos anemómetros sónicos de tres dimensiones CSAT3 (Campbell Scientific Spain S.L., Barcelona) capaces de medir las tres componentes ortogonales de la velocidad del aire y su temperatura (por medio de la velocidad de los ultrasonidos). El anemómetro sónico (Fig. mide el tiempo que es necesario para transmitir una señal acústica una cierta distancia permitiendo así obtener la velocidad del viento a través de esta. Presenta una respuesta lineal. Como además nos indica la dirección del flujo de aire, se instalaron en la zona central del laboratorio para saber cómo se mueve el aire en esos puntos y poderlo comparar con las simulaciones de CFD.



Figura 28. Anemómetro sónico 3D para la medida de la velocidad del aire en el interior del laboratorio.

Las características técnicas de todos los sensores utilizados en las medidas experimentales (ver Anexo A) se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7. Características técnicas de los equipos utilizados para la medida de la velocidad del aire, temperatura aire, humedad relativa y concentración de CO₂.

Sensores	Temperatura [°C]		Humedad relativa [%]		CO ₂ [ppm]		Velocidad [m/s]	
	Rango	Exactitud	Rango	Exactitud	Rango	Exactitud	Rango	Exactitud
TESTO 445	0 a +50	±0,4	0-98	±2%	0-5000	+2% v.m. *	0...10	±0,03
TESTO 440dP	0 a +70	±0,5	35-65	±2%	0-5000	+3% v.m	0...20	±0,03
TESTO 535					0 -5000	3% v.m.		
TESTO 830-T1	+0,1 a +400	±1,5% v.m.						
Parámetros	Dirección [°]		Velocidad v _x [m/s]		Velocidad v _y [m/s]		Velocidad v _z [m/s]	
	Rango	Exactitud	Rango	Exactitud	Rango	Exactitud	Rango	Exactitud
CSAT3 3D	0-360	±0.7	0-30	±0,08	0-30	±0,08	0-8	±0,04

* v.m. valor de medida.

4.2.3. Dispositivo de los ensayos experimentales

Para la toma de medidas se dividieron las entradas y salidas de aire en cuadrículas iguales, ocho en la puerta (Fig. 29a), y cuatro en la ventana, por tener un tamaño inferior (Fig. 29b). Las medidas se realizaron en el centro de cada uno de los elementos de la cuadrícula. De esta manera obtenemos una mayor precisión que si tomásemos medidas en un solo punto de la puerta o de la ventana, ya que no pasa la misma cantidad de aire, a la misma velocidad y a la misma temperatura y humedad en todos los puntos de la abertura.

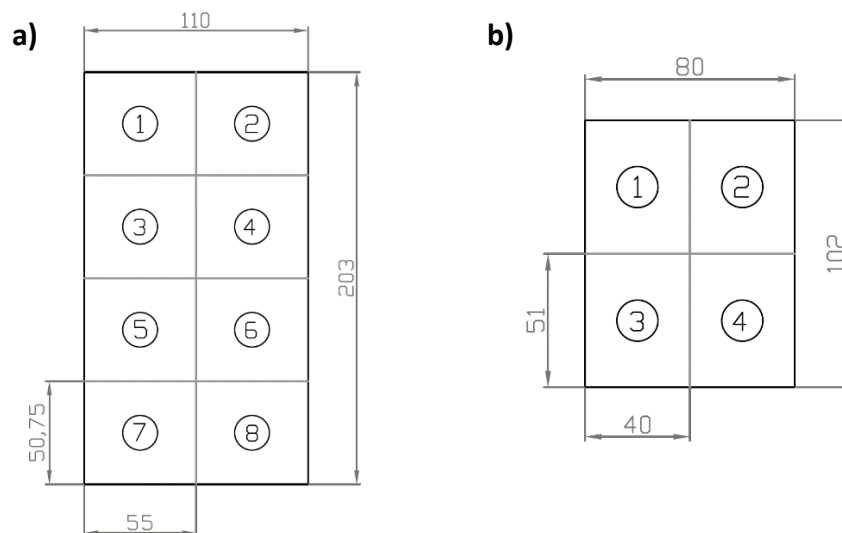


Figura 29. División de la puerta en ocho cuadrículas (a) y de las ventanas en cuatro cuadrículas (b) con los puntos centrales de cada una de ellas en las que se tomaron las medidas (cotas en mm).

Las medidas en las ventanas solo se hicieron en las dos más al centro (Fig. 30), para evitar que el tiempo de medida se alargara en exceso. Hay que tener en cuenta que cuanto mayor sea la duración del ensayo, mayor será la variación de las condiciones exteriores durante el ensayo, principalmente la velocidad y dirección del viento.

Para colocar los sensores en su posición a la hora de tomar cada una de las medidas en el centro de las cuadrículas (Figs. 29 y 30) se usaron soportes móviles. De esta forma no era necesaria la presencia de personas durante el periodo de medida. Una vez acabado cada periodo de medida de 2 minutos se procedía a cambiar la posición de los sensores tanto en la puerta como en la ventana.

Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

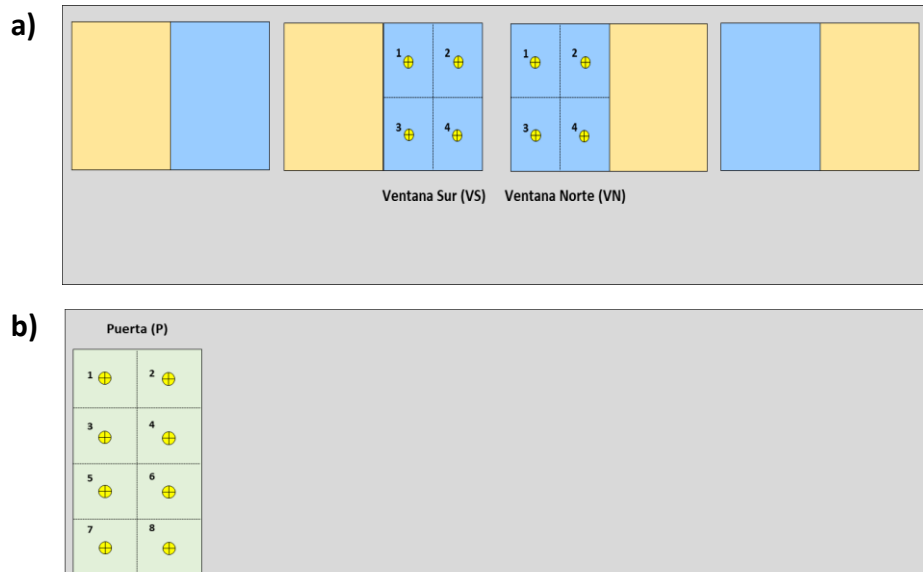


Figura 30. Disposición de las ventanas en la pared oeste del laboratorio y sus respectivas divisiones en cuatro partes (a) y de la puerta en la pared este y su división en ocho cuadrículas (b).

El sensor de velocidad Testo 858 conectado al equipo Testo 440, es de hilo caliente que exige su colocación perpendicular al flujo de aire principal. Por este motivo se colocó su eje paralelo al plano de la puerta (Fig. 31).



Figura 31. Disposición del sensor Testo 440dP para medida de velocidad del aire en la puerta en la pared este durante el primer ensayo experimental.

El sensor de velocidad del equipo Testo445 es de esfera caliente, es decir omnidireccional, por lo que se pudo colocar con su eje perpendicular al plano de las ventanas (Fig. 32), lo que facilitó su manipulación en el cambio de puntos de medida.

Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

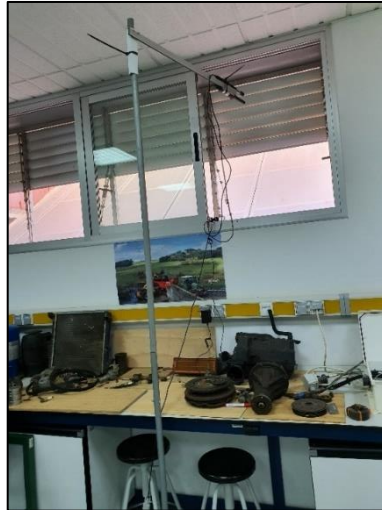


Figura 32. Colocación mediante soportes de los equipos de medida usados en el ensayo.

Los anemómetros sónicos 3D se colocaron en la zona central del laboratorio a una altura de 1,5 m (Fig. 33).



Figura 33. Imagen de los anemómetros sónicos 3D empleados en el ensayo.

Los anemómetros se colocaron equidistantes de las cuatro paredes del laboratorio (Fig. 34).

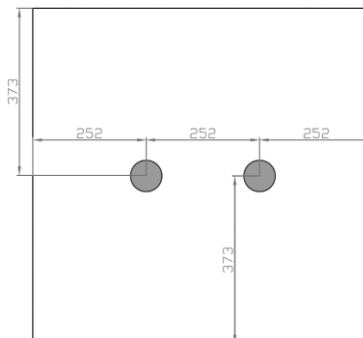


Figura 34. Ubicación acotada en planta de los anemómetros sónicos empleados en el ensayo (medidas en cm).

5. Resultados y discusión

5.1. Medidas de flujo de aire con ventilación natural

5.1.1. Mediciones Ensayo 1

El primer ensayo se realizó el día 15 de septiembre de 2021 por la tarde, de 18:30 a 19:20 h. El laboratorio dispone de 4 ventanas de corredera, por lo que existen múltiples combinaciones de apertura. En los ensayos de validación se optó por abrir las 4 ventanas de forma alterna para conseguir una entrada de aire lo más homogénea posible (Fig. 30a y 33). Durante este primer ensayo no había alumnos en el interior, de forma que las medidas en las ventanas y en la puerta se pudieron realizar en los diferentes puntos seleccionados según la cuadrícula en la que se dividió su superficie (Figs. 29-30), ya que no se interfería en ninguna clase al tener que estar cambiando la posición de los sensores. Con el objetivo de limitar la duración del ensayo, solo se realizaron medidas en 2 de las 4 ventanas abiertas, escogiendo las dos ventanas situadas más al centro (Figs. 30a y 33). Las medidas con los equipos Testo 445 y Testo 858 se realizaron cada 10 segundos, registrando durante 2 minutos en cada punto de forma continua. Además, en cada punto se realizó una medida de la concentración de CO₂ con el sensor Testo 535 que no permite el registro de los datos (Tabla 8). Este último sensor se ha utilizado en las ventanas junto con el Testo 445, debido a que este último tiene un mayor error de medida

Tabla 8. Medidas experimentales correspondientes al ensayo 1 (15/09/2021) tomadas en las ventanas con los equipos Testo 445 y Testo 535 y en la puerta con los equipos Testo 858 y Testo 535: velocidad del aire v , temperatura del aire T , humedad relativa HR , humedad absoluta x , concentración de CO₂ C , ventana sur VS y ventana norte VN.

Sensores	Testo 445					Testo 535
Ventana	v [m/s]	T [°C]	HR [%]	x [kg/kg]	C [ppm]	C [ppm]
VS1	1,03	28,17	53,35	0,0128	347	361
VS2	0,98	28,06	54,24	0,0129	351	358
VS3	1,53	28,01	52,67	0,0125	355	381
VS4	2,01	28,07	53,62	0,0127	353	383
Promedio	1,39	28,07	53,47	0,0127	351	371
VN1	0,49	27,84	55,03	0,0129	348	376
VN2	1,00	27,83	54,75	0,0128	355	364
VN3	0,37	27,80	55,01	0,0129	354	371
VN4	0,97	27,61	55,30	0,0128	357	373
Promedio	0,71	27,8	55,0	0,0129	354	371
	Testo 858				Testo 535	
Punto	v [m/s]	T [°C]	HR [%]	x [kg/kg]	C [ppm]	
P1	0,97	28,39	53,78	0,0130	381	
P2	1,95	28,43	52,90	0,0128	375	
P3	1,11	28,41	52,89	0,0128	385	
P4	2,46	28,30	52,23	0,0126	379	
P5	0,92	28,01	54,42	0,0129	387	
P6	1,90	28,01	54,23	0,0128	381	
P7	0,39	28,10	54,43	0,0130	385	
P8	1,53	27,97	54,31	0,0128	382	
Promedio	1,40	28,2	53,6	0,0129	384	

Además de las medidas en las superficies de entrada y salida de aire (ventanas y puerta, respectivamente) se midió la velocidad del aire y su temperatura en el centro del laboratorio con los

dos anemómetros sónicos 3D (Figs. 33 y 34). Las medidas fueron continuas durante toda la duración del ensayo, realizándose cada 0,1 segundos (Tabla 9).

Tabla 9. Medidas experimentales en el ensayo 1 (15/09/2021) tomadas con los anemómetros 3D. Donde la velocidad del aire en el plano horizontal V_{xy} , la temperatura sónica del aire T , la velocidad horizontal en x V_x , la velocidad horizontal en y V_y , la velocidad vertical en z V_z , y la dirección con respecto al eje y ϑ_{y-x} .

Anemómetro 3D	v_{xy} [m/s]	T [°C]	v_x [m/s] *	v_y [m/s]	v_z [m/s]	ϑ_{y-x} [°]
Sur	0,38	28,9	0,05	-0,36	-0,12	11,13
Norte	0,29	28,9	-0,06	-0,27	-0,34	105,52

* El eje x se corresponde con la dirección paralela al plano de las ventanas (Fig. 35).

Se puede observar que la velocidad de entrada del aire varía de una ventana a otra, esto puede ser debido a que, por la dirección que llevase el aire exterior, entrase de una forma más sencilla por la ventana sur. Dado el corto periodo de duración del ensayo (inferior a 1 hora) la temperatura y la humedad sufrieron una variación muy pequeña. La concentración de CO_2 varió ligeramente, posiblemente debido a que durante la medición el tutor y el autor de este trabajo estuvieron presentes en el laboratorio.

En cuanto a la medición de los anemómetros 3D, vemos como la temperatura en el interior del aula es algo superior a la de entrada por las ventanas; por este motivo, el aire sale por la puerta a una temperatura mayor. También nos indica la dirección que lleva el aire en esos dos puntos, podemos ver que sigue la dirección esperada hacia la puerta, aunque en el caso del anemómetro más próximo a la salida, el flujo se desvía ligeramente hacia el norte (Figura 35), posiblemente como consecuencia de la presencia de las mesas que dificultan el paso del aire.

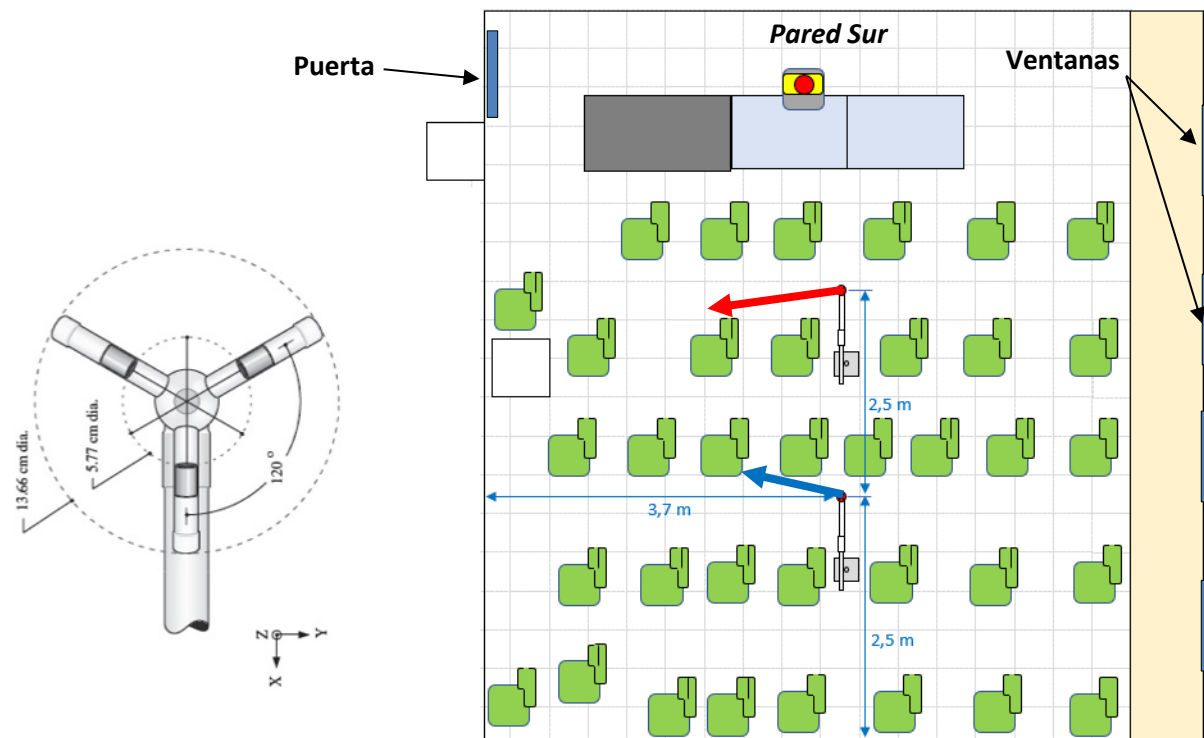


Figura 35. Dirección del aire medida con los dos anemómetros 3D instalados en la zona intermedia del laboratorio del ensayo 1 (15/09/2021).

Para calcular el caudal de entrada total a través de las 4 ventanas abiertas, se ha supuesto que el caudal de aire a través de las otras dos ventanas donde no se realizaron mediciones era equivalente al de las ventanas donde sí se midió. Se puede observar una ligera variación entre el caudal que entra y el que sale, debido fundamentalmente al error que se comete al estimar el caudal en las ventanas donde no se realizaron medidas (Tabla 10). Un segundo factor de error importante es que los sensores de velocidad utilizados, de hilo y esfera caliente, no miden la componente del vector velocidad perpendicular a la superficie de la puerta y las ventanas. Cuanto mayor sea el grado de inclinación de la velocidad del aire, mayor será el error en el cálculo del caudal de ventilación. Debido a que el laboratorio se encuentra en la planta baja del CITE II-A, un edificio de 3 plantas, la entrada de aire por las ventanas se produce desde una zona de estancamiento del aire, que reduce mucho el efecto de las variaciones del viento exterior, tanto en dirección como velocidad.

Además, hay que tener en cuenta que, pese a la corta duración del ensayo, la variación en las condiciones del viento exterior provoca que el caudal de aire a través de cada superficie de paso varíe con el tiempo. Un último factor de inexactitud lo constituye el hecho de realizar solo medidas en 4 puntos de la ventana para calcular su caudal. Cuanto mayor es el número de puntos, mayor exactitud se consigue. Sin embargo, al aumentar el número de puntos de media también se incrementaría la duración del ensayo, y el riesgo de variación de las condiciones exteriores.

Tabla 10. Caudales de entrada y de salida del laboratorio y su variación del ensayo 1 (15/09/2021).

Lugar	Ventana sur	Ventana norte	Estimación 4 ventanas	Puerta
Caudal [m ³ /s]	1,132	0,576	3,416	3,139
Variación [%]			8,8	

La estabilidad en el flujo de aire durante la duración del ensayo se puede observar en las medidas realizadas con los anemómetros 3D, que permanecieron fijos en un mismo punto (Fig. 36).

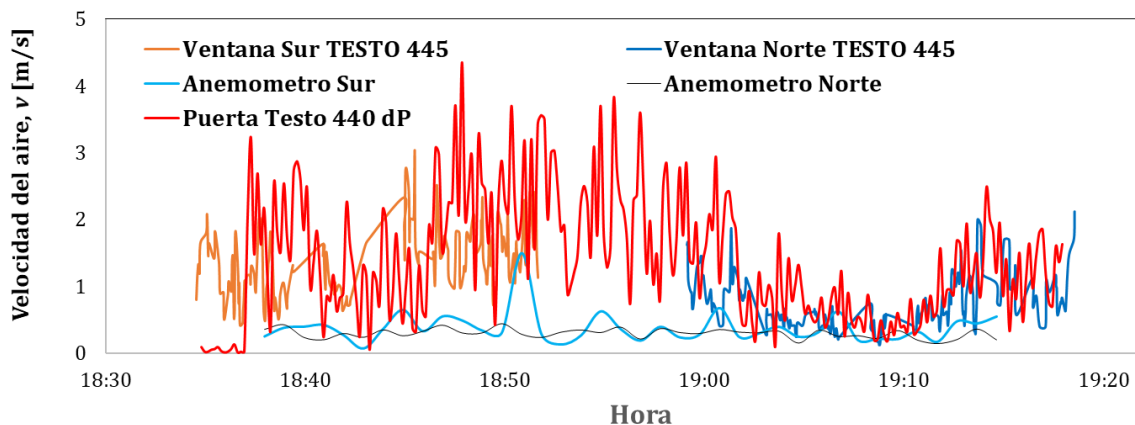


Figura 36. Velocidad del aire del ensayo 1 (15/09/2021).

Sin embargo, si se observa una importante variación en las velocidades en la puerta y en las ventanas (Fig. 36), como consecuencia tanto de los cambios en la velocidad del aire exterior, como debido al cambio en los puntos de medida. Dado que las variaciones de la velocidad del viento afectan en la misma proporción a las medidas realizadas en las ventanas y en la puerta, se reduce su influencia en el cálculo de los caudales.

El resto de las variables medidas en el ensayo muestra una gran homogeneidad (Figs. 37-40), debido tanto a la estabilidad de las condiciones climáticas exteriores conseguida al reducir la duración del ensayo a menos de 1 hora, como a la ausencia de elementos dentro del aula que generen calor, vapor de agua o CO₂ (excepto la pequeña contribución que supone la presencia de las dos personas que realizaban las medidas).

En el caso de la temperatura se observan valores muy similares a lo largo de todo el ensayo entre los dos anemómetros situados dentro del laboratorio. Además, la temperatura en esos puntos fue aproximadamente 1°C (Tabla 8) superior a la registrada en las dos ventanas y en la puerta (Fig. 37). Esto puede deberse a que la medida de la temperatura sónica del aire depende de la humedad, y no llega a ser del todo equivalente a la medida con los sensores de temperatura.

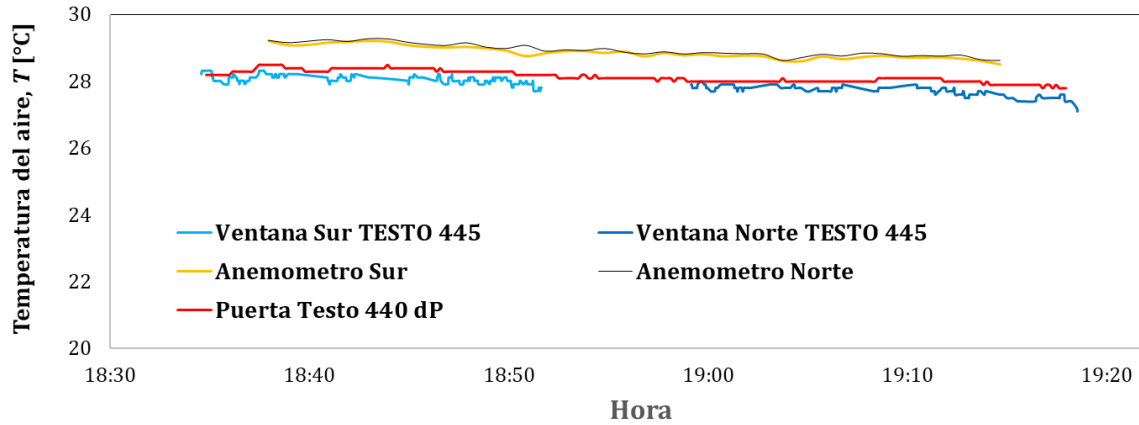


Figura 37. Temperatura del aire del ensayo 1 (15/09/2021).

Debido a la ausencia de estudiantes dentro del aula, los valores de humedad medidos en el aire que sale a través de la puerta coinciden con los del aire de entrada por las ventanas (Figs. 38 y 39).

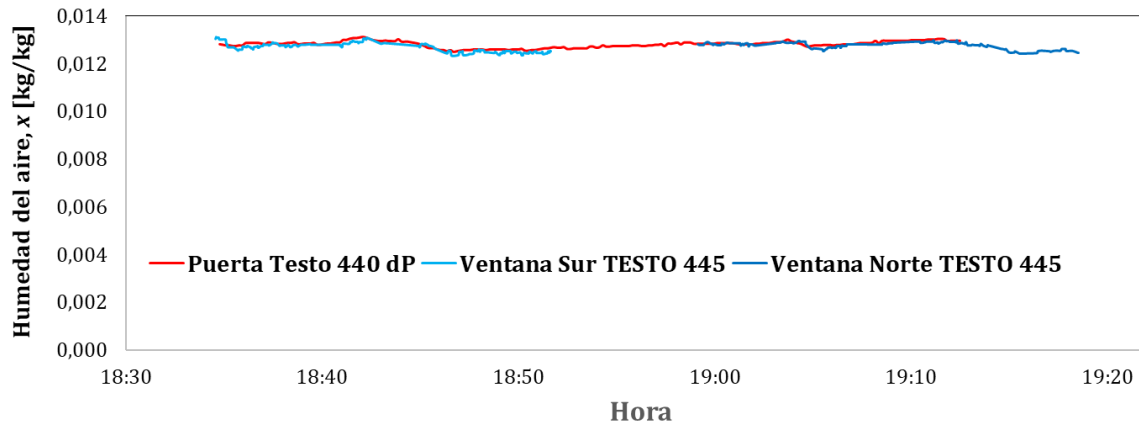


Figura 38. Humedad absoluta del aire del ensayo 1 (15/09/2021).

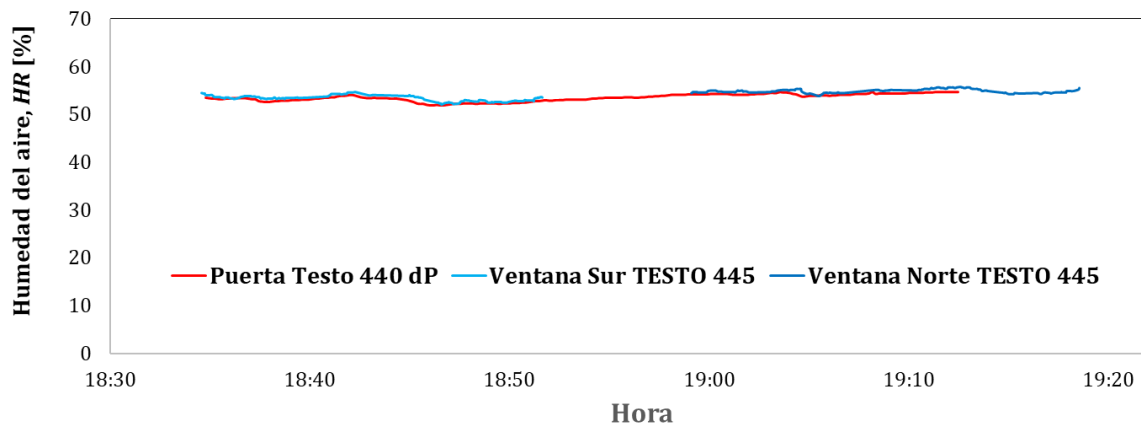


Figura 39. Humedad relativa del aire del ensayo 1 (15/09/2021).

Las medidas de concentración de CO₂, muestran como primer dato interesante una baja concentración exterior en el aire que entra por las ventanas (Fig. 40), en torno a 370 ppm (Tabla 8). Esto puede ser debido al ya comentado efecto del confinamiento sobre los niveles de emisión de CO₂, que ha producido una momentánea reducción de la concentración del CO₂ atmosférico (Le Quéré *et al.*, 2020). Además, en la zona costera de Almería la reducción del CO₂ atmosférico como consecuencia de la reducción de las emisiones se ve potenciada por el efecto sumidero provocado por los cultivos hortícolas en invernadero que absorben importantes cantidades de CO₂ mediante la fotosíntesis de los cultivos (Molina-Aiz *et al.*, 2017-2020).

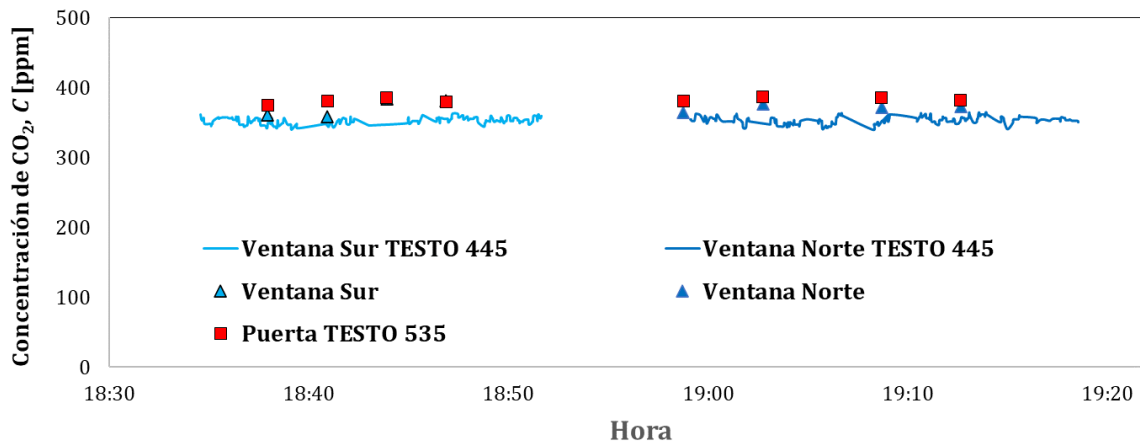


Figura 40. Concentración de CO₂ del ensayo 1 (15/09/2021).

En el caso de la concentración de CO₂ se observa una pequeña diferencia, siendo una 10 ppm superior la concentración en la salida de aire a través de la puerta (Fig. 40), sin duda ocasionado por la presencia dentro del aula de las dos personas necesarias para realizar las medidas.

5.1.2. Mediciones Ensayo 2

El segundo ensayo se realizó el día 16 de septiembre de 2021 por la mañana, de 11:00 a 12:00 h. Las condiciones de ensayos fueron las mismas que en las del ensayo 1, sin alumnos en el interior, con cuatro ventanas abiertas y midiendo en las 2 ventanas centrales. En este ensayo realizado por la mañana (Tabla 11), la temperatura fue unos 4°C inferior a la de la tarde anterior (Tabla 9), con una concentración similar de CO₂. La velocidad media del aire a la salida por la puerta fue de 0,89 m/s, ligeramente inferior a la de la tarde anterior de 1,4 m/s.

Tabla 11. Medidas experimentales correspondientes al ensayo 2 (16/09/2021) tomadas en las ventanas con los equipos Testo 445 y Testo 535 y en la puerta con los equipos Testo 858 y Testo 535: velocidad del aire v , temperatura del aire T , humedad relativa HR , humedad absoluta x , concentración de CO₂ C , ventana sur VS y ventana norte VN.

Sensores	Testo 445					Testo 535
Ventana	v [m/s]	T [°C]	HR [%]	x [kg/kg]	C [ppm]	C [ppm]
VS1	0,34	24,8	74,6	0,0147	376	381
VS2	0,36	24,7	75,1	0,0147	372	379
VS3	0,21	25,2	73,8	0,0149	366	376
VS4	0,63	24,6	76,6	0,0148	377	371
Promedio	0,38	24,8	75,0	0,0148	373	377
VN1	0,52	24,6	74,1	0,0144	370	371
VN2	0,36	24,8	73,2	0,0144	376	374
VN3	0,62	24,6	75,0	0,0146	374	380
VN4	0,80	24,6	75,2	0,0146	370	372
Promedio	0,57	24,7	74,4	0,0145	373	374
	Testo 858				Testo 535	
Punto	v [m/s]	T [°C]	HR [%]	x [kg/kg]	C [ppm]	
P1	0,78	25,91	66,46	0,0139	372	
P2	1,06	25,81	67,82	0,0141	379	
P3	0,71	25,50	69,79	0,0143	387	
P4	1,04	25,63	69,29	0,0143	381	
P5	0,54	25,65	69,81	0,0144	384	
P6	0,84	25,52	70,63	0,0145	385	
P7	0,68	25,39	71,41	0,0145	380	
P8	1,48	25,75	69,91	0,0145	383	
Promedio	0,89	25,6	69,4	0,0143	383	

En este ensayo se observa una mayor diferencia en la velocidad media medida por los dos anemómetros, con valores mayores en el anemómetro situado más cercano a la puerta (Tabla 12). En el primer ensayo realizado la tarde anterior, los valores medidos fueron más homogéneos (Tabla 10).

Tabla 12. Medidas experimentales en el ensayo 2 (16/09/2021) tomadas con los anemómetros 3D. Donde la velocidad del aire en el plano horizontal V_{xy} , la temperatura sónica del aire T , la velocidad horizontal en x V_x , la velocidad horizontal en y V_y , la velocidad vertical en z V_z , y la dirección con respecto al eje y ϑ_{y-x} .

Anemómetro 3D	v_{xy} [m/s]	T [°C]	v_x [m/s] *	v_y [m/s]	v_z [m/s]	ϑ_{y-x} [°]
Sur	0,43	26,4	-0,19	-0,38	-0,15	4,96
Norte	0,10	26,8	-0,04	0,03	-0,04	199,91

* El eje x se corresponde con la dirección paralela al plano de las ventanas (Fig. 41).

Estos datos experimentales presentan bastante similitud con los anteriores, aunque podemos destacar algunas pequeñas diferencias:

- La velocidad de entrada del aire presenta menos variación entre una ventana y otra.
- La temperatura del aire que sale por la puerta es ligeramente mayor, esto puede deberse a que en el laboratorio la temperatura era mayor, contribuyendo al calentamiento del aire de ventilación.

- La humedad relativa varió ligeramente debido al cambio de temperatura que hemos mencionado.
- La dirección del aire que nos indica el anemómetro 3D Norte no es del todo el esperado, ya que lleva dirección hacia las ventanas (Figura 41). Esto puede deberse a la creación de turbulencias como consecuencia de la mayor diferencia de velocidad en las ventanas por las que entraba el aire.

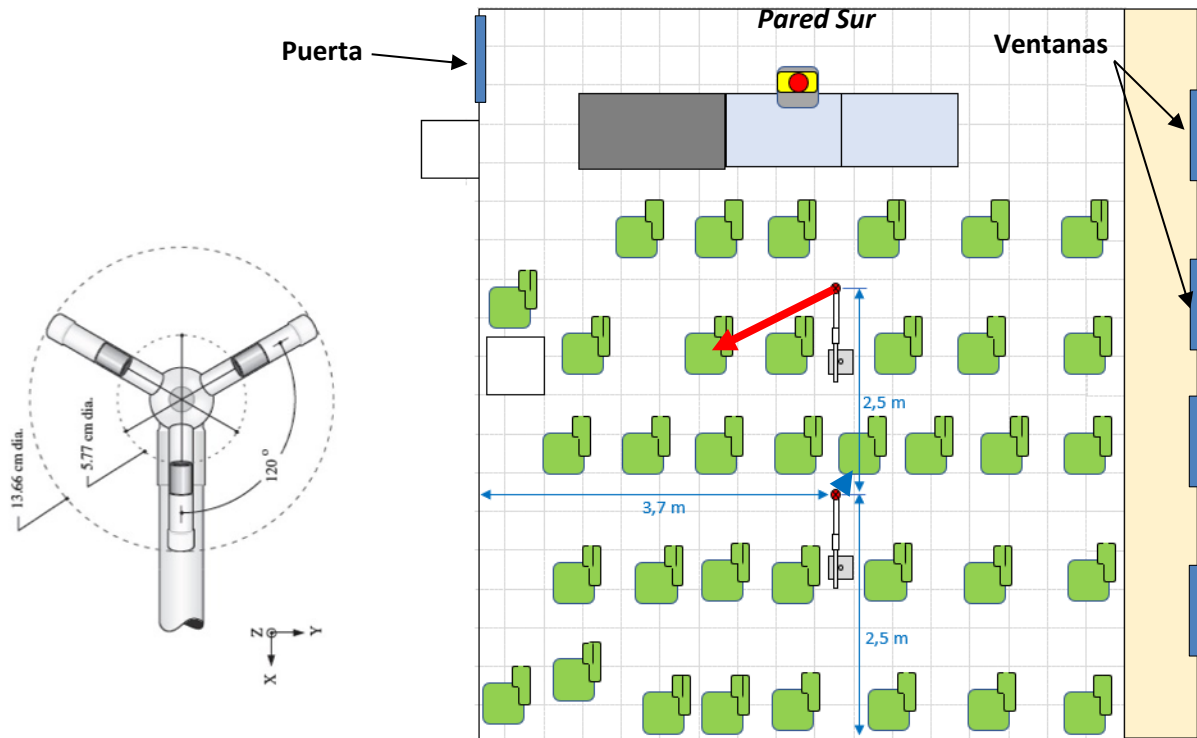


Figura 41. Dirección del aire tomada por los dos anemómetros 3D instalados en la zona intermedia del laboratorio del ensayo 2 (16/09/2021).

Al igual que en el caso anterior, el caudal que sale por la puerta no se corresponde exactamente con el estimado de entrada a través del conjunto de las 4 ventanas (Tabla 13). Como se ha comentado anteriormente, en este segundo ensayo, la diferencia de caudal entre las dos ventanas donde se midió es mayor que en el primer ensayo. Eso refleja una mayor turbulencia en el viento exterior, por lo que ambas causas contribuyen a reducir la exactitud de los cálculos.

Tabla 13. Caudales de entrada y de salida del laboratorio y su variación del ensayo 2 (16/09/2021).

Lugar	Ventana sur	Ventana norte	Estimación 4 ventanas	Puerta
Caudal [m ³ /s]	0,314	0,467	1,532	1,994
Variación [%]			21,7	

La mayor variación en los parámetros medidos de forma continua se puede apreciar en la velocidad del aire (Fig. 42). Aunque se observan mayores oscilaciones en periodos cortos de tiempo, las velocidades medidas a lo largo de todo el ensayo presentan un valor medio más uniforme que en el primer ensayo. La estabilidad del flujo de aire de ventilación se refleja bien en la uniformidad de las medidas de los dos anemómetros sónicos 3D situados dentro del laboratorio (Fig. 42). Sin embargo, en este caso se aprecian mayores velocidades en los anemómetros situados en la parte sur del laboratorio, tanto en la ventana como en el interior.

Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

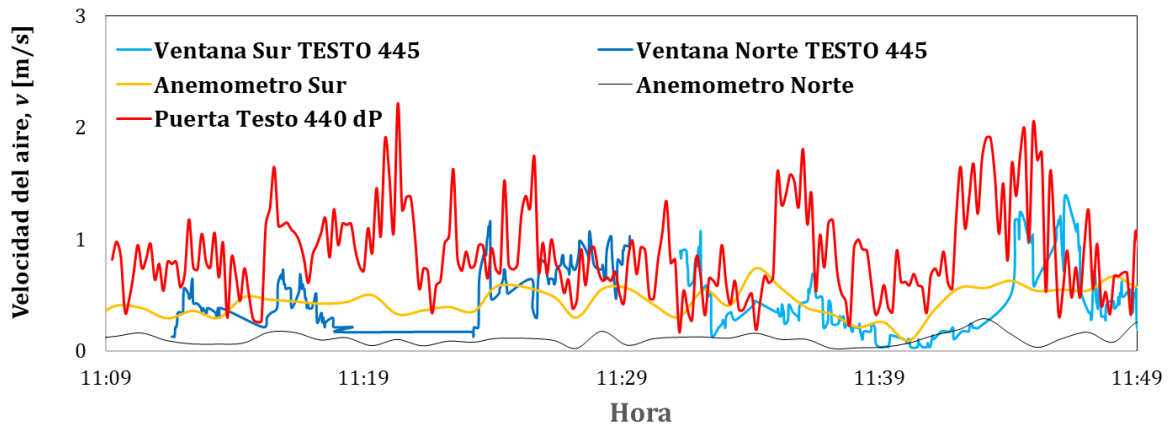


Figura 42. Velocidad del aire del ensayo 2 (16/09/2021).

En la evolución de la temperatura también observamos una gran estabilidad (Fig. 43), y como en el caso anterior, las temperaturas dentro del laboratorio medidas por los anemómetros sónicos superan a las de las ventanas y la puerta (posiblemente debido a la inexactitud de la temperatura sónico por efecto de la humedad). Como es lógico la temperatura en la puerta fue superior a la de las ventanas durante todo el ensayo (Fig. 43), como consecuencia del calentamiento producido en el aire por la convección sobre las superficies del laboratorio.

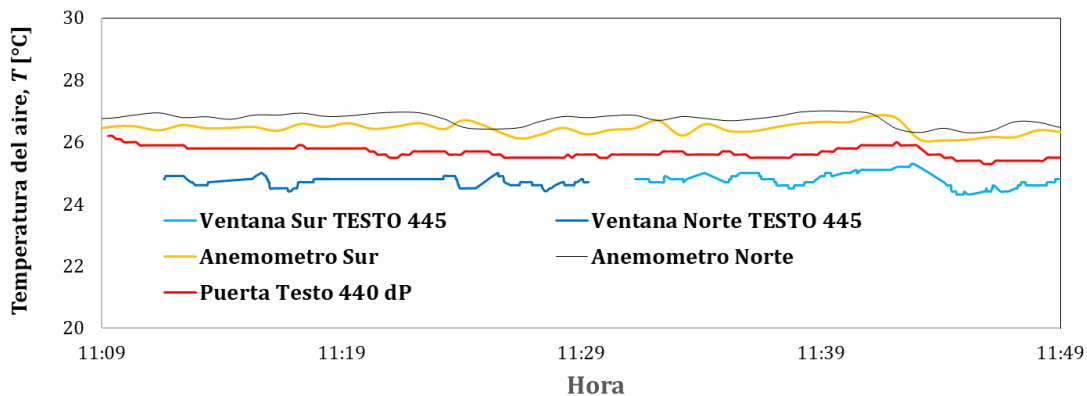


Figura 43. Temperatura del aire del ensayo 2 (16/09/2021).

La humedad del aire apenas varió al pasar por el laboratorio ya que en este caso tampoco había alumnos en su interior (Figs. 44 y 45)

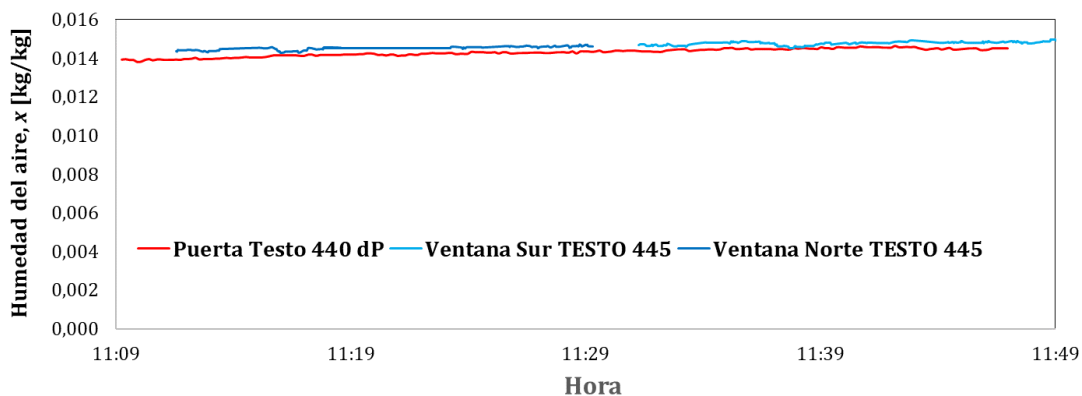


Figura 44. Humedad absoluta del aire del ensayo 2 (16/09/2021).

Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

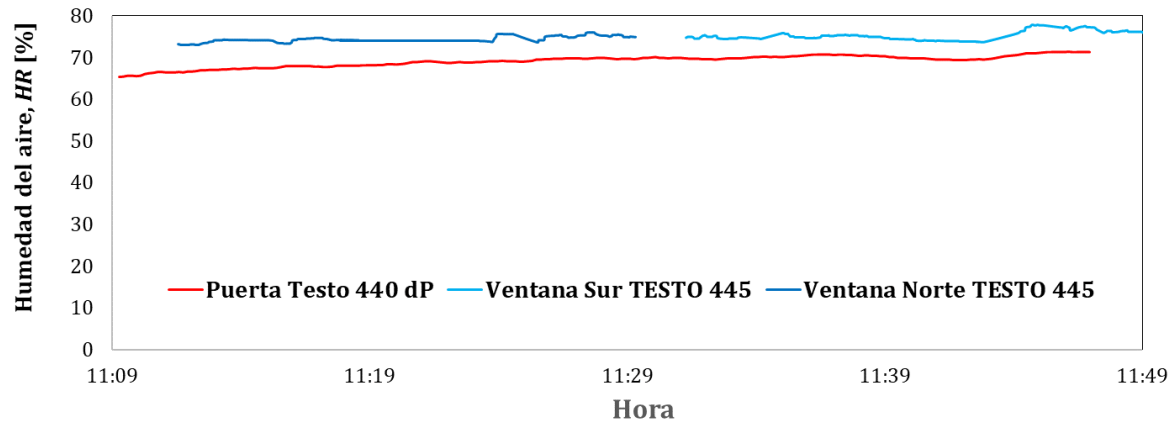


Figura 45. Humedad relativa del aire del ensayo 2 (16/09/2021).

De igual forma la concentración de CO₂ apenas se vio aumentada por la presencia dentro del laboratorio de las dos personas que realizaban las medidas (Fig. 46).

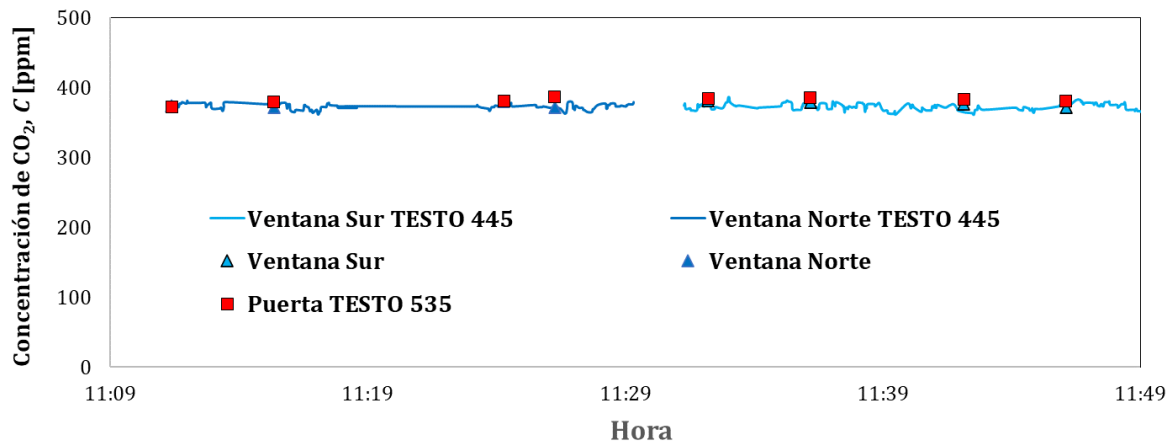


Figura 46. Concentración de CO₂ del ensayo 2 (16/09/2021).

5.1.3. Mediciones Ensayo 3

El tercer ensayo se realizó el día 20 de septiembre de 2021 de 10:00 a 11:00 h, durante el desarrollo de una clase de prácticas de Termotecnia con presencia de 19 alumnos (Fig. 47). Para poder acercarnos a unas condiciones lo más estables posibles, las medidas se realizaron una hora después del inicio de la clase (que se desarrolló de 9:00 a 11:00 h). Como en los dos ensayos precedentes se abrieron 4 ventanas y se realizaron medias en las dos centrales.



Figura 47. Imagen del laboratorio con los alumnos en su interior durante el desarrollo del ensayo (20/09/2021).

Dado que el ensayo se realizó durante el transcurso de una clase real, se realizaron medias en un solo punto de dos de las ventanas y de la puerta (Tabla 14), con el objetivo de alterar lo mínimo posible el normal desarrollo de la práctica. Dado que en este caso el dato más importante en la puerta era la concentración de CO₂, se utilizó el equipo de medida Testo 440dP con la sonda multifunción Testo 158 que permite medir simultáneamente y de forma continua la concentración de CO₂, la temperatura y humedad del aire (Tabla 14). Al finalizar el ensayo se realizó una medida puntual con el sensor Testo 858 de la velocidad del aire en el centro de la puerta.

Tabla 14. Medidas experimentales correspondientes al ensayo 3 (20/09/2021) tomadas en las ventanas con los equipos Testo 445 y Testo 535 y en la puerta con los equipos Testo 158, Testo 858 y Testo 535: velocidad del aire v , temperatura del aire T , humedad relativa HR , humedad absoluta x , concentración de CO₂ C , ventana sur VS y ventana norte VN.

Sensores	Testo 445					Testo 535
Ventana	v [m/s]	T [°C]	HR [%]	x [kg/kg]	C [ppm]	C [ppm]
VS	0,32	26,6	60,2	0,0131	376	375
VN	0,10	26,5	61,4	0,0133	375	376
Sensores	Testo 858	Testo 158				Testo 535
Punto	v [m/s]	T [°C]	HR [%]	x [kg/kg]	C [ppm]	C [ppm]
Puerta	0,34	29,6	54,1	0,0141	447	443

Al igual que en los dos primeros ensayos, durante la duración de la clase se midió la velocidad y dirección del aire en dos puntos en medio del laboratorio con los anemómetros tridimensionales (Tabla 15), en este caso con algunos alumnos a su alrededor (Fig. 47). En este caso los valores medios de velocidad en el plano horizontal medidos por los dos anemómetros fueron más homogéneos (Tabla 15).

Tabla 15. Medidas experimentales en el ensayo 3 (20/09/2021) tomadas con los anemómetros 3D dentro del laboratorio durante el desarrollo de una clase con 19 alumnos. Donde la velocidad del aire en el plano horizontal V_{xy} , la temperatura sónica del aire T , la velocidad horizontal en x V_x , la velocidad horizontal en y V_y , la velocidad vertical en z V_z , y la dirección con respecto al eje y ϑ_{y-x} .

Anemómetro 3D	v_{xy} [m/s]	T [°C]	v_x [m/s] *	v_y [m/s]	v_z [m/s]	ϑ_{y-x} [°]
Sur	0,16	27,8	-0,11	-0,23	-0,02	15,36
Norte	0,14	27,9	-0,05	-0,06	-0,01	163,28

* El eje x se corresponde con la dirección paralela al plano de las ventanas (Fig. 48).

Al analizar estos datos, observamos varios cambios en el aire con respecto a los ensayos con el laboratorio vacío que eran de esperar:

- Ha habido un aumento de la temperatura en el aire de salida, debido al calor que generan los alumnos y, en consecuencia, la humedad relativa varió un poco.
- La concentración de CO_2 aumentó como consecuencia de la respiración de los alumnos.

En cuanto a la medición de los anemómetros 3D, vemos como la temperatura en el interior del aula es superior (debido a los alumnos) a la de entrada por las ventanas; por este motivo, el aire sale por la puerta a una temperatura mayor. La dirección del flujo de aire indicada por los anemómetros en los dos puntos centrales sigue la dirección esperada desde las ventanas hacia la puerta (Figura 48).

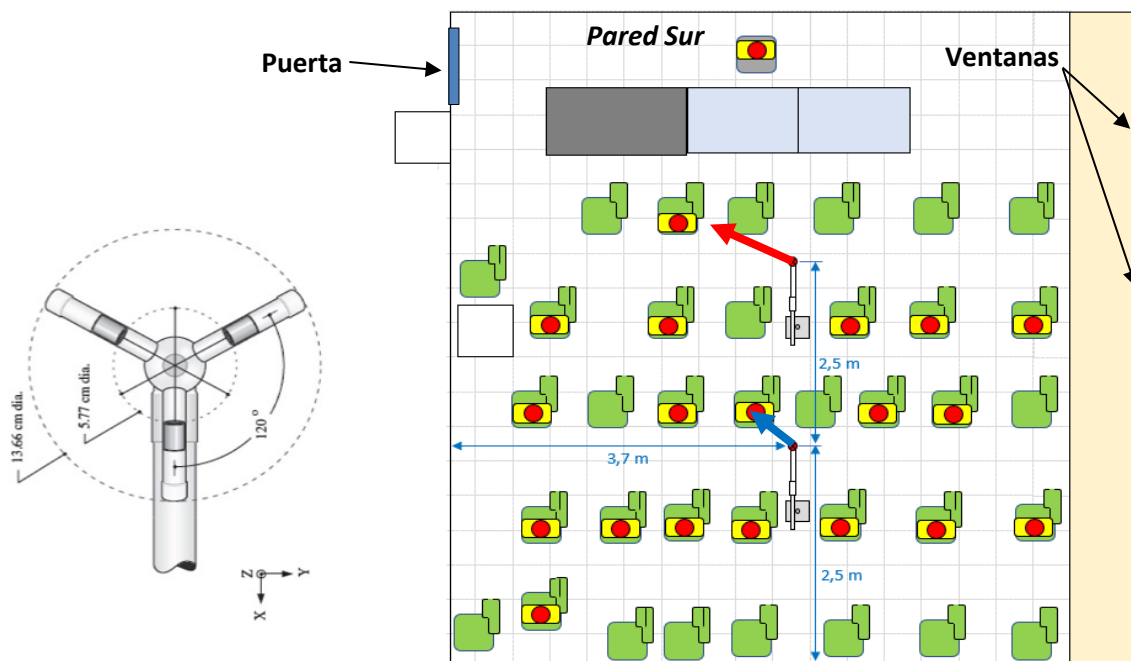


Figura 48. Dirección del aire tomada por los dos anemómetros 3D instalados en la zona intermedia del laboratorio del ensayo 3 (20/09/2021).

Al igual que en los casos anteriores, el caudal de salida no se corresponde exactamente con el de entrada, debido a los errores de medida anteriormente comentados. En este caso, además se observa una gran diferencia en el caudal de entrada por las dos ventanas, haciendo aún más inexacta la estimación del caudal por las dos ventanas en las que no se realizaron medidas. Adicionalmente, en este ensayo la velocidad solo se midió en el centro de las ventanas y en la puerta se realizó una única medida al final del ensayo. Pese a todas estas posibles fuentes de inexactitud, la diferencia entre los caudales de entrada y salida estimados se mantuvo en un nivel aceptable del 10% (Tabla 16).

Tabla 16. Caudales de entrada y de salida del laboratorio y su variación del ensayo 3 (20/09/2021) realizado con 19 alumnos dentro del laboratorio.

Lugar	Ventana sur	Ventana norte	Estimación 4 ventanas	Puerta
Caudal [m ³ /s]	0,260	0,081		0,761
Variación [%]			10,2	

La medida continua de velocidad en el centro de dos de las ventanas y en el medio del laboratorio con los anemómetros tridimensionales, muestra una elevada turbulencia del aire, con grandes oscilaciones a lo largo del periodo de medida (Fig. 49). También se observan mayores velocidades en la ventana y el anemómetro 3D del lado sur más próximos a la puerta de salida del aire.

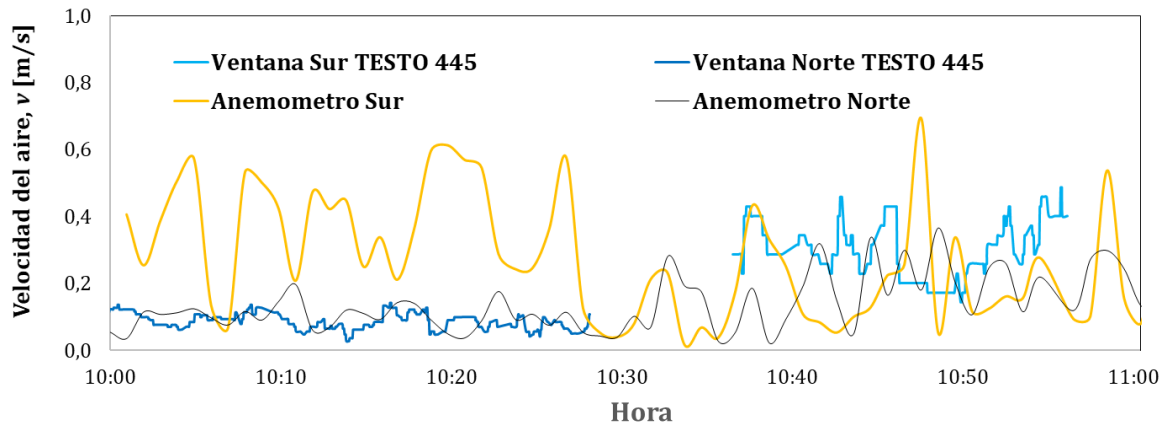


Figura 49. Velocidad del aire del ensayo 3 (20/09/2021) realizado con 19 alumnos dentro del laboratorio.

Como consecuencia de la presencia de los alumnos en el laboratorio, que aportan una carga térmica total aproximada de unos 2,3 [kW] (122 [W·persona⁻¹] según la norma UNE-EN ISO 8996 (AENOR, 2005)), la temperatura de salida por la puerta fue unos 3°C superior a la de entrada por la puerta (Tabla 14), incrementándose este gradiente hacia el final del ensayo (Fig. 50). Debido a este aporte de calor, el aire interior va aumentando su temperatura a lo largo del tiempo, lo que genera condiciones no estacionarias. En este caso si se observa una temperatura media de los anemómetros sónicos (27,8°C) situada entre los valores de entrada por las ventanas (26,5°C) y de salida a través de la puerta (29,68°C).

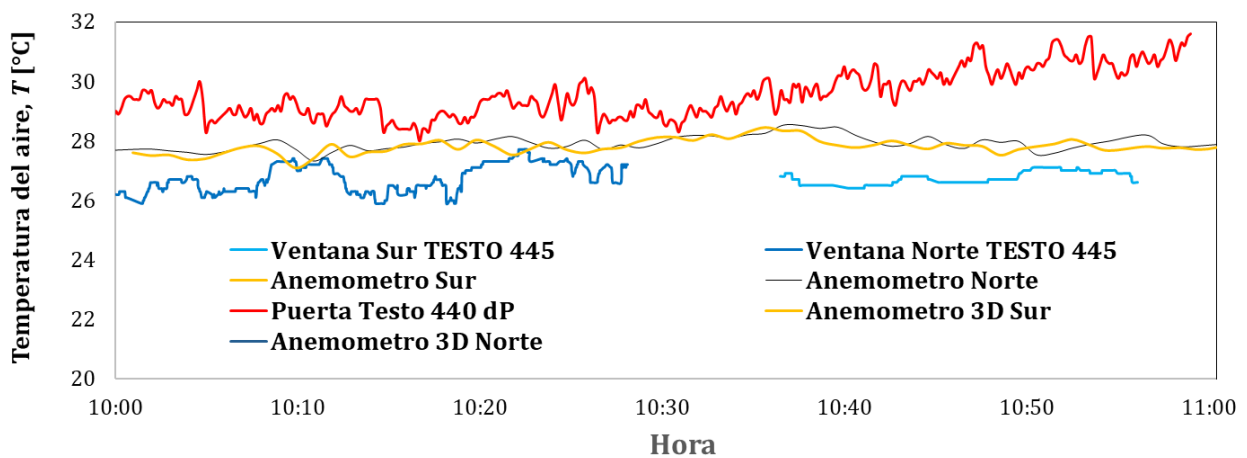


Figura 50. Temperatura del aire del ensayo 3 (20/09/2021) realizado con 19 alumnos dentro del laboratorio.

De igual forma la presencia de los 19 alumnos (más el profesor) en el interior del laboratorio produjo un aumento de la humedad del aire, que fue apreciable sobre todo en la segunda mitad del ensayo (Fig. 51). En total los alumnos aportan un caudal de vapor de agua de aproximadamente $0,36 \text{ [kg}\cdot\text{h}^{-1}]$, correspondiendo a una estimación de $5,06\times 10^{-6} \text{ [kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{persona}^{-1}]$ (ver sección 4.1.5).

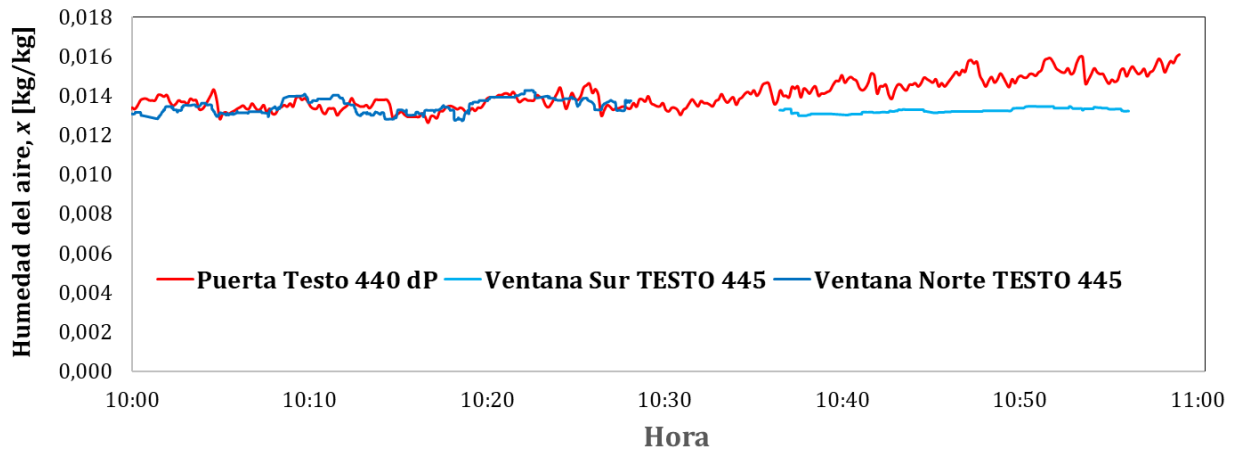


Figura 51. Humedad absoluta del aire del ensayo 3 (20/09/2021) realizado con 19 alumnos dentro del laboratorio.

Dado que se produce un aumento simultáneo de temperatura (Fig. 50) y de humedad absoluta (Fig. 51) a lo largo del ensayo, la humedad relativa se mantuvo constante, siendo durante casi todo el ensayo un 10% menor en la salida por la puerta que a la entrada por las ventanas (Fig. 52).

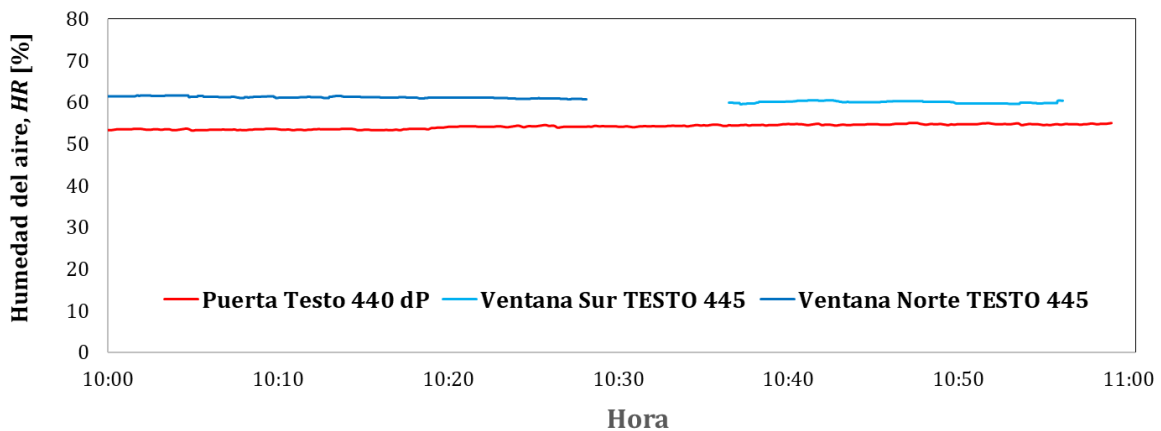


Figura 52. Humedad relativa del aire del ensayo 3 (20/09/2021) realizado con 19 alumnos dentro del laboratorio.

El aporte de CO_2 por los ocupantes del laboratorio se puede estimar en aproximadamente $0,21 \text{ [kgC}\cdot\text{h}^{-1}]$ para una tasa de emisión media por persona de $2,975\times 10^{-6} \text{ [kgC}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{persona}^{-1}]$ (ver sección 4.1.5). Esto produjo un aumento de la concentración de CO_2 desde 375 ppm medidas a la entrada por las ventanas, hasta 447 ppm a la salida del aire por la puerta (Tabla 14 - Fig. 53).

Estos valores medidos en la puerta son muy inferiores al límite de 500 ppm superior a la concentración exterior para locales de categoría IDA 2, en los que se encuentran las aulas de docencia según indica la instrucción técnica *IT 1.1.4.2.3 Caudal mínimo del aire exterior de ventilación* del RITE (BOE, 2007). De igual forma se encuentra muy por debajo del valor de 700 ppm indicado por Di Gilio *et al.* (2021) como límite seguridad para comenzar a tomar medidas en las aulas de enseñanza.

Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

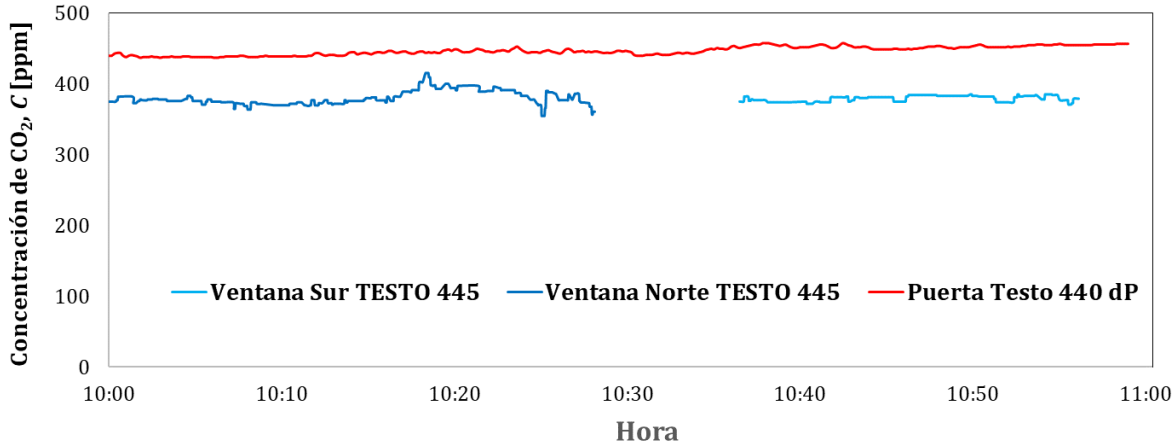


Figura 53. Concentración de CO₂ del ensayo 3 (20/09/2021) realizado con 19 alumnos dentro del laboratorio.

5.2. Modelo de CFD

5.2.1. Modelo Ensayo 1

En este primer ensayo, lo primero que vamos a analizar es la temperatura de las distintas superficies del laboratorio (Figura 54). Podemos observar que el gradiente de temperaturas en el interior del laboratorio es mínimo. Esto nos está indicando que la temperatura del aire de entrada es muy similar a la del laboratorio y que el aire no permanece mucho tiempo en el interior absorbiendo calor por convección desde las superficies interiores.

También podemos observar claramente como la pared de las ventanas es la que tiene una temperatura ligeramente mayor, esto puede ser debido a que por la tarde esta pared es la que recibe en parte radiación solar. El resto de las paredes tienen una temperatura también algo mayor que el suelo, ya que este se refrigera por conducción de calor hasta las capas inferiores del terreno, donde la temperatura se mantienen en torno a 15°C.

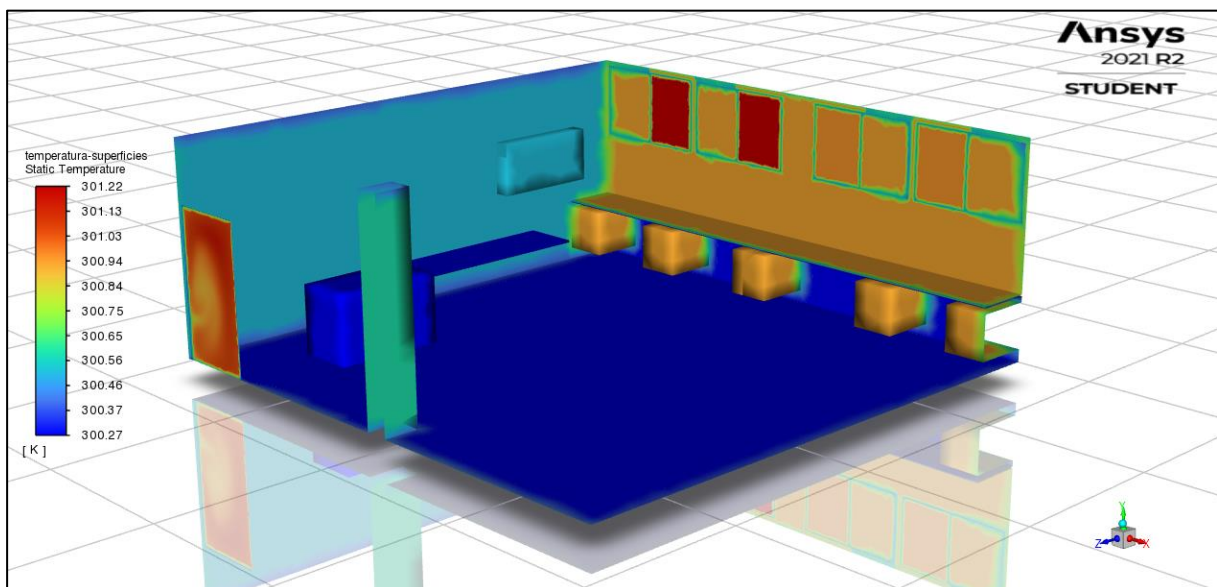


Figura 54. Distribución de temperaturas en las superficies [K]. Ensayo 1 realizado el 15/09/2021 en el laboratorio sin alumnos.

La temperatura del suelo permanece prácticamente invariable ya que la entrada de aire es por las ventanas, que están a cierta altura con respecto del suelo. Por último, a la salida el aire tiene una temperatura ligeramente inferior a la de entrada por las ventanas que están enfrentadas a esta y algo superior a la de las otras ventanas, denotando esto, cierto intercambio.

El programa ANSYS/FLuent permite obtener como salida una gráfica en la que observamos la velocidad de salida del aire del laboratorio por la puerta representada en función de la altura (Fig. 55). Podemos ver como por la parte inferior de la puerta obtenemos valores más dispersos y, conforme vamos subiendo en altura, se van estabilizando un poco los datos. También podemos sacar en conclusión que la velocidad del aire disminuye conforme aumenta la altura en este caso. Esto en el exterior no es así, el aire puede adquirir más velocidad cuanto mayor sea su altura, ya que al estar alejado del suelo disminuye su fricción con este y es capaz de desplazarse a mayor velocidad.

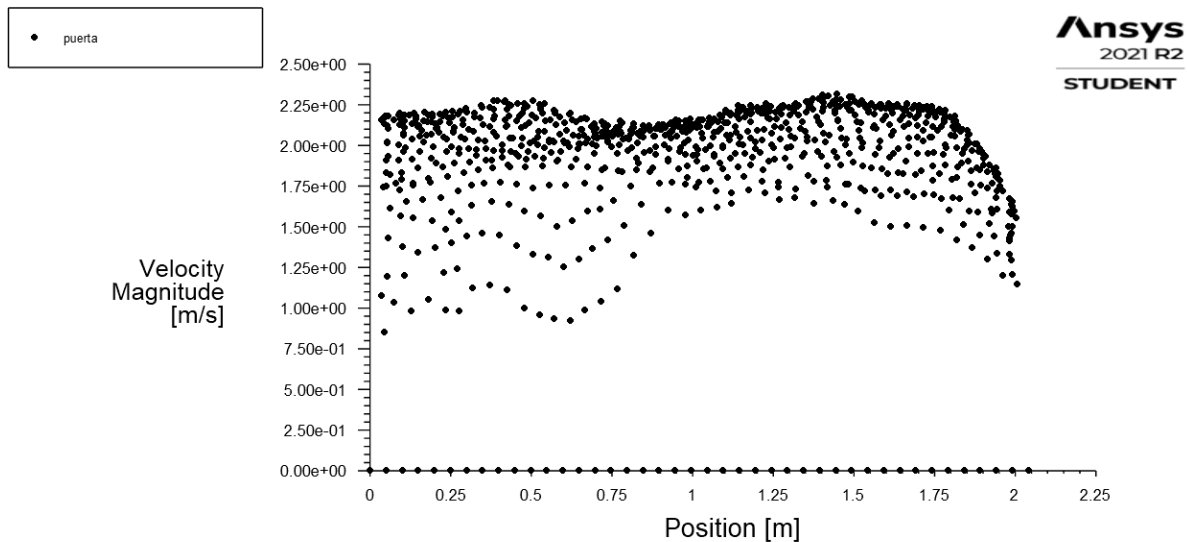


Figura 55. Velocidad del aire en los puntos de la malla numérica correspondientes a la puerta en función de la altura [m/s]. Ensayo 1 realizado el 15/09/2021 en el laboratorio sin alumnos.

La trayectoria que sigue el aire desde que entra por las ventanas hasta que sale por la puerta la podemos apreciar en las figuras 56 y 57. En la figura 56 se representa con líneas y en la 57 con vectores que apuntan hacia la dirección a la que se va desplazando; en ambos el color indica su velocidad. En general, no apreciamos cambios muy significativos de velocidad, aunque debemos destacar un aumento de la velocidad en la puerta. Este aumento se debe a que la superficie de las cuatro ventanas que están abiertas es mayor que la de la puerta, por lo tanto, para que el aire que entra por ellas pueda salir por la puerta, se ve obligado a aumentar su velocidad (aumentando así el caudal).

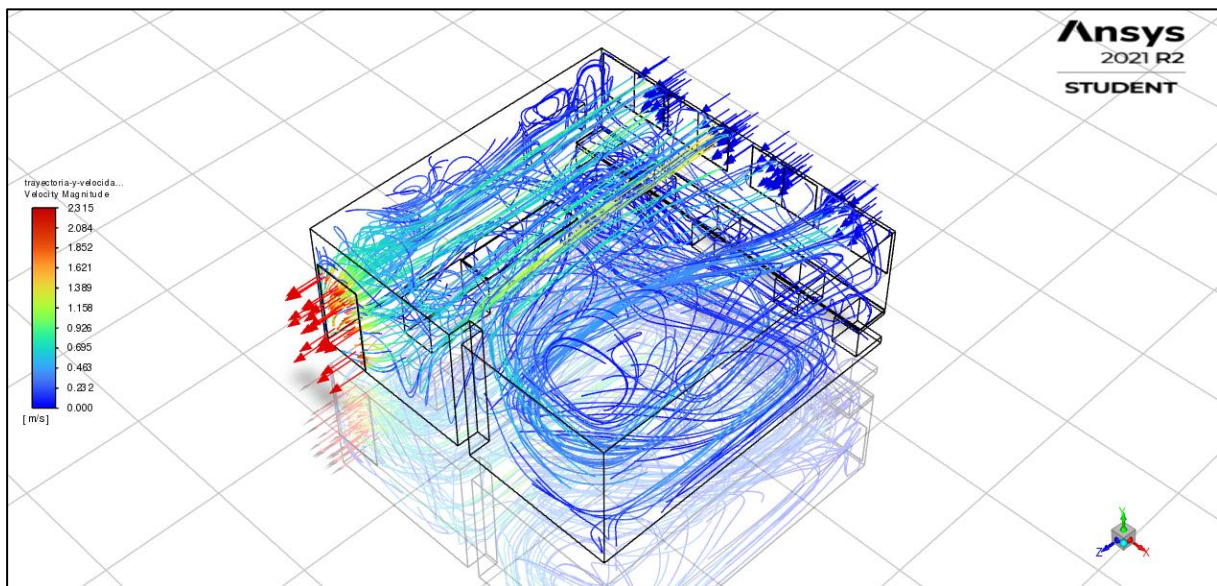


Figura 56. Dirección y velocidad del aire representado con líneas [m/s]. Ensayo 1 realizado el 15/09/2021 en el laboratorio sin alumnos.

También debemos mencionar las vueltas que da el aire y su disminución de velocidad en la zona norte del laboratorio (zona alejada de la puerta). Observamos como el aire cambia de dirección cuando llega a la pared de enfrente de las ventanas y llega incluso de nuevo a ellas (Fig. 57). Esto no es algo deseado para la transmisión por aire de enfermedades como el Covid-19.

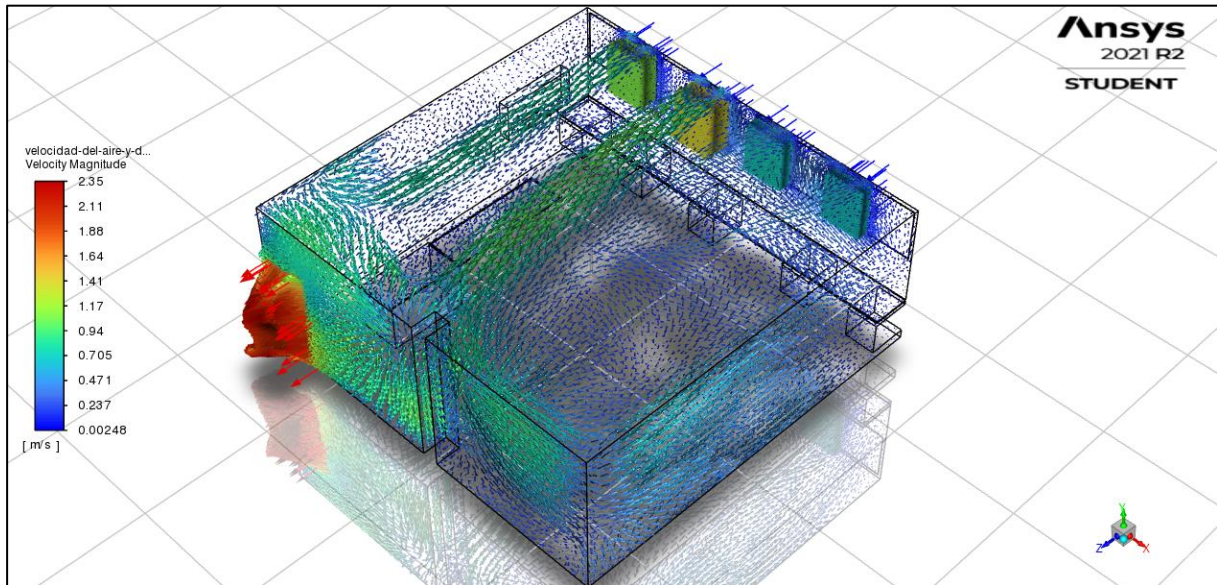


Figura 57. Dirección y velocidad del aire representado con vectores [m/s]. Ensayo 1 realizado el 15/09/2021 en el laboratorio sin alumnos.

En cambio, el aire que entra por las dos ventanas de la izquierda (las que están enfrentadas a la puerta) sigue un recorrido que, en nuestro caso de estudio, es bastante más deseado (Figuras 57 y 58). Observamos que por la segunda ventana por la que entra aire (contando desde la izquierda), entra un caudal mayor y que al llegar a la pared de enfrente se divide haciendo que una parte se vaya directamente hacia la puerta y la otra vaya hacia el lado contrario provocando una especie de turbulencia como hemos mencionado anteriormente. Esto no es lo que estamos buscando en este trabajo, ya que hace que el aire permanezca mayor tiempo en el laboratorio aumentando el riesgo de contagio.

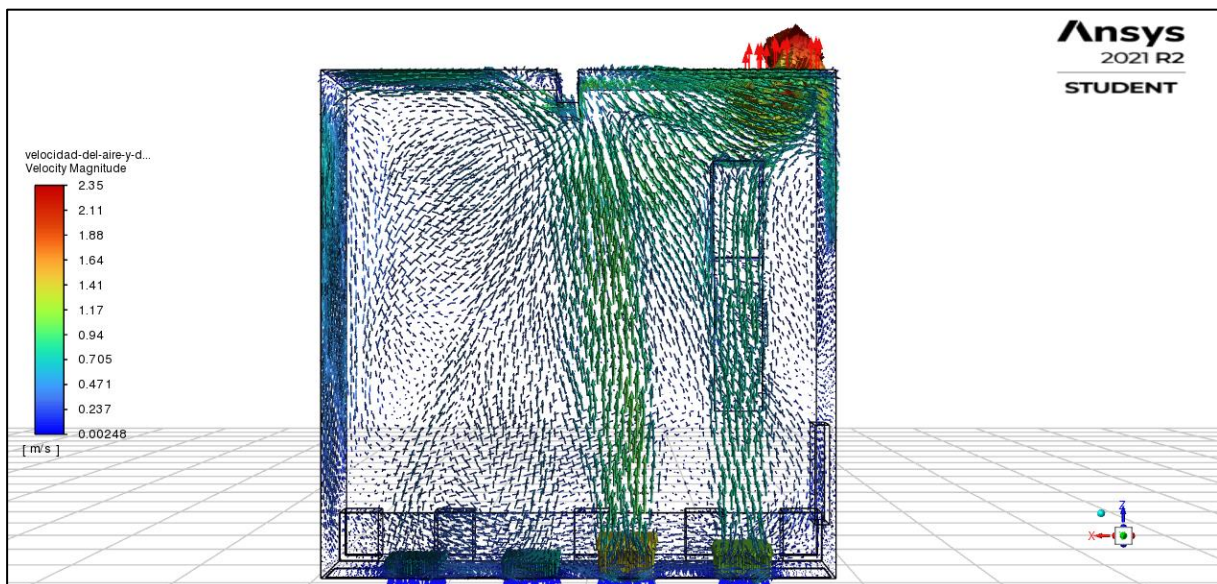


Figura 58. Dirección y velocidad del aire representado con vectores [m/s]. Vista en planta. Ensayo 1 realizado el 15/09/2021 en el laboratorio sin alumnos.

Como podemos observar, en la zona de la puerta la velocidad aumenta de manera considerable. En las mediciones realizadas en el laboratorio esta medida de velocidad en la puerta fue inferior que la obtenida en la simulación. En la Figura 59 podemos ver un detalle en planta del movimiento del aire en las zonas cercanas a las ventanas. El aire que hay por encima de las ventanas y a sus lados se dirige hacia la pared como consecuencia del efecto de succión que produce el chorro principal de aire proveniente de las ventanas. Hay que tener en cuenta que en el modelo numérico hemos considerado que todo el aire que entra por las ventanas sale por la puerta para simplificar un poco el modelo y dejar a un lado las pequeñas pérdidas que pueda haber por rejillas de ventilación, pequeñas aberturas en los cerramientos o, incluso, por las propias ventanas.

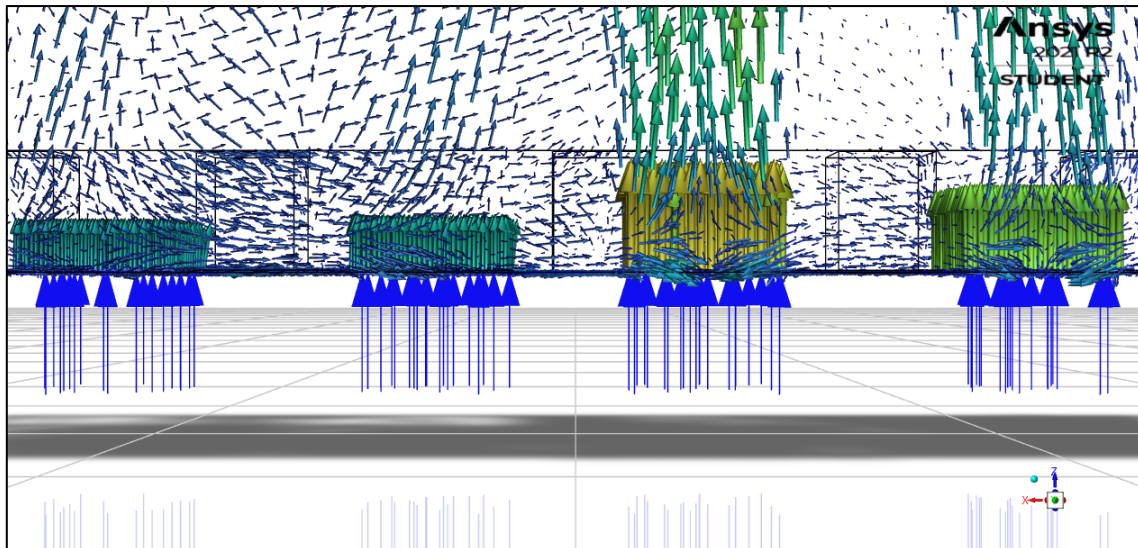


Figura 59. Detalle en planta del comportamiento del aire en las proximidades de las ventanas. Ensayo 1 realizado el 15/09/2021 en el laboratorio sin alumnos.

En cuanto a la humedad absoluta y al movimiento de las partículas de vapor de agua que contiene el aire (Figura 60), observamos que la variación es inapreciable o inexistente. Esto también tiene que ver con que la temperatura ha variado muy levemente.

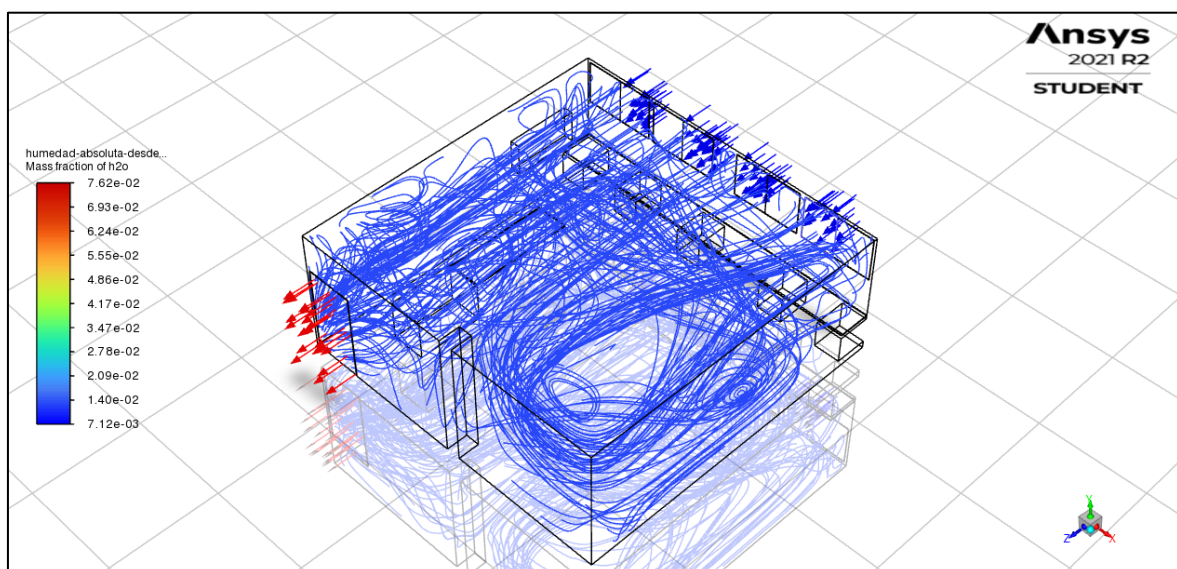


Figura 60. Recorrido de las partículas de vapor de agua contenidas en el aire. Humedad absoluta [kg/kg]. Ensayo 1 realizado el 15/09/2021 en el laboratorio sin alumnos.

En el ensayo realizado en el laboratorio instalamos dos anemómetros 3D en la zona intermedia del laboratorio, por lo tanto, para poder compararlo vamos a analizar el movimiento del aire en esos dos puntos y en el plano horizontal que los contiene.

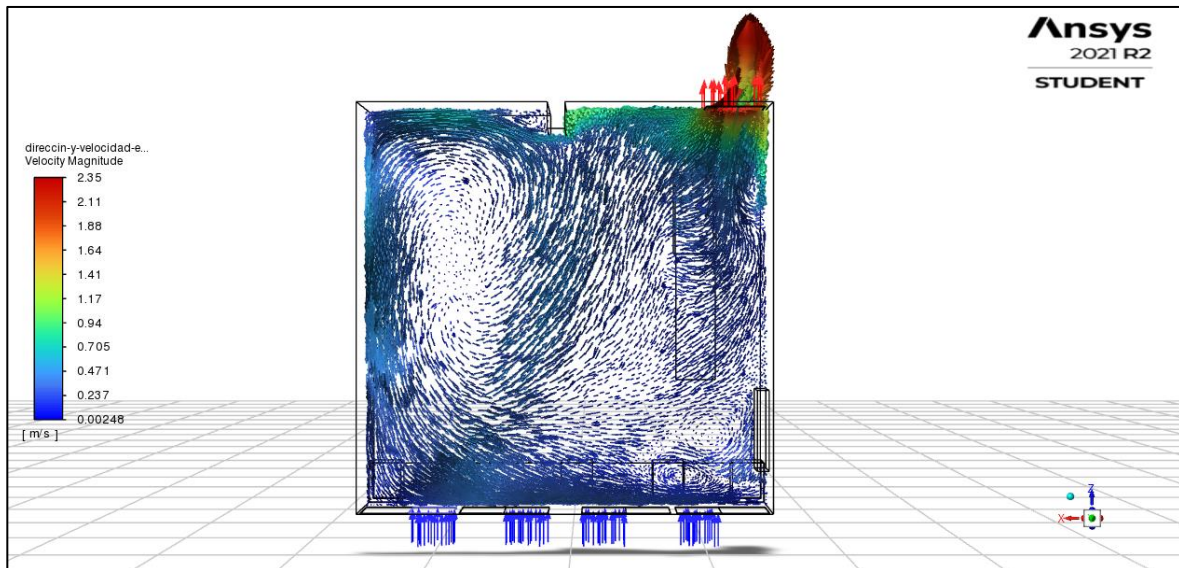


Figura 61. Dirección y velocidad del aire representado con vectores en el plano que contiene los anemómetros 3D [m/s]. Vista en planta. Ensayo 1 realizado el 15/09/2021 en el laboratorio sin alumnos.

En la figura anterior (Figura 61) está representada la dirección que lleva el aire en el plano horizontal que se ha creado a la altura de los anemómetros 3D. Al tratarse de una altura inferior a la de las ventanas, observamos algunas diferencias. En este nivel inferior no se aprecia el aire que entra por las ventanas y va directamente hacia la puerta, sino el que hace turbulencia al chocar contra la pared y recircula por el laboratorio.

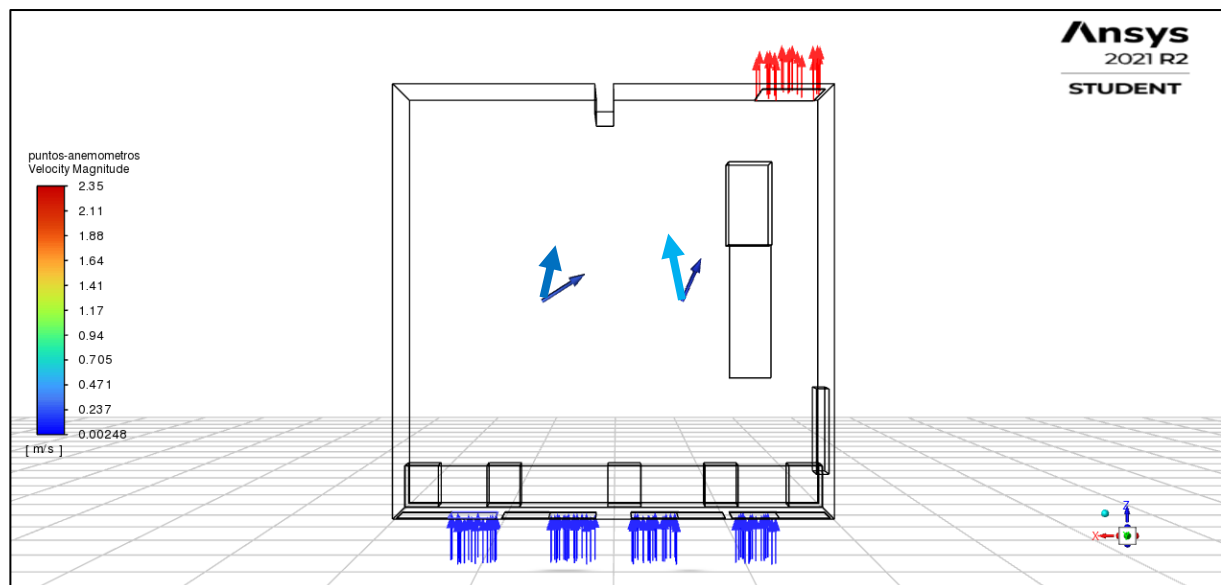


Figura 62. Vectores de dirección del aire superpuestos con los obtenidos mediante los anemómetros 3D (vectores rojos). Ensayo 1 realizado el 15/09/2021 en el laboratorio sin alumnos.

Pero para poder apreciar realmente la dirección que lleva el aire en los puntos en los que miden los dos anemómetros hemos representado de manera superpuesta los vectores obtenidos en Fluent y los datos medidos por los anemómetros (Fig. 62). Al compararlos, observamos una similitud en cuanto a magnitud, pero no en dirección. Esto se puede explicar porque en Fluent el flujo de aire entra de manera perpendicular por la ventana y en la realidad el aire llevaría una dirección determinada que el anemómetro de hilo caliente no es capaz de medir. No es una variación muy importante, pero debemos tener en cuenta que, aunque sea un programa con mucho potencial y una capacidad de cálculo muy elevada, puede diferir considerablemente de la realidad si no se valida el modelo correctamente (Molina-Aiz *et al.*, 2010).

5.2.2. Modelo Ensayo 2

En este segundo ensayo, hemos observado (Fig. 63) que las temperaturas de las distintas superficies del laboratorio también han permanecido bastante constantes al igual que en el primer ensayo. Cabe diferenciar del primero que, en este caso, hay una mayor uniformidad entre ellas, es decir, todas las superficies del laboratorio estaban a una temperatura similar. Esto puede deberse a que tenemos una velocidad de entrada del aire por las ventanas inferior y, además, en este caso dicha velocidad es más uniforme entre las diferentes ventanas haciendo que el aire haga menos turbulencias como veremos un poco más adelante. Además, hay que tener en cuenta que este segundo ensayo se realizó por la mañana después de permanecer el laboratorio cerrado durante la noche anterior, lo que origina una temperatura homogénea en su interior.

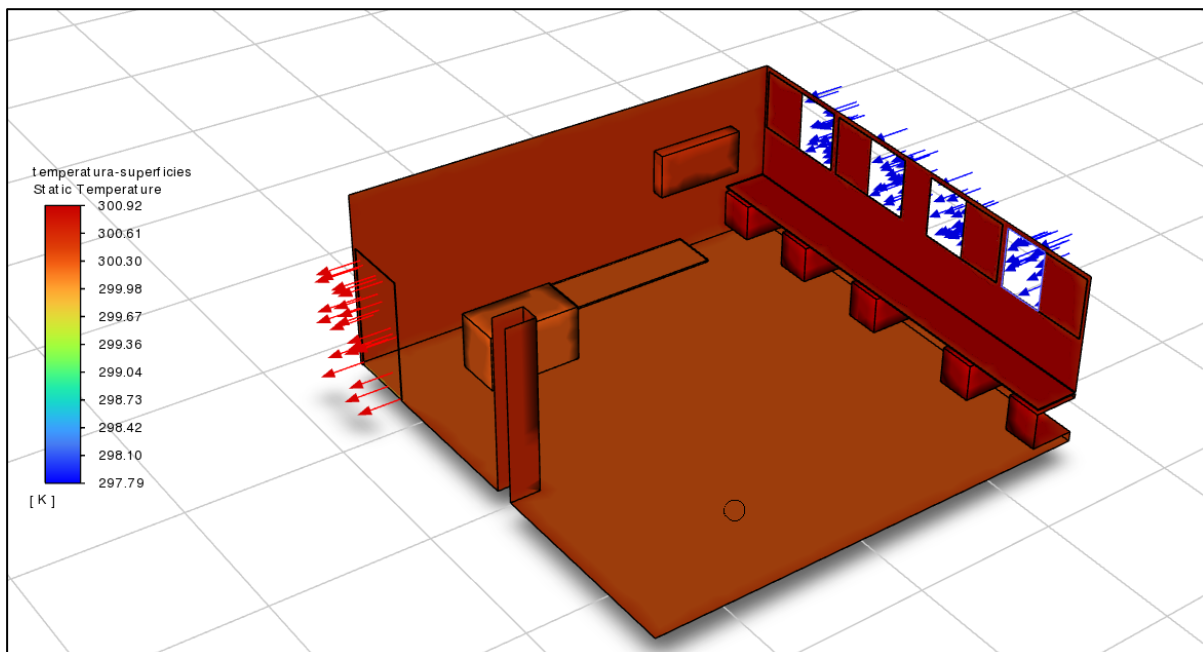


Figura 63. Distribución de temperaturas en las superficies [K]. Ensayo 2 realizado el 16/09/2021 en el laboratorio sin alumnos.

La representación de las líneas de corriente simuladas con el modelo de CFD (Fig. 64) permite visualizar el recorrido que sigue el aire desde que entra por las ventanas hasta que sale por la puerta. El código de colores indica la velocidad a la que se desplaza, indicando los tonos azules baja velocidad y los rojos una velocidad mayor como se aprecia en la escala de la izquierda. De igual manera que ocurría en el ensayo 1, el aire que entra por las ventanas que están enfrentadas a la puerta sale de forma más directa que el que entra por las demás. Con respecto al ensayo 1, la velocidad de entrada del aire por las ventanas es más uniforme entre ellas; por este motivo, el aire hace menos turbulencias en el interior del laboratorio consiguiendo que sea expulsado en un tiempo menor.

En la zona más alejada de la puerta (junto a la pared norte del fondo) vemos como hay una zona en la que el aire se desplaza a baja velocidad hasta que es arrastrado por otra corriente con mayor velocidad. Estas zonas en las que el aire se mueve lentamente no son deseables en la prevención de enfermedades como el Sars-CoV-2 ya que cuando hubiese un posible sujeto infectado ese aire podría llegar a otro individuo. Otra cosa que podemos comentar es el cambio de color de las líneas de corriente que indica que el aire aumenta su velocidad al salir por la puerta, esto se debe simplemente a que la superficie de la puerta es menor que la de las ventanas y para que pueda salir todo el caudal que entra se ve obligado a aumentar su velocidad.

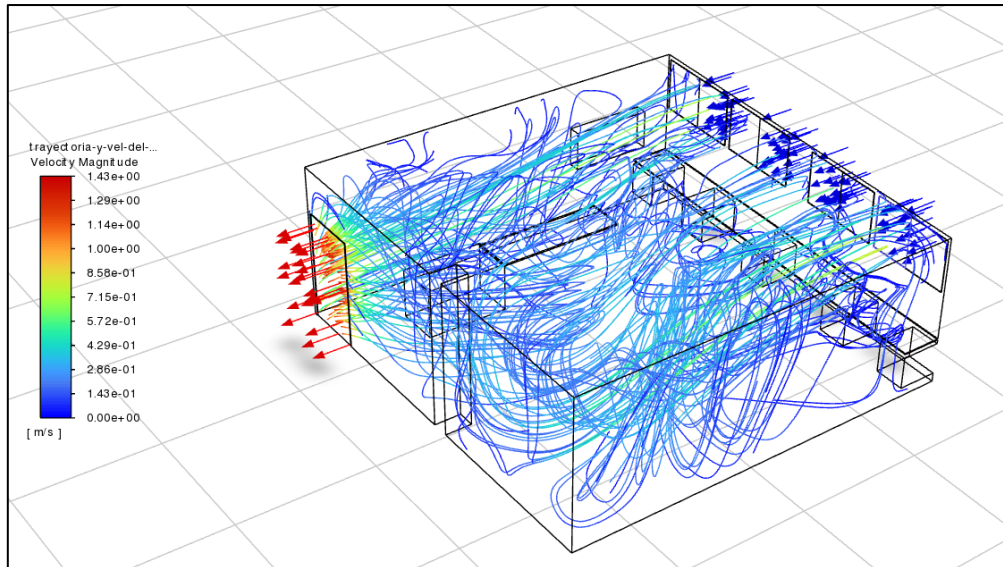


Figura 64. Dirección y velocidad del aire representado con líneas de corriente [m/s]. Ensayo 2 realizado el 16/09/2021 en el laboratorio sin alumnos.

En las Figuras 65 y 66, vemos representado el movimiento del aire y su velocidad, pero con vectores que indican en todo momento su dirección para poder analizarlo de una forma un poco más profunda. En la figura 65 podemos apreciar de una forma más clara que en la figura anterior, como el aire cuando llega a la pared que está en frente de las ventanas por la parte más alejada de la puerta, retrocede de nuevo hacia la zona de entrada de aire.

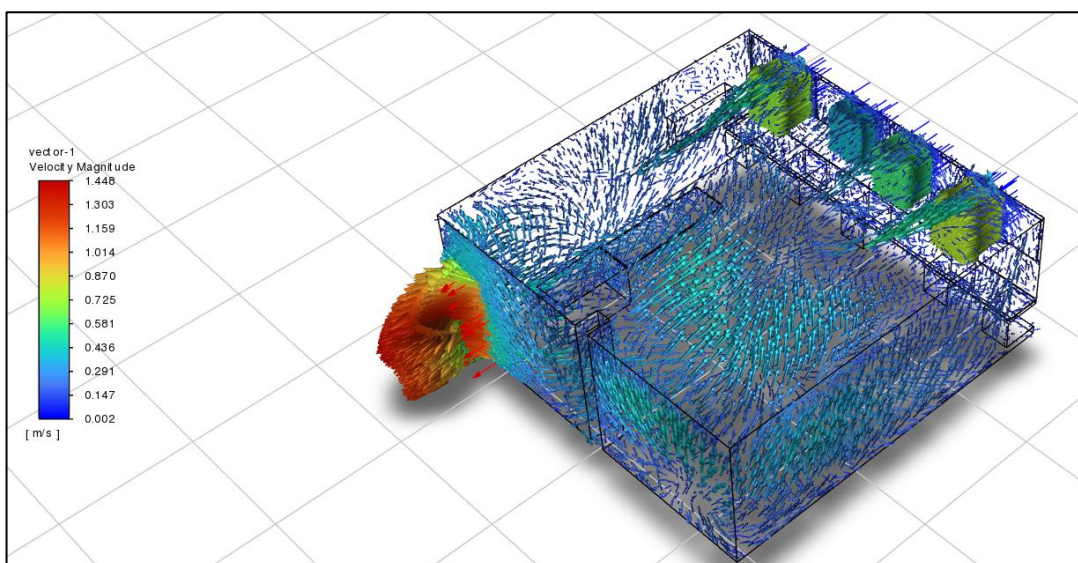


Figura 65. Dirección y velocidad del aire representado con vectores [m/s]. Ensayo 2 realizado el 16/09/2021 en el laboratorio sin alumnos.

En la Figura 66 tenemos la misma representación que la anterior pero vista en planta. De esta manera, podemos ver más claramente la dirección que toma el aire al entrar por la ventana. Se puede apreciar que el aire de la ventana más enfrentada a la puerta presenta una trayectoria más limpia hacia esta que para el resto de las ventanas. La mayor dificultad del aire para llegar a la puerta, como hemos comentado anteriormente, se puede deber a las turbulencias generadas en el flujo que hacen que el aire regrese otra vez hacia la zona de las ventanas.

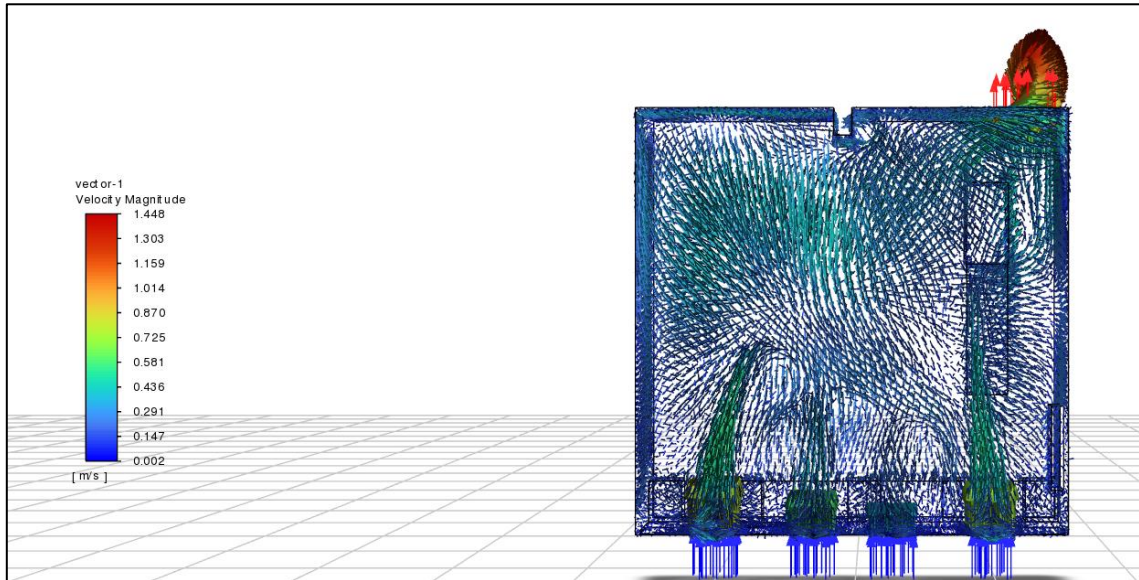


Figura 66. Dirección y velocidad del aire representado con vectores [m/s]. Vista en planta. Ensayo 2 realizado el 16/09/2021 en el laboratorio sin alumnos.

En cuanto a la humedad absoluta (Fig. 67), ocurre lo mismo que en el ensayo anterior. Se mantiene prácticamente invariable a lo largo del trayecto que realiza el aire en el interior del laboratorio. Esto se debe a que, en este ensayo, el laboratorio también estaba libre de ocupación y no había ningún emisor de vapor de agua que no fuesen las ventanas.

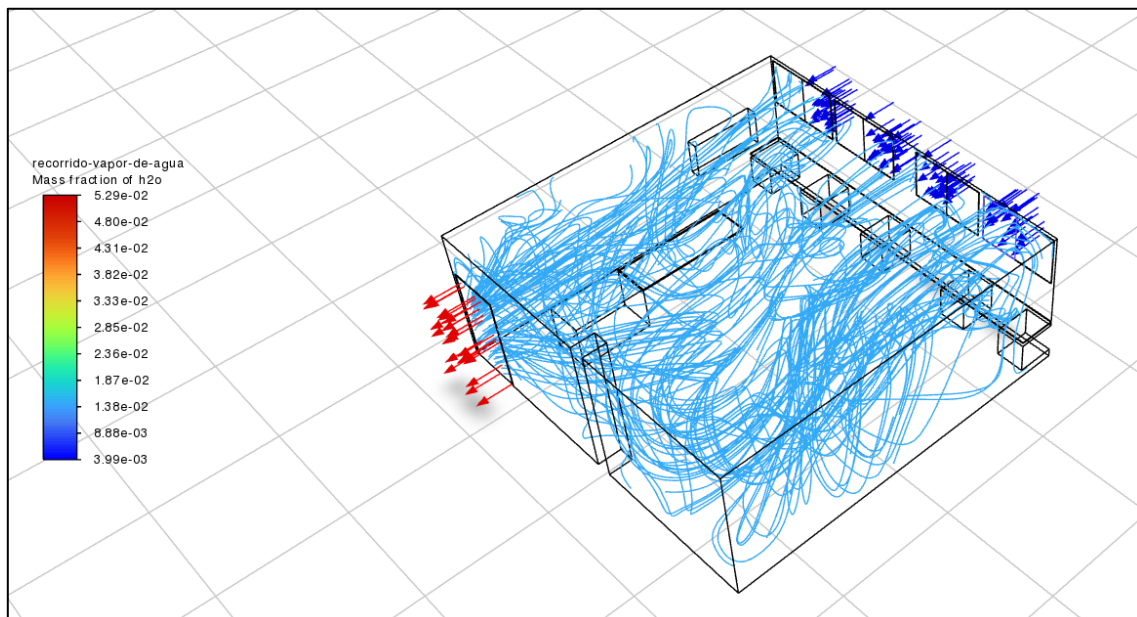


Figura 67. Recorrido de las partículas de vapor de agua contenidas en el aire. Humedad absoluta [kg/kg]. Ensayo 2 realizado el 16/09/2021 en el laboratorio sin alumnos.

Los anemómetros 3D estaban colocado a una altura de 1,5 m sobre el nivel del suelo. Para estudiar un poco mejor el comportamiento del aire en ese nivel, se ha representado la velocidad y dirección del aire en un plano a esa altura (Fig. 68). Las zonas en las que tenemos una mayor concentración de vectores y un color más verdoso son zonas de mayor velocidad que la de tonos azulados.

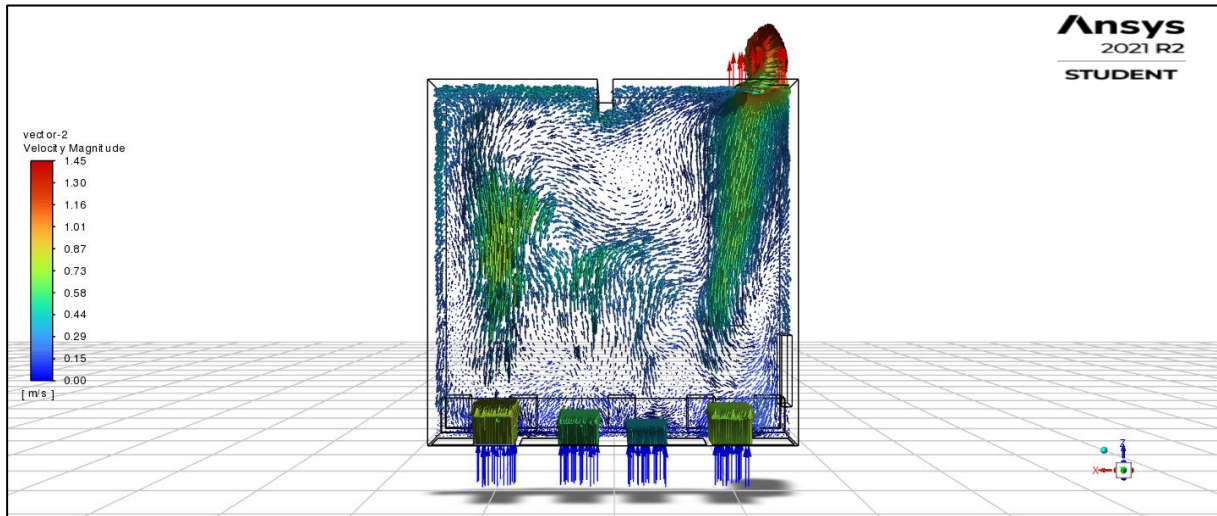


Figura 68. Dirección y velocidad del aire representado con vectores en el plano que contiene los anemómetros 3D [m/s]. Vista en planta. Ensayo 2 realizado el 16/09/2021 en el laboratorio sin alumnos.

Para poder comparar la dirección del aire obtenida en la medición con los anemómetros 3D y la que hemos simulado para este ensayo, se han representado los vectores de dirección y velocidad del aire en los puntos en los que se encontraban dichos aparatos de medida (Fig. 69).

El hecho de que el vector azul (del anemómetro sur) sea tan pequeño, indica una baja velocidad media que es consecuencia de que nos encontremos en una zona de turbulencia en la que el aire circula a menor velocidad. Estas diferencias también se justifican con el hecho de que en dos de las ventanas no teníamos aparatos de medida, por lo que estos datos del aire de entrada, se han implementado de forma aproximada.

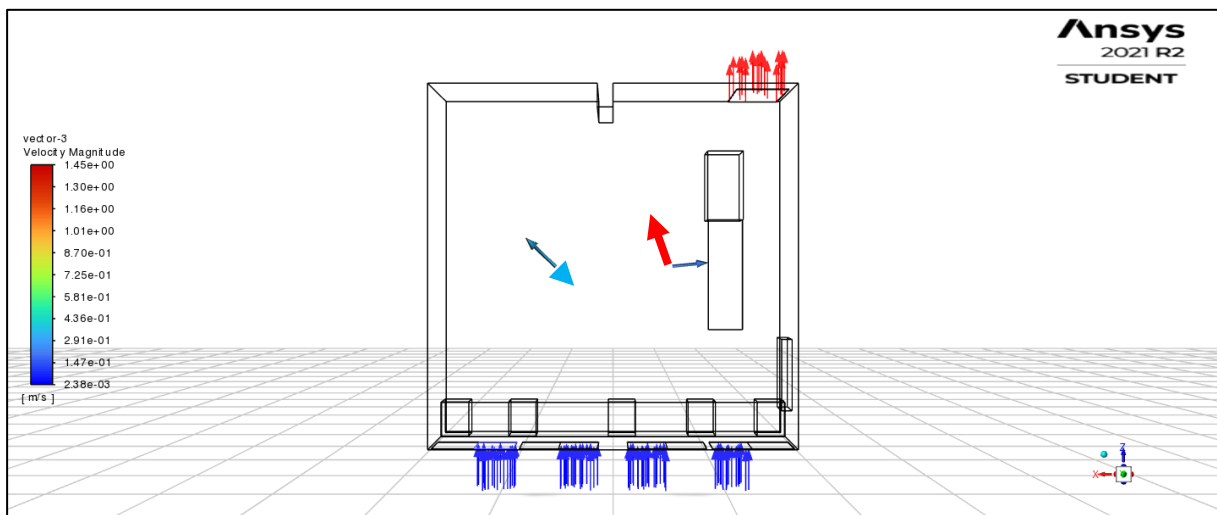


Figura 69. Vectores de dirección del aire superpuestos con los obtenidos mediante los anemómetros 3D. Ensayo 2 realizado el 16/09/2021 en el laboratorio sin alumnos.

5.2.3. Modelo Ensayo 3

Este tercer ensayo se llevó a cabo durante el desarrollo de una clase de prácticas de Termotecnia en la que se encontraban presentes 19 alumnos más el profesor. Por lo tanto, analizaremos un poco más adelante el comportamiento del CO₂ y del vapor de agua, ya que los alumnos y el profesor expulsan dichas sustancias durante su respiración.

Las temperaturas del laboratorio son bastante uniformes en todas las superficies con excepción del cuerpo de los alumnos que presenta una mayor temperatura como era de esperar (Figura 70), al introducir como condición de contorno una temperatura corporal de 35 °C.

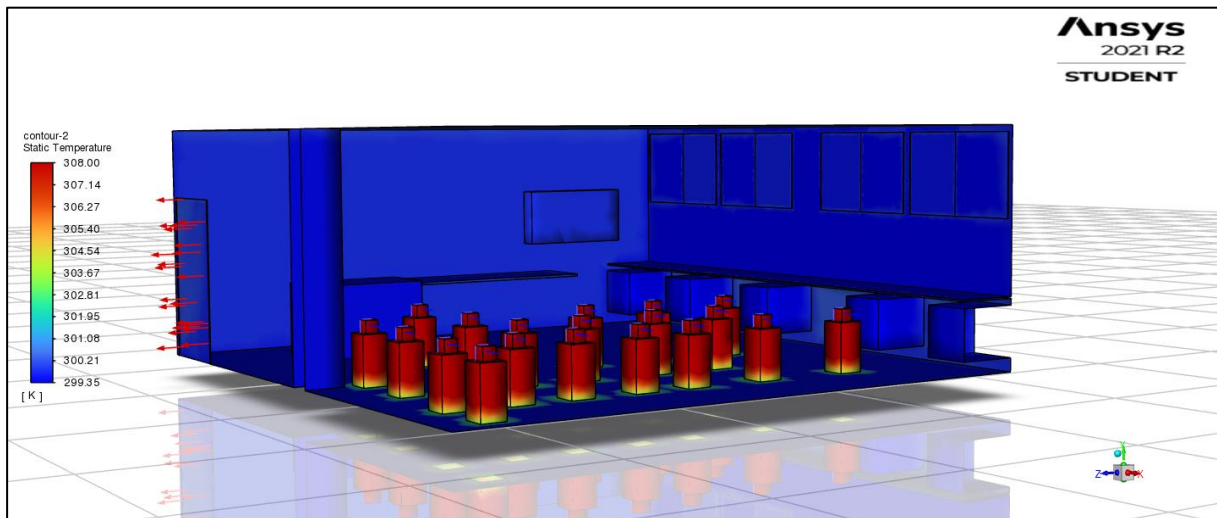


Figura 70. Distribución de temperaturas en las superficies [K]. Ensayo 3 realizado el 20/09/2021 en el laboratorio con 19 alumnos durante el desarrollo de una clase de prácticas.

La trayectoria que sigue el aire y su velocidad en este ensayo, la podemos apreciar en la Figura 71. Con respecto a los dos ensayos anteriores realizados con el laboratorio vacío, hay una mayor turbulencia en la zona más alejada de la puerta, apreciamos una mayor concentración de líneas y una velocidad menor.

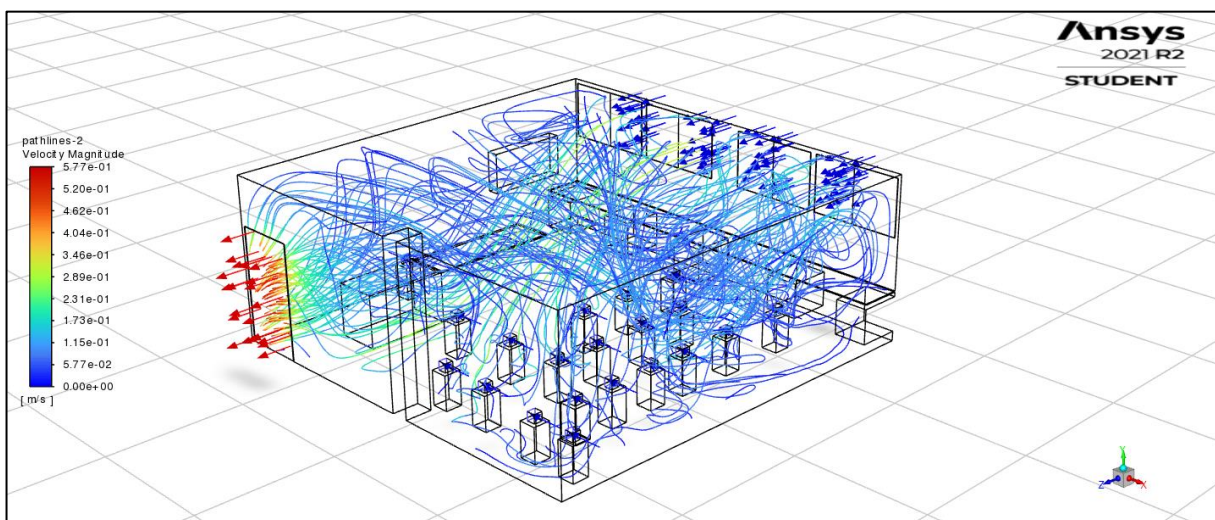


Figura 71. Trayectoria y velocidad del aire representado con líneas [m/s]. Ensayo 3 realizado el 20/09/2021 en el laboratorio con 19 alumnos durante el desarrollo de una clase de prácticas.

Como hemos mencionado en la descripción de la figura anterior, el aire presenta una mayor turbulencia que en los ensayos anteriores. Podemos apreciar esto con mayor claridad en la Figura 72. La zona de mayor turbulencia, como cabría esperar, la encontramos en la zona más alejada de la puerta, que justamente coincide con la zona de mayor ocupación de alumnos. Se producen estas turbulencias debido a la presencia de los alumnos que obstaculizan el flujo de aire. Los obstáculos producen aceleraciones del flujo a su alrededor y la generación de remolinos que aumentan considerablemente la turbulencia. Aunque esto puede aumentar el tiempo de paso del aire por el laboratorio, lo cual en principio no es bueno para su ventilación, el aire permite una mejor mezcla entre las diferentes zonas lo que evita la formación de zonas de estancamiento, aumentando la eficacia de la ventilación a la hora de renovar el aire interior.

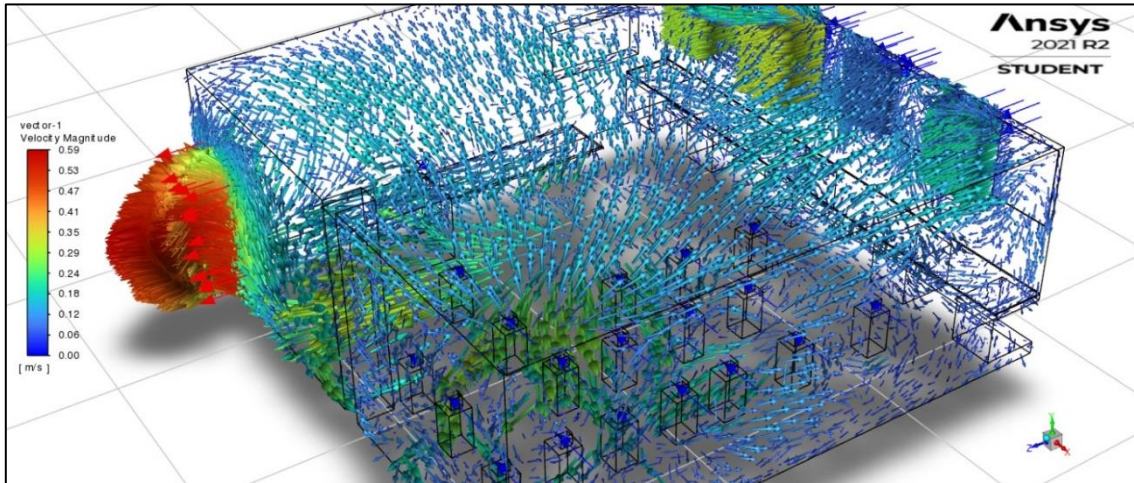


Figura 72. Detalle del movimiento del aire hacia las ventanas representado con vectores [m/s]. Ensayo 3 realizado el 20/09/2021 en el laboratorio con 19 alumnos durante el desarrollo de una clase de prácticas.

En la Figura 73, se ha representado el movimiento del aire entre los alumnos. Observamos como el aire rodea a los alumnos al llegar a ellos creando una zona de turbulencias que se van intensificando conforme se va aproximando a la esquina del laboratorio. El alumno de la primera fila también crea turbulencias cuando es rodeado por el aire, pero al estar en la trayectoria entre las ventanas y la puerta gran parte del flujo de aire se dirige directamente hacia esta.

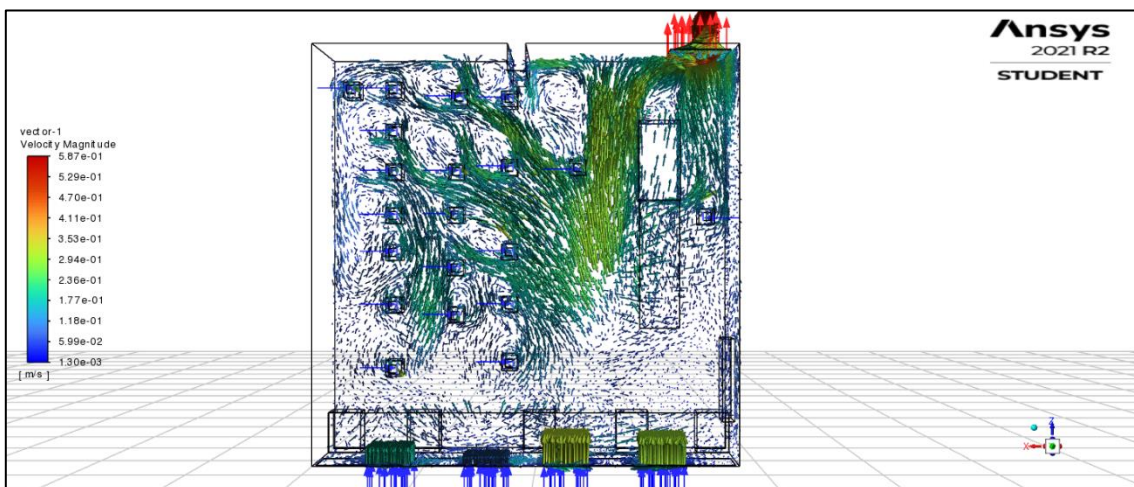


Figura 73. Trayectoria y velocidad del aire entre los alumnos representado con vectores [m/s]. Ensayo 3 realizado el 20/09/2021 en el laboratorio con 19 alumnos durante el desarrollo de una clase de prácticas.

Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

Vamos a analizar la dirección del aire en los puntos donde teníamos instalados los dos anemómetros 3D al igual que en los ensayos anteriores (Figura 74).

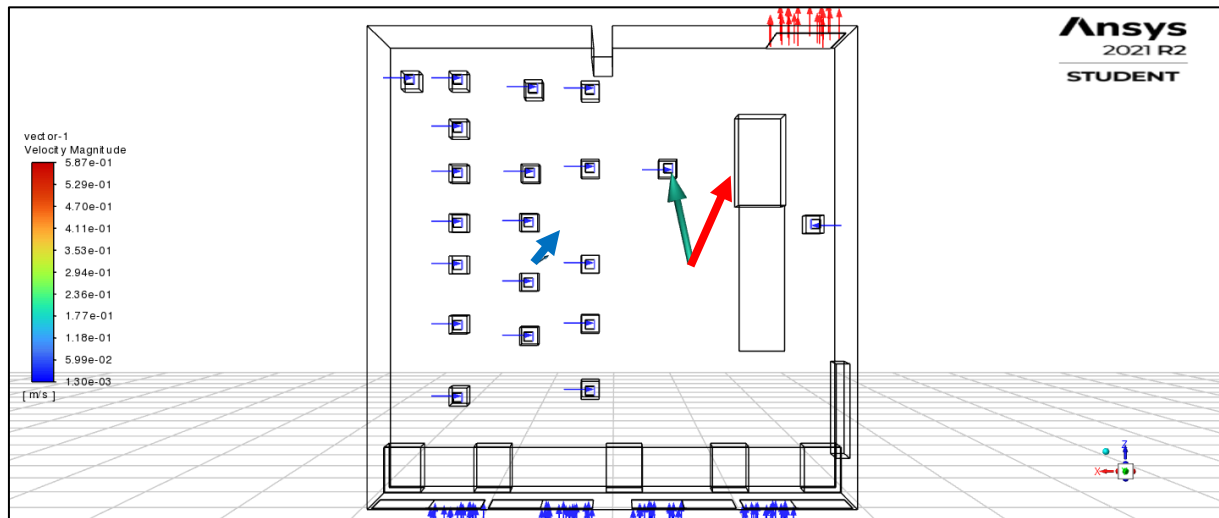


Figura 74. Vectores de dirección del aire superpuestos con los obtenidos mediante los anemómetros 3D. Ensayo 3 realizado el 20/09/2021 en el laboratorio con 19 alumnos durante el desarrollo de una clase de prácticas.

El tamaño del vector que hace referencia al anemómetro norte (el más alejado de la pizarra) vemos que tiene un tamaño menor, lo que nos está indicando una velocidad del aire inferior en ese punto. Esto se explica porque nos está dando la velocidad media y, al ser una zona de turbulencia, hace que la resultante de la velocidad media tenga un valor bajo. Además, en este caso los vectores presentan bastante similitud.

Como todos sabemos, las personas expulsamos por nuestras vías respiratorias CO_2 y H_2O procedentes de la respiración. Por este motivo, vamos a analizar estas emisiones con la ayuda de las distribuciones simuladas con CFD. Se aprecia como justo delante de la cara se representa en color rojo porque hay una mayor concentración tanto de CO_2 (Fig. 75) como de vapor de agua (Fig. 76) cuando acaba de ser expulsada por estos; pero cuando entra en contacto con el resto del aire del laboratorio se diluye en el aire y se homogeneiza.

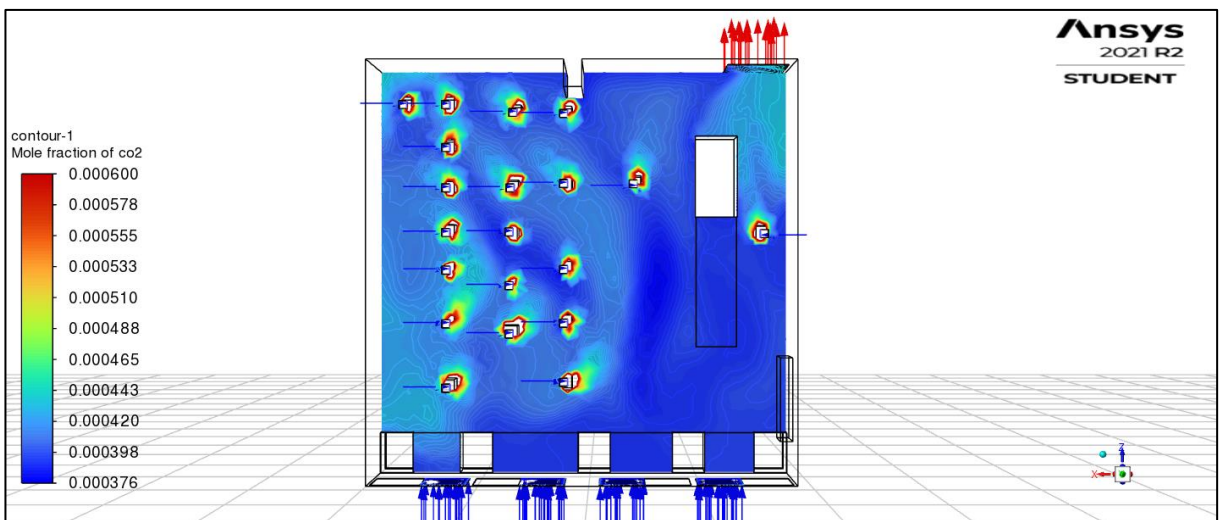


Figura 75. Emisión de CO_2 de los alumnos visto en planta. Ensayo 3 realizado el 20/09/2021 en el laboratorio con 19 alumnos durante el desarrollo de una clase de prácticas.

Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

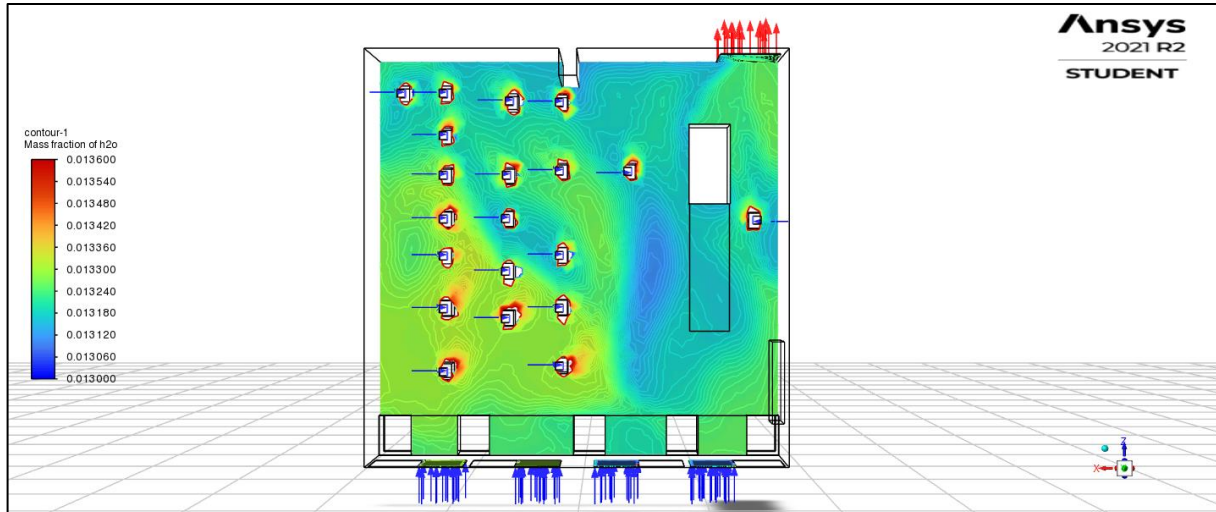


Figura 76. Emisión de vapor de agua de los alumnos visto en planta. Ensayo 3 realizado el 20/09/2021 en el laboratorio con 19 alumnos durante el desarrollo de una clase de prácticas.

En la Figura 77 vemos la distribución de CO_2 , representando en color rojo la concentración mayor y en azul la menor. Se aprecia claramente como entra por las ventanas en torno a 375 ppm y aumenta la concentración debido al CO_2 que expulsan los alumnos, aumentando su nivel hasta unas 435 ppm aproximadamente. Cabe destacar que la mayor concentración simulada se observa en la esquina noreste del laboratorio (en torno a 470 ppm). Debido a que esta es la zona del laboratorio más alejada de las ventanas y de la puerta hay poco movimiento de aire y hace que se acumule una mayor cantidad de CO_2 . Como ya hemos mencionado con anterioridad, la generación de estas zonas de estancamiento no es deseable ya que favorecen la transmisión aérea de enfermedades. Si algún individuo estuviese infectado el virus, los aerosoles que expulsa permanecerían más tiempo en suspensión en el aire del interior del laboratorio haciendo que haya un mayor riesgo de contagio.

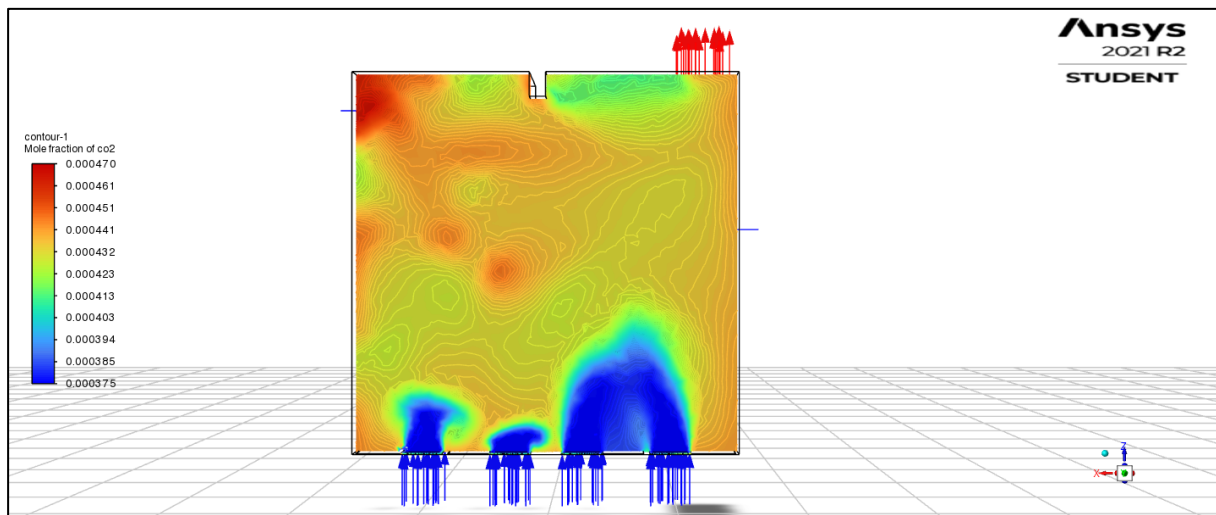


Figura 77. Distribución de CO_2 en el laboratorio. Ensayo 3 realizado el 20/09/2021 en el laboratorio con 19 alumnos durante el desarrollo de una clase de prácticas.

En la última figura (Figura 78) se representa la distribución de vapor de agua. Podemos apreciar en dicha simulación como el vapor presenta un comportamiento similar al del CO_2 , con la diferencia que no apreciamos una concentración superior en la esquina como ocurría en la figura anterior. Al igual

Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

que hemos mencionado para el caso de la distribución de CO_2 , se aprecia como el aire entra por la ventana con una cantidad de vapor de agua (o concentración absoluta) que aumenta al recorrer el laboratorio debido al vapor que expulsan los alumnos.

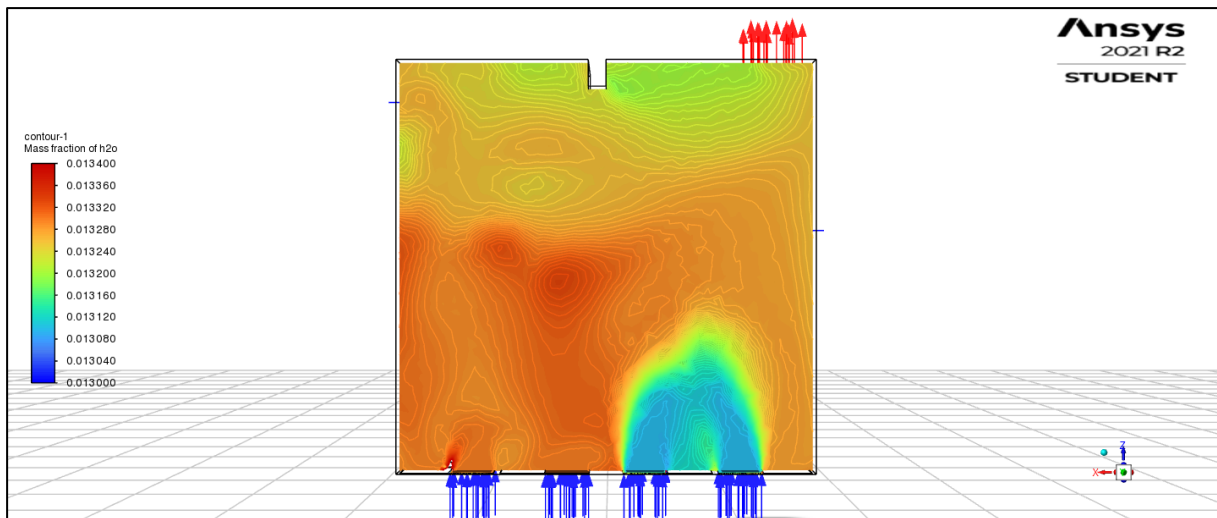


Figura 78. Distribución de vapor de agua en el laboratorio. Ensayo 3 realizado el 20/09/2021 en el laboratorio con 19 alumnos durante el desarrollo de una clase de prácticas.

5.3. Validación del modelo numérico

Para llevar a cabo la validación de nuestro modelo numérico se han comparado los resultados de las simulaciones realizadas con ANSYS/Fluent y los valores medidos experimentalmente en el laboratorio para los tres ensayos realizados (Tabla 17). Para poder comparar ambos valores de una manera clara y sencilla, se ha añadido a dicha tabla una fila con la diferencia entre estos dos valores en porcentaje (considerada como el error de modelización).

Tabla 17. Comparación de los resultados obtenidos con ANSYS/Fluent y los medidos en el laboratorio.

Ensayo	Origen	Flujo de entrada				Flujo de salida			
		q [m ³ /s]	T [°C]	x [kg/kg]	CO_2 [ppm]	q [m ³ /s]	T [°C]	x [kg/kg]	CO_2 [ppm]
1	Real	3,414	27,9	0,0128	362	3,139	28,2	0,0129	384
	Simulado	3,169	27,9	0,0128	362	3,168	28,0	0,0128	361
	Error [%]	7,2	-	-	-	0,9	0,7	0,8	6
2	Real	1,562	24,7	0,0146	374	1,994	25,6	0,0143	383
	Simulado	1,995	24,7	0,0146	374	1,998	25,5	0,0146	374
	Error [%]	27,7	-	-	-	0,2	0,4	2,1	2,3
3	Real	0,683	26,5	0,0132	375	0,761	29,6	0,0141	445
	Simulado	0,747	26,5	0,0132	375	0,752	27,1	0,0132	417
	Error [%]	9,4	-	-	-	1,2	8,4	6,4	6,3

De forma generalizada para todos los valores, podemos afirmar que no presentan grandes diferencias. Los mayores porcentajes de error se observan en los caudales de entrada (Tabla 17) ya que en el modelo numérico de CFD se ajustó el caudal de las ventanas utilizado como condición de contorno para que el caudal total de entrada fuese similar al caudal de salida medido en el laboratorio a través de la puerta (tal y como se indicó en la sección 4.1.4.). Esto se justifica porque en las mediciones del laboratorio únicamente disponíamos de aparatos de medida, por los que solo se midió la velocidad del aire en dos de las cuatro ventanas que estaban abiertas, por ello, no podemos saber con exactitud el caudal total de entrada. Dado que el principal interés de las simulaciones es comprobar la concentración de CO₂ y vapor de agua a la salida por la puerta, se utilizó este caudal como referencia para determinar el caudal de entrada por las dos ventanas en las que no se midió experimentalmente.

La temperatura en el ensayo 3 simulada con ANSYS/Fluent es inferior a la medida en el ensayo real. En el ensayo 3, es en el único que contamos con presencia de alumnos, la temperatura corporal de estos se fijó en 35 °C. El haber obtenido una temperatura del aire de salida inferior a la real nos hace pensar que posiblemente deberíamos de haber establecido un valor para la temperatura corporal de los alumnos algo mayor.

Los datos de humedad absoluta y de CO₂, aunque no presentan grandes diferencias, no dejan de ser una aproximación en el ensayo de CFD, ya que se fijó la emisión de vapor de agua y de dióxido de carbono por alumno en función de valores medios obtenidos de la bibliografía (sección 4.1.5.). Estos valores pueden ser muy variables en función del peso de las personas y de la actividad física que realizan. Como no se nos alejan muchos unos valores de otros, podemos dar por correctos los valores usados como condiciones de contorno para representar la respiración.

5.4. Análisis del nivel de confort ambiental generado en el laboratorio

A la hora de evaluar el nivel de confort ambiental en el interior del laboratorio debemos de analizar las condiciones que establece la normativa vigente en cuanto a los distintos parámetros del aire (velocidad, temperatura, humedad relativa y concentración de CO₂) y compararlos con los que se obtienen realmente en el laboratorio.

La normativa de aplicación en materia de confort es principalmente el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE), que establece los valores considerados adecuados para el bienestar de las personas en recintos climatizados.

Tabla 18. Análisis del nivel de confort de las condiciones climáticas simuladas con CFD. Velocidad del aire v , temperatura del aire T , humedad relativa HR y concentración de CO₂ C .

Ensayo y fecha	Datos obtenidos				Límites de confort			
	v [m/s]	T [°C]	HR [%]	C [ppm]	v [m/s] ^a	T [°C] ^b	HR [%] ^b	C [ppm] ^c
Ensayo					A	B	B	c
1 (Sin alumnos)	0,377	27,9	55,51	361	0,180	23-25	45-60	C_e+500
2 (Sin alumnos)	0,234	25,4	73,07	374	0,155			
3 (Con alumnos)	0,101	27,1	60,03	418	0,201			

Fuentes:

^a Velocidad media del aire en la zona no ocupada, [v [m/s]= T [°C]/100 – 0,10, v [m/s]= T [°C]/100 – 0,07], Instrucción 1.1.4.1.3 del RITE (BOE, 2007).

^b Condiciones interiores de diseño, Tabla 1.4.1.1 del RITE (BOE, 2007).

^c Concentración de CO₂ en los locales ocupados por personas por encima de la concentración exterior C_e , Tabla 1.4.2.3 (RITE, 2007).

El parámetro de la velocidad del aire viene determinado por la fórmula indicada en el pie de tabla. Aplicando dicha fórmula vemos que su valor debe estar comprendido entre 0,155 y 0,201 m/s. Nuestros valores medidos oscilaron entre 0,101 y 0,377 m/s. Observamos que en dos de los tres ensayos se supera el valor límite establecido por la normativa, esto puede ser molesto en cuanto a confort, pero a nivel de ventilación nos ayuda a prevenir enfermedades de transmisión aérea como por ejemplo el SARS-CoV-2 que hemos tratado en este trabajo.

El valor de la temperatura debe estar comprendido entre 23 y 25 °C. Nuestros valores medidos oscilan entre 25,4 °C y 27,9 °C. Por lo tanto, también superamos el baremo establecido en el RITE. Esto se explica por la temperatura que tiene el aire exterior, ya que las mediciones se llevaron a cabo en el mes de septiembre.

En cuanto a la humedad relativa, la normativa establece un rango de entre el 45 y el 60 %. Los datos recogidos en nuestras mediciones han oscilado entre el 55,51 y el 73,07 %. Vemos que solo en uno de los ensayos estamos dentro del rango establecido, en otro un poco por encima y, finalmente, en el restante vemos que se supera de manera relativamente elevada. La situación del laboratorio es en zona costera, por lo que el aire viene cargado de humedad debido a la cercanía del mar. Analizando estos datos y relacionándolo con el Covid-19, es preferible una humedad alta, ya que las microgotas que expulsan los sujetos infectados aumentan su tamaño al absorber humedad y su capacidad para desplazarse por el aire se ve afectada dificultando su propagación y reduciendo el riesgo de contagio (Shaman *et al.*, 2011).

Por último, el nivel máximo del valor de concentración de CO₂ está establecido en 500 ppm por encima de la concentración exterior (partículas por millón). Los datos tomados están comprendidos entre 361 y 418 ppm, por lo tanto, nos encontramos en todos los ensayos por debajo del nivel máximo. Un exceso en la concentración de CO₂ puede provocar, además de un mayor riesgo de contagio, falta de concentración, somnolencia, dolor de cabeza, etcétera.

5.5. Modelo óptimo del laboratorio:

En este apartado del trabajo, se han realizado varias simulaciones con distintas configuraciones en la entrada de aire, es decir, combinando la apertura de las ventanas. Para que todas se puedan comparar de una manera equitativa se han establecido unas condiciones de entrada de aire por todas las ventanas iguales en todos los casos, en base a los valores medidos en los ensayos experimentales:

- Velocidad de 0,2 m/s.
- Concentración de CO₂ de 376 ppm
- Cantidad de vapor de agua de 0,0131 kg/kg.

Además, se empleará la misma escala en las representaciones de la distribución del CO₂ en el laboratorio para poder hacer una comparación de una forma más visual y sencilla.

▪ Configuración 1. Apertura de dos ventanas de los extremos

Las ventanas que se configuraron como entrada de aire en la primera simulación, fueron dos de los extremos (las penúltimas). Vemos en la Figura 79 como se genera cierta turbulencia entre los alumnos y como aumenta la velocidad del aire al pasar entre ellos.

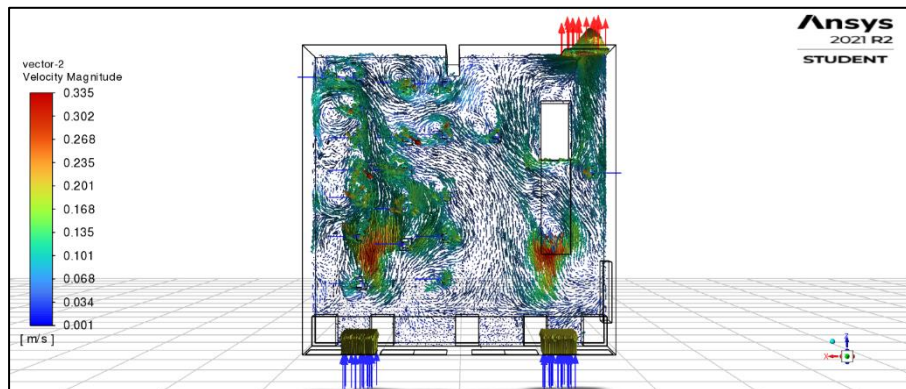


Figura 79. Dirección y velocidad del aire. Ensayo 4.1.

Si nos fijamos en la distribución del CO₂, observamos que por la zona en la que se encuentran los alumnos el color se hace un poco más verdoso-amarillento; lo que nos está indicando una mayor concentración de CO₂ en esa zona (Fig. 80). Lo que pretendemos obtener es una combinación de apertura de ventanas en la que la concentración donde están los alumnos y, en general en el aula, sea lo más reducida posible.

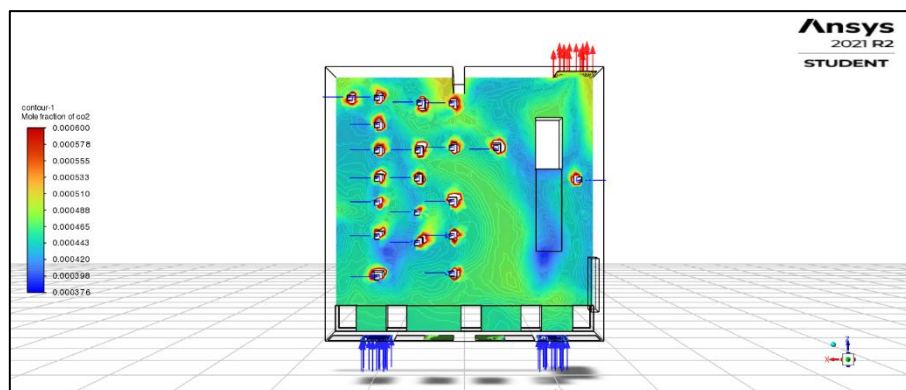


Figura 80. Distribución de CO₂ en el laboratorio. Ensayo 4.1.

▪ Configuración 2. Apertura de dos ventanas enfrentadas a la puerta

En esta simulación, se abrieron dos de las ventanas que más enfrentadas quedan a la puerta. En la Figura 81, vemos representados los vectores de dirección y velocidad de dicho ensayo. Observamos e ellos como por la zona cercana a la pizarra el aire lleva una velocidad elevada y sale por la puerta de una forma bastante rápida. Por el contrario, una parte de este aire genera una turbulencia al llegar a la zona de la mesa y se desvía hacia los alumnos, esto provoca un movimiento de aire entre ellos a una velocidad bastante baja, algo totalmente indeseado porque nos provocará una mayor concentración de CO₂ como veremos en la siguiente figura.

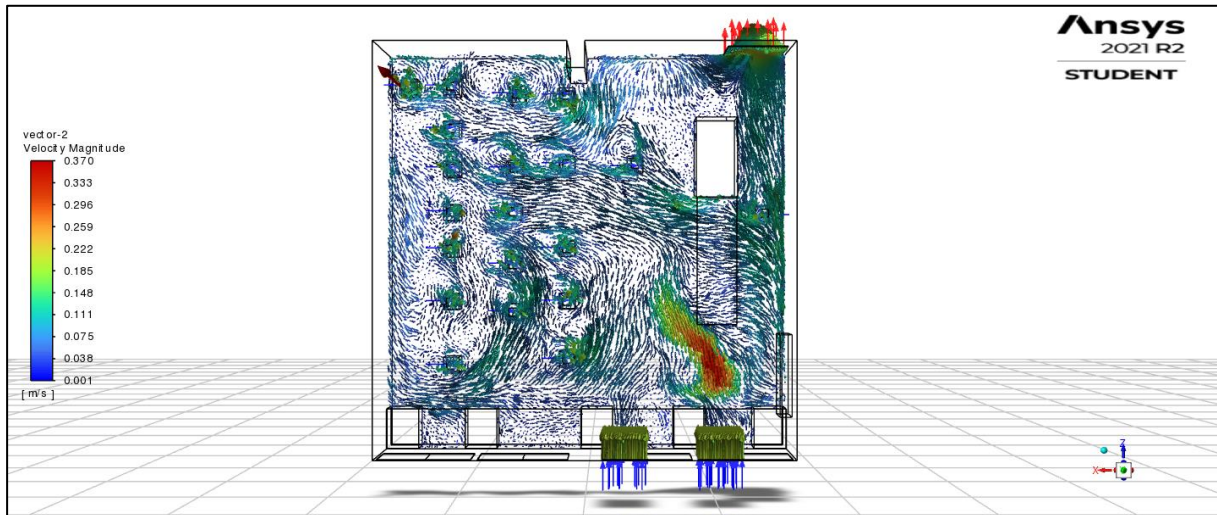


Figura 81. Dirección y velocidad del aire. Ensayo 4.2.

Si observamos la Figura 82 en la que hemos representado la distribución del CO₂ en el laboratorio (sabiendo que el color azul oscuro nos indica una concentración menor que el claro) vemos como se incrementa el nivel de CO₂ en la zona en la que se encuentran los alumnos. Por lo tanto, este modelo tampoco sería el óptimo. Debemos de indicar que la zona que aparece sin representación de los contornos es porque está a una concentración menor de la mínima indicada en la escala.

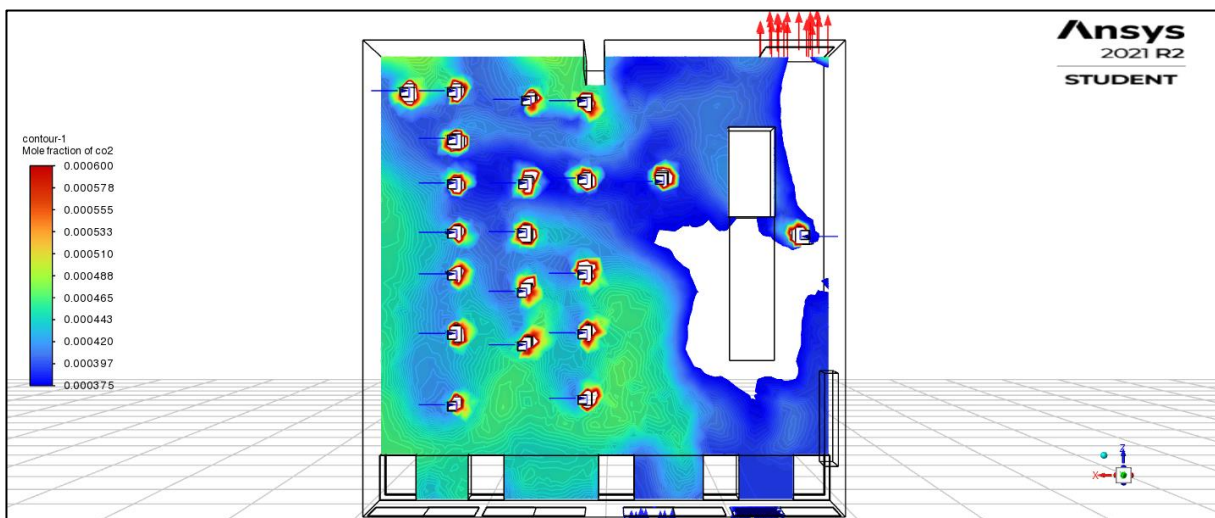


Figura 82. Distribución de CO₂ en el laboratorio. Ensayo 4.2.

▪ Configuración 3. Apertura de dos ventanas más alejadas de la puerta (lado norte)

Al ver en el ensayo anterior como se acumulaba más el CO_2 por la zona de los alumnos si abríamos las ventanas más enfrentadas a la puerta, vamos a implementar las ventanas más alejadas de la puerta como entrada de aire para ver si conseguimos un flujo de aire más uniforme y conseguimos reducir la concentración de CO_2 .

Observando la Figura 83 vemos de una forma clara como el aire aumenta su velocidad al llegar a los alumnos y como hay menor número de turbulencias haciendo que este fluya de una forma más directa hacia la salida.

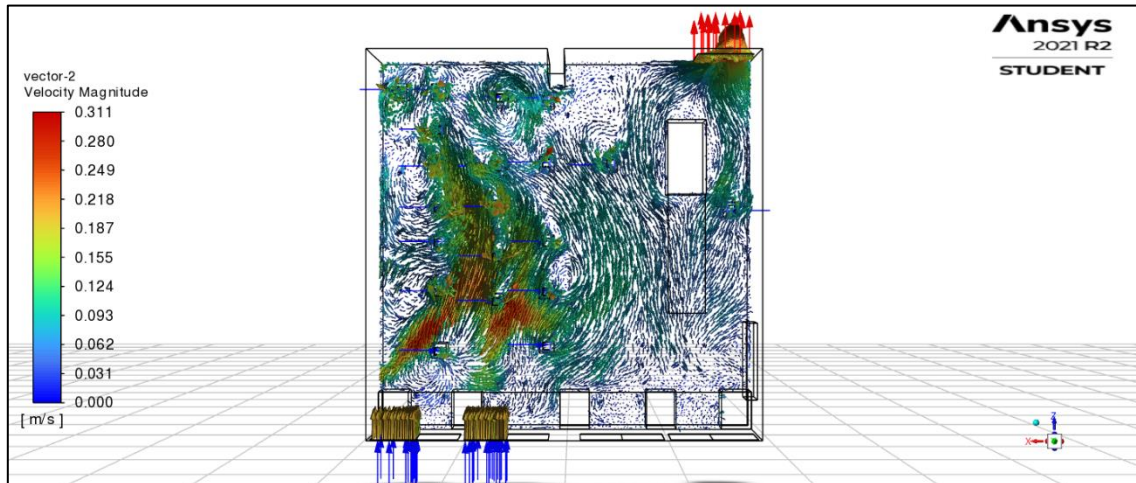


Figura 83. Dirección y velocidad del aire. Ensayo 4.3.

Al analizar el nivel de concentración de CO_2 , también vemos como hemos conseguido una reducción en la zona en la que se encuentran los alumnos. En la zona de la pizarra, donde se encuentra el profesor, también apreciamos que el nivel es ligeramente inferior. Esto puede explicarse porque la ubicación del profesor no interfiere en el flujo principal del aire proveniente de los alumnos hacia la salida, por lo que el aire que más CO_2 contiene cedido por los alumnos no pasa directamente por el profesor. Debido a estos argumentos positivos, podemos afirmar que, de momento, este es el ensayo más favorable para reducir la concentración de CO_2 (Fig. 84).

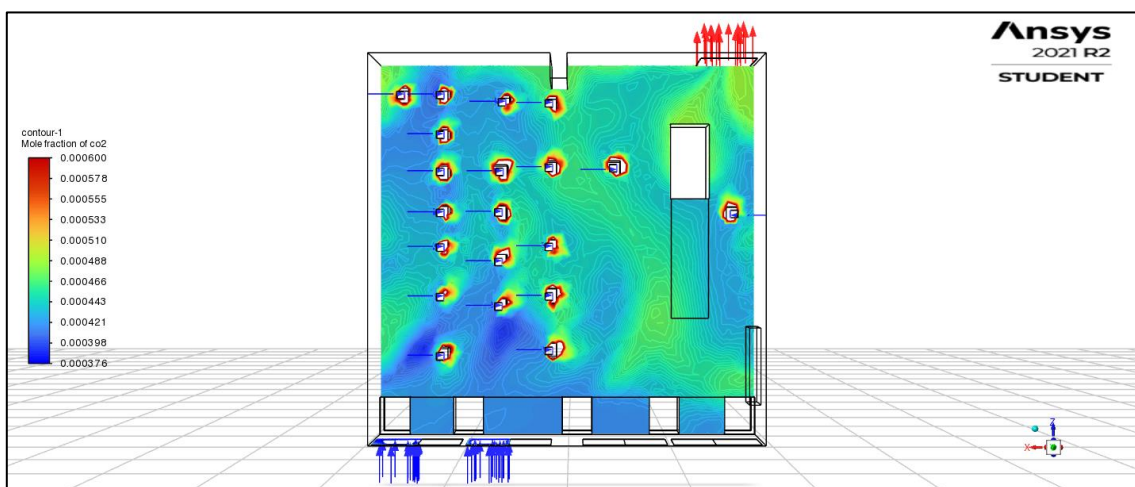


Figura 84. Distribución de CO_2 en el laboratorio. Ensayo 4.3.

▪ **Configuración 4. Apertura de 3 ventanas más alejadas de la puerta (lado norte)**

Como en el anterior ensayo vimos que abriendo dos ventanas alejadas de la puerta mejoraban bastante las condiciones, vamos a simular ahora con tres ventanas de la mitad norte del laboratorio abiertas para ver si conseguimos mejorar aún más las condiciones de ventilación del laboratorio (Fig. 85).

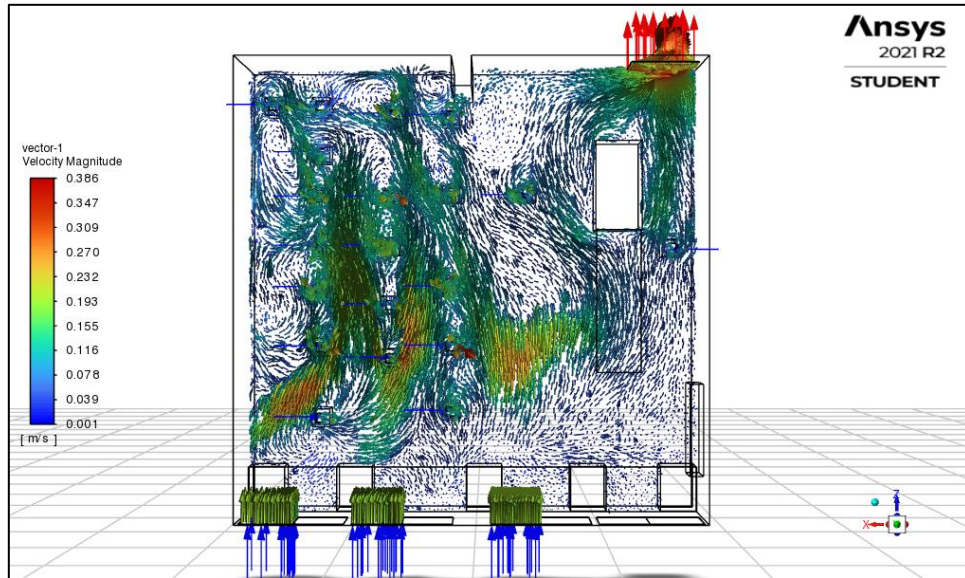


Figura 85. Dirección y velocidad del aire. Ensayo 4.4.

Cuando observamos la Figura 85 que nos indica la velocidad y la dirección del aire, vemos como aumenta la velocidad de este cuando llega a los alumnos superando el valor de velocidad del ensayo anterior. Esto nos empieza a indicar que la concentración de CO₂ será menor que en el ensayo anterior (Fig. 86).

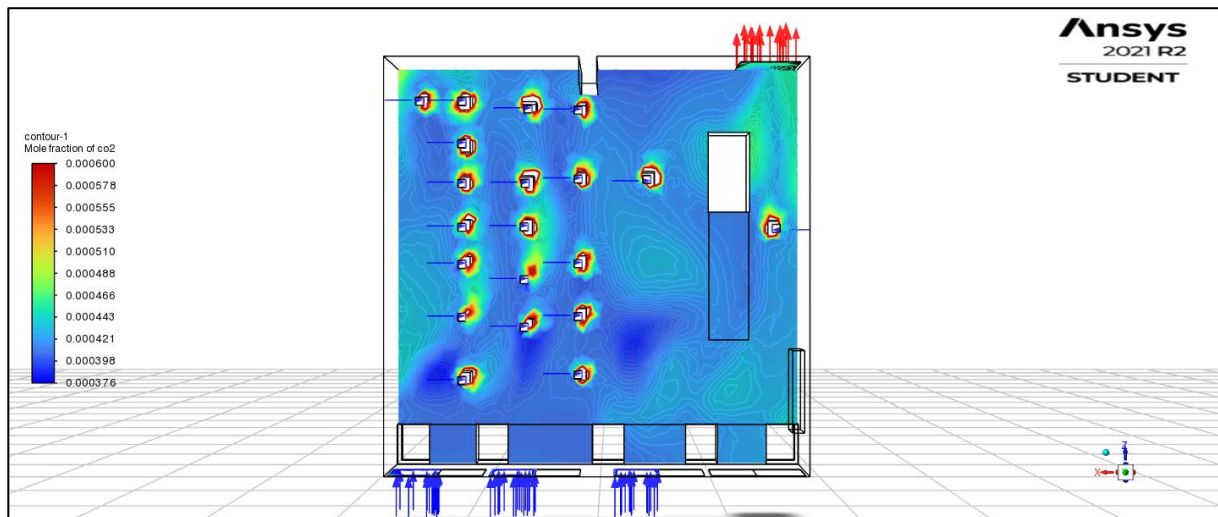


Figura 86. Distribución de CO₂ en el laboratorio. Ensayo 4.4.

Podemos confirmar que la concentración de CO₂ es menor en este ensayo que en el anterior. Por último, vamos a realizar el ensayo con todas las ventanas abiertas al igual que se realizó el ensayo 3, pero vamos a abrir la parte de la ventana más cercana a la pared del fondo para ver si conseguimos mejorar algo la ventilación.

▪ **Configuración 5. Apertura de las 4 ventanas más alejadas de la puerta (lado norte)**

Si abriésemos todas las ventanas, concretamente todas las ventanas que más próximas están a la pared del fondo, obtenemos una mejor distribución de CO₂ (Fig. 87)

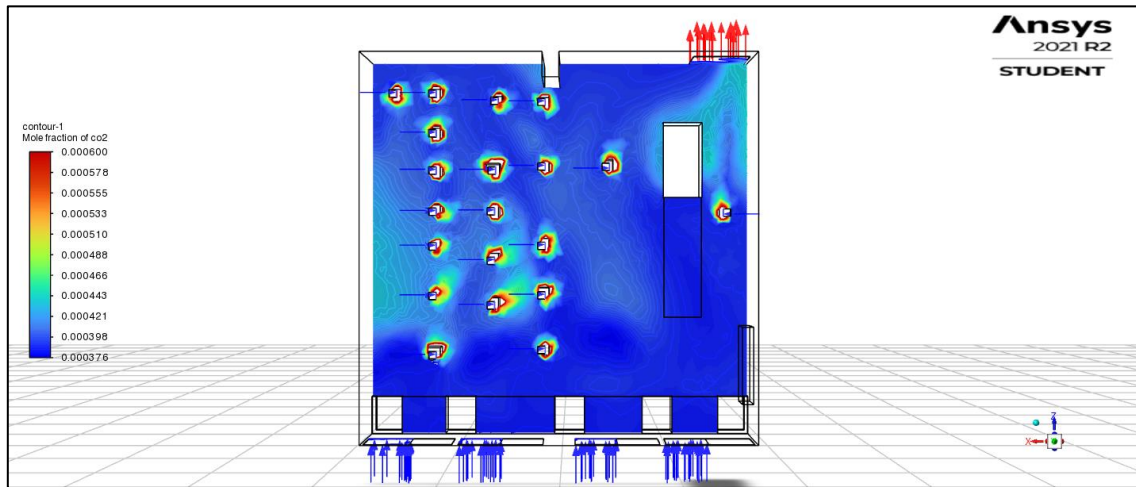


Figura 87. Distribución de CO₂ en el laboratorio. Ensayo 4.5.

Para no ser repetitivos, hemos adjuntado únicamente la distribución de CO₂ a la misma escala de representación que en las figuras anteriores. Una predominancia del color azul mayor que en los ensayos anteriores nos indica un nivel más bajo de CO₂.

▪ **Configuración 6. Apertura de las 4 ventanas más cercanas a la puerta (lado sur)**

Por último, como hemos visto que abriendo las cuatro ventanas (del lado norte) obtenemos los mejores resultados hasta ahora, vamos a estudiar qué pasaría si en lugar de abrir la parte de las ventanas del lado norte abriésemos las del lado sur. Observando la Figura 88, nos damos cuenta de una mayor aparición del color verde en ciertas zonas como la esquina del aula; lo que nos indica una concentración mayor de CO₂.

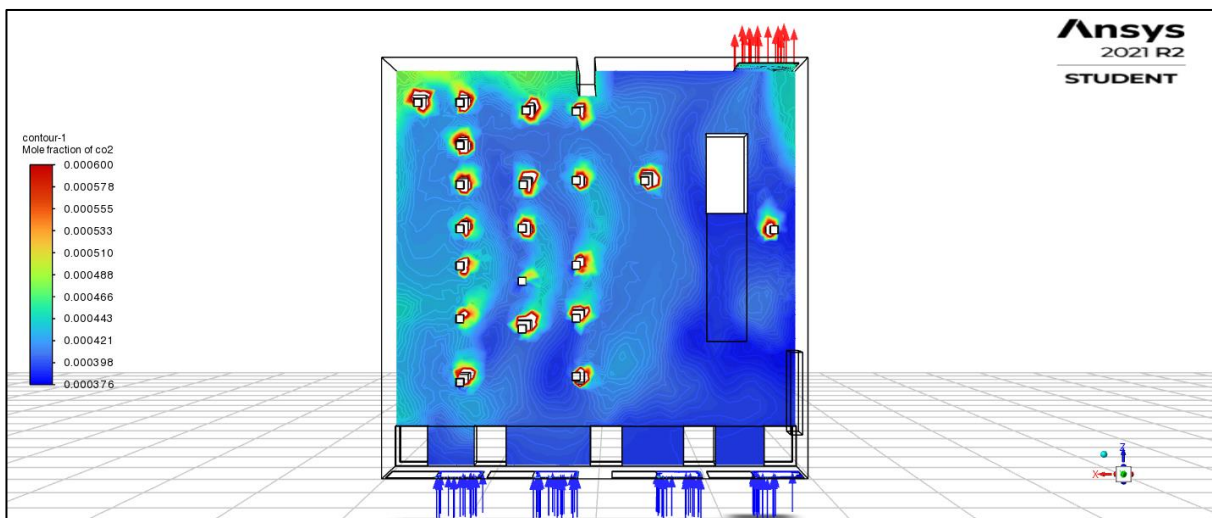


Figura 88. Distribución de CO₂ en el laboratorio. Ensayo 4.6.

Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

Como conclusión, podemos afirmar que la mejor opción para optimizar la ventilación en el laboratorio y reducir el riesgo de contagio es abrir las cuatro ventanas del lado norte. De esta manera, evitamos que se acumule CO₂ en la esquina como pasaba en otros casos y mejoramos la ventilación de forma considerable.

6. Conclusiones

Para evaluar la capacidad de ventilación del laboratorio 0.04 del edificio CITE IIA de la Universidad de Almería, que es la principal misión de este trabajo como indica su título, llevamos a cabo principalmente los siguientes pasos:

- En primer lugar, se tomaron las medidas del laboratorio y se creó su geometría en el ordenador, concretamente, en el programa de diseño asistido por ordenador Solidworks.
- Se realizaron dos ensayos presenciales en el laboratorio sin alumnos y un tercero con 19 alumnos durante de desarrollo de una clase de prácticas.
- Implementamos la geometría del laboratorio en el programa de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) ANSYS/Fluent y simulamos los mismos ensayos en dicho programa.
- Comparamos los resultados obtenidos en la simulación con los obtenidos en las mediciones reales para validar el modelo.
- Una vez validado el modelo, se llevaron a cabo más simulaciones con diferentes configuraciones de las entradas de aire (ventanas) para optimizar la ventilación del laboratorio y minimizar el riesgo de contagio durante las clases.

De los resultados obtenidos, tanto en las mediciones experimentales como con las simulaciones de CFD, se puede extraer como principal conclusión que la capacidad de ventilación del laboratorio 0.04 del CITE II-A de la Universidad de Almería es ampliamente suficiente para mantener un nivel de renovación de aire adecuado en una clase con 19 alumnos.

Los valores máximos simulados de concentración de CO₂ se observan en una de las esquinas del laboratorio, con valores de 470 ppm, similares a los medidos experimentalmente en la puerta de 450 ppm. Estos valores están muy por debajo de las 500 ppm por encima de la concentración exterior (en torno a 380 ppm durante los ensayos) permitidos por la normativa española en aulas de enseñanza y el límite de seguridad de 700 ppm recomendado para prevenir el contagio del virus SARS CoV-2.

Analizando las simulaciones llevadas a cabo también se puede concluir que cuando la velocidad de entrada del aire por las ventanas es muy diferente, se genera una mayor turbulencia en el interior haciendo que el aire permanezca más tiempo en el interior del laboratorio, algo que no es deseable.

El análisis de diferentes configuraciones de apertura de las cuatro ventanas disponibles en el laboratorio permite observar que la menor concentración CO₂ en el interior del laboratorio y, el menor riesgo de contagio del virus SARS CoV-2, se consigue mediante ventilación cruzada abriendo las 4 ventanas hacia la parte norte más alejada de la puerta.

Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

7. Integración de las diferentes competencias

Para llegar a poder desarrollar este trabajo ha sido necesario adquirir diversas competencias, tanto competencias específicas para su realización como otras provenientes de las asignaturas que se imparten en esta titulación.

En cuanto a las competencias específicas, el desarrollo del trabajo ha contribuido a alcanzar las siguientes competencias:

- **(CT1)** *Capacidad para concebir, redactar, organizar, planificar, desarrollar y firmar proyectos en el ámbito de la Ingeniería Mecánica* y **(UAL4)** *Comunicación oral y escrita en la propia lengua*: estas competencias las he trabajado a la hora de elaborar este trabajo con la búsqueda bibliográfica, la redacción, la planificación y organización a la hora de hacer los ensayos, etcétera.
- **(CT2)** *Capacidad para dirigir las actividades objeto de los proyectos del ámbito de la Ingeniería Mecánica*: la he aplicado a la hora de organizarme en la realización de los ensayos dependiendo de las nuevas situaciones o posibles soluciones a los problemas planteados que se me daban mientras llevaba a cabo la memoria.
- **(CT7)** *Capacidad para conocer, comprender y aplicar la legislación necesaria durante el desarrollo de la profesión de ingeniero en el ámbito de la Ingeniería Mecánica*: la he aplicado, exactamente mediante los documentos RITE y CTE-DB-HS.
- **(CT9)** *Capacidad para resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, autonomía y creatividad*, **(UAL3)** *Capacidad para resolver problemas* y **(UAL9)** *Capacidad para aprender a trabajar de forma autónoma*: Estas competencias han sido indispensables, ya que en este trabajo hemos planteado unos objetivos (o problemas) y lo que se ha buscado en todo momento es alcanzarlos y buscar soluciones a los problemas.
- **(UAL2)** *Habilidad en el uso de las TIC*. Para llevar a cabo este trabajo, esta competencia ha sido totalmente necesaria. Ya que, he empleado diversos programas de diseño asistido por ordenador como Autocad, Bricscad y Solidworks, de simulación de fluidos (Ansys Fluent) y de procesamiento de textos como puede ser Word.

También he trabajado algunas de las competencias de distintas asignaturas:

- **(CETEM1)** *Conocimientos y capacidades para aplicar las técnicas de ingeniería gráfica* y **(CB005)** *Capacidad de visión espacial y conocimiento de las técnicas de representación gráfica, tanto por métodos tradicionales de geometría métrica y geometría descriptiva, como mediante las aplicaciones de diseño asistido por ordenador*. Para la realización del modelo del aula para importarlo después al programa de CFD y para los planos también han sido necesarias estas competencias trabajadas en las asignaturas de Expresión Gráfica y Diseño Asistido por Ordenador.
- **(ECB1)** *Capacidad para la resolución de los problemas matemáticos que puedan plantearse en la ingeniería. Aptitud para aplicar los conocimientos sobre estadística*. Esta competencia proviene de la asignatura de Estadística, y ha sido necesaria en el tratamiento de los datos obtenidos en las mediciones y su posterior organización en tablas.
- **(CRI1)** *Conocimientos de termodinámica aplicada y transmisión de calor. Principios básicos y su aplicación a la resolución de problemas de ingeniería*. **(CT4)** *Capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad, razonamiento crítico y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de la Ingeniería Industrial*. **(CT5)** *Conocimientos para la realización de mediciones, cálculos, valoraciones, tasaciones, peritaciones, estudios, informes, planes de labores y otros trabajos análogos*. **(CT6)** *Capacidad para el manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento*. **(CT7)** *Capacidad de analizar y valorar el impacto social y medioambiental de las soluciones técnicas*. Estas competencias se trabajaron en la asignatura de Termotecnia, han sido necesarias para entender la transmisión de calor de los distintos elementos de nuestro modelo, para buscar las

mediciones en el laboratorio, para la búsqueda y aplicación de la reglamentación que nos afecta y para poder valorar el impacto que pueden tener las soluciones que adoptemos sobre los alumnos y demás miembros de la comunidad universitaria.

- **(E-CRI2)** *Conocimientos de los principios básicos de la mecánica de fluidos y su aplicación a la resolución de problemas en el campo de la ingeniería. Cálculo de tuberías, canales y sistemas de fluidos.* Aplicada prácticamente en todo momento en la realización de los ensayos, ya que el aire es un fluido y necesitamos unas nociones básicas sobre su comportamiento. Esta competencia se trabajó en la asignatura de Ingeniería Fluidomecánica.
- **(CRI11)** *Conocimientos y capacidades para organizar y gestionar proyectos.* Desarrollada en la asignatura de Oficina Técnica y Proyectos. Me ha sido de utilidad principalmente en la elaboración de esta memoria.

8. Fases de la realización del TFG y su cronograma asociado

El trabajo se desarrollará en las siguientes fases (Tabla 19):

- 1º. Búsqueda de información bibliográfica (abril-julio 2021).
- 2º. Realización de las medidas geométricas en el laboratorio para generar el modelo numérico y de las medidas de las variables climáticas para su validación (mayo 2021).
- 3º. Desarrollo del modelo tridimensional del laboratorio (junio-agosto 2021).
- 4º. Validación del modelo de CFD mediante la comparación de los valores simulados con los medidos en el laboratorio (octubre-diciembre 2021).
- 5º. Análisis de la capacidad de ventilación del laboratorio para diferentes configuraciones de apertura de las ventanas (octubre-diciembre 2021).
- 6º. Redacción del trabajo fin de grado (noviembre-enero 2021-2022).

Tabla 19. Cronograma de la realización de actividades.

Año	2021										2022
Tareas a realizar	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	
1. Búsqueda de información											
2. Realización de medidas en el laboratorio											
3. Desarrollo del modelo de CFD											
4. Validación del modelo de CFD											
5. Análisis de la ventilación con el modelo de CFD											
6. Redacción del documento											

Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

9. Bibliografía

9.1. Referencias Bibliográficas

- AENOR, 2005. UNE-EN ISO 8996 - *Ergonomía del ambiente térmico. Determinación de la tasa metabólica*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid (España), 33 pp. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0033958>
- Allen J., Spengler J. Jones E. y Cedeno-Laurent J., 2020. 5-step guide to checking ventilation rates in classrooms. Harvard Healthy Buildings program. 46 pp. https://schools.forhealth.org/wp-content/uploads/sites/19/2021/01/Harvard-Healthy-Buildings-program-How-to-assess-classroom-ventilation-10-30-2020-EN_R1.8.pdf
- Andersen, K.G., Rambaut, A., Lipkin, W.I. Holmes E.C. y F.R. Garry, 2020. The proximal origin of SARS-CoV-2. *Nat Med* **26**, 450–452. <https://doi.org/10.1038/s41591-020-0820-9>
- Angelopoulos C., Cook M., Iddon C. y Porritt S.M., 2017. *Evaluation of thermal comfort in naturally ventilated school classrooms using CFD*. 15th Conference of International Building Performance Simulation Association, San Francisco, USA, 7-9 Agosto 2017. <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/25187>
- ANSYS, 2013. Theory guide ANSYS-FLUENT. ANSYS, Inc., 814 pp. <http://www.ansys.com>.
- Atkinson J., Chartier Y., Pessoa-Silva C., Jensen P., Li Y., Seto, W., 2010. *Ventilación natural para el control de las infecciones en entornos de atención de la salud*. Organización Panamericana para la Salud (OPS). 149 pp. https://www.paho.org/hq/dmdocuments/2011/ventilacion_natural_spa_25mar11.pdf
- Bhattacharyya S., Dey K., Biswas R. y Paul A., 2020. A novel CFD analysis to minimize the spread of COVID-19 virus in hospital isolation room. *Chaos Solitons Fractals*. **139**, 110294. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110294>.
- Blazek J., 2015. *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications* (3ª Edición). Butterworth-Heinemann. 442 pp. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099995-1.00001-4>
- Bordalo Junior H., 2010. *Estrategias de ventilación natural en edificios para la mejora de la eficiencia energética*. [Tesis para optar a un master] Universidad Politécnica de Cataluña. 125 pp. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/10946>
- César C., 2020. La pandemia del COVID-19. *Revista médica de Panamá*, **40** (1), 1-2. <http://dx.doi.org/10.37980/im.journal.rmdp.2020872>
- CSIC, 2020. Una guía del CSIC muestra cómo se deben ventilar las aulas para reducir el riesgo de contagio por Covid-19. https://www.ciencia.gob.es/stfls/MICINN/Ministerio/FICHEROS/guia_para_ventilacion_en_aulas_csi_c.pdf
- Dávalos Fassler, E.T. (2020) *Modelo numérico CFD del túnel de carga, tubería a presión y distribuidores utilizando el paquete computacional Ansys Fluent. Caso de aplicación proyecto hidroeléctrico sopladora*. [Trabajo fin de máster] Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20657>
- Di Gilio A., Palmisani J., Pulimeno M., Cerino F., Cacace M., Miani A., de Gennaro G., 2021. CO₂ concentration monitoring inside educational buildings as a strategic tool to reduce the risk of Sars-CoV-2 airborne transmission. *Environmental Research*, **202**, 111560. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111560>.
- Dols W.S. y Persily A.K., 1995. *A Study of Ventilation Measurement in an Office Building*. In: *Airflow Performance of Building Envelopes, Components and Systems*. Ed: Modera M. y Persily A. West Conshohocken, PA. ASTM International, 1995, 23-46. <https://doi.org/10.1520/STP14687S>.

Dominguez L. y Amador-Bedolla C., 2020. *El origen de COVID-19: lo que se sabe, lo que se supone y (muy poquito) sobre las teorías de complot*. Educación Química **31** (2), 3-11. <http://dx.doi.org/10.22201/fq.18708404e.2020.2.75461>

Dutta A. y Chattopadhyay H., 2021. Performance analysis of human respiratory system based on the second law of thermodynamics. *Journal of Thermal Biology*, **96**: 102862. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtherbio.2021.102862>

ECDD, 2020.- *Heating, ventilation and air-conditioning systems in the context of COVID-19*. European Centre for Disease Prevention and Control (ECDD). 19 pp. <https://www.ecdc.europa.eu/sites/default/files/documents/Heating-ventilation-air-conditioning-systems-in-the-context-of-COVID-19-first-update.pdf>

Fernández del Olmo, P. (2013) *Estudio mediante métodos numéricos (CFD) de la ventilación natural en un prototipo de invernadero parral multicapilla con ventilación optimizada*. [Trabajo fin de grado] Universidad de Almería.

Ferrus L., Guenard H., Vardon G. y Varene P., 1980. Respiratory water loss. *Respiration Physiology*, **39** (3), 367-381. [https://doi.org/10.1016/0034-5687\(80\)90067-5](https://doi.org/10.1016/0034-5687(80)90067-5)

Fong Silva W., Severiche Sierra C. y Fong Amarís W., 2020. Sistemas de acondicionamiento de aire y ventilación como foco infeccioso de Sars CoV-2 en hospitales, clínicas e instituciones de salud. *IPSA SCIENTIA: Revista Científica Multidisciplinaria*, **1** (5), 28-35. <https://doi.org/10.25214/27114406.960>.

GACC-ISCI, 2020. *Clima, temperatura y propagación de la Covid-19*. Informe del Grupo de Analisis Científico de Coronavirus del ISCI (GACC-ISCI). Instituto de Salud Carlos III, 6 pp. https://repisalud.isciii.es/bitstream/handle/20.500.12105/9635/ClimaTemperaturaPropagacion_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ghinai I., McPherson T.D., Hunter J.C., Kirking H.L., Christiansen D., Joshi K. *et al.*, 2020. First known person-to-person transmission of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) in the USA. *Lancet*, **395**, 1137-1144. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30607-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30607-3)

Gough H.L., Luo Z., Halios C.H., King M.-F., Noakes C.J., Grimmond C.S.B., Barlow J.F., Hoxey R., Quinn A.D., 2018. Field measurement of natural ventilation rate in an idealised full-scale building located in a staggered urban array: Comparison between tracer gas and pressure-based methods. *Building and Environment*, **137**, 246-256. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.055>.

GTM, 2020. Informe del GTM sobre "Covid-19 es espacios interiores, en particular restaurantes". Grupo de Trabajo Multidisciplinar (GTM) asesora y apoya al Ministerio de Ciencia e Innovación en materias científicas relacionadas con el COVID-19. https://www.ciencia.gob.es/dam/jcr:e69e21bd-13db-4580-977b-bdb102bf0a90/GTM_Restaurantes.pdf

Hernandez-Calleja N., 2010. *NTP 742: Ventilación general de edificios*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España. 9 pp. https://www.insst.es/documents/94886/327446/ntp_742.pdf/08383321-e605-4355-b830-c783a7d50b9c

Hornero Pérez, R. (2013) *Estudio de la ventilación natural de un edificio y su efecto en el grado de confort de los ocupantes*. [Tesis para optar a un master] Universidad Politécnica de Cataluña. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/18512?locale-attribute=es>

Hu H.H., 2012. Chapter 10 - Computational Fluid Dynamics. En: *Fluid Mechanics* (5ª Edición). Editores: Kundu P.K., Cohen I.M. y Dowling D.R., Academic Press, pp: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382100-3.10010-1>

Huang C., Wang Y., Li X., Ren L., Zhao J., Hu Y. *et al.*, 2020. Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China. *Lancet*, **395**, 497-506. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30183-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30183-5)

Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

IDAIE, 2021. *Recomendaciones de operación y mantenimiento de los sistemas de climatización y ventilación de edificios y locales para la prevención de la propagación del SARS-CoV-2*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAIE). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Fecha de actualización 30 de julio de 2020. 15 pp. https://www.mscbs.gob.es/profesionales/saludPublica/ccayes/alertasActual/nCov/documentos/Recomendaciones_de_operacion_y_mantenimiento.pdf

IDAIA-CSIC, 2021. *Guía para ventilación en aulas*. Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAIA-CSIC). Mesura. 43 pp. https://www.ciencia.gob.es/stfls/MICINN/Ministerio/FICHEROS/guia_para_ventilacion_en_aulas_csic.pdf

INSST, 2021. *La ventilación como medida preventiva frente al coronavirus SARS-CoV-2*. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). Departamento de Higiene del Centro Nacional de Nuevas Tecnologías. Ministerio de Trabajo y Economía Social. 17 pp. <https://www.insst.es/documents/94886/712877/La+ventilaci%C3%B3n+como+medida+preventiva+frente+al+coronavirus+SARS-CoV-2.pdf/7d80e9f3-2b44-7e37-8af2-7ab105621070?t=1613134710733>

Iranzo A., 2019. CFD Applications in Energy Engineering Research and Simulation: An Introduction to Published Reviews. *Processes*, **7**, 883. <https://doi.org/10.3390/pr7120883>

Kastillo J. y Beltrán R., 2015. *Optimización energética para el aprovechamiento de ventilación natural en edificaciones en climas cálidos del ecuador*. [Tesis para optar a titulación de ingeniero mecánico] Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/9086>

Kataoka H., Ono Y. y Enoki K., 2020. Applications and prospects of CFD for wind engineering fields. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **205**, 104310. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104310>

Knibbs L.D., Morawska L., Bell S.C. y Grzybowski P., 2011. Room ventilation and the risk of airborne infection transmission in 3 health care settings within a large teaching hospital. *American Journal of Infection Control*, **39** (10): 866-872. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2011.02.014>

Lechien J.R., Chiesa-Estomba C.M., De Siati D.R., Horoi M., Le Bon S.D., Rodriguez A., Dequanter D., Bleic S., El Afia F., Distinguin L., Chekkoury-Idrissi Y., Hans S., Delgado I.L., Calvo-Henriquez C., Lavigne P., Falanga C., Barillari M.R., Cammaroto G., Khalife M., Leich P., Souchay C., Rossi C., Journe F., Hsieh J., Edjlali M., Carlier R., Ris L., Lovato A., De Filippis C., Coppee F., Fakhry N., Ayad T. y Saussez S. 2020. Olfactory and gustatory dysfunctions as a clinical presentation of mild-to-moderate forms of the coronavirus disease (COVID-19): a multicenter European study. *Eur Arch Otorhinolaryngol*. **277** (8): 2251-2261. <https://doi.org/10.1007/s00405-020-05965-1>

Leclerc Q.J., Fuller N.M., Knight L.E., Funk S. y Knight G.M., 2020.- What settings have been linked to SARS-CoV-2 transmission clusters? *Wellcome Open Research*, **5** (83): 1-19. <https://doi.org/10.12688/wellcomeopenres.15889.2>

Le Quéré C., Jackson R.B., Jones M.W., Smith A.J.P., Abernethy S., Andrew R.M., De-Gol A.J., Willis D.R., Shan Y., Canadell J.G., Friedlingstein P., Creutzig F. y Peters G.P., 2020. Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nature Climate Change*, **10**, 647–653. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0797-x>

Liu J., Liao X., Qian S., Yuan J., Wang F., Liu Y. *et al.*, 2020. Community Transmission of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2, Shenzhen, China. *Emerg. Infect. Dis.*, **26** (6),1320-1323. <https://doi.org/10.3201/eid2606.200239>.

Livingston E.H. y Lee S., 2001. Body surface area prediction in normal-weight and obese patients. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, **281** (3), E586-E591. <http://dx.doi.org/10.1152/ajpendo.2001.281.3.e586>.

Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

Lu J., Gu J., Li K., Xu C., Su W., Lai Z., Zhou D., Yu C., Xu B. y Yang Z., 2020. COVID-19 Outbreak Associated with Air Conditioning in Restaurant, Guangzhou, China, 2020. *Emerging Infectious Diseases*, **26** (7), 1628-1631. <https://dx.doi.org/10.3201/eid2607.200764>.

Marieb E.N. y Hoehn K.N., 2013. *Human Anatomy and Physiology*. Pearson, New York (EE.UU.).

Massman W. J., 1998. A review of the molecular diffusivities of H₂O, CO₂, CH₄, CO, O₃, SO₂, NH₃, N₂O, NO, and NO₂ in air, O₂ and N₂ near STP. *Atmospheric Environment*, **32** (6), 1111–1127. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00391-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00391-9)

Meiss, A., Feijó-Muñoz, J., Padilla-Marcos, M.A. *Evaluación, diseño y propuestas de sistemas de ventilación en la rehabilitación de edificios residenciales españoles*. Informes de la Construcción **68**, 542, e148 (2016). <http://dx.doi.org/10.3989/ic.15.101>.

Méndez, C., San José, J.F., Villafruela, J.M., Castor, F. *Optimization of a hospital room by means of CFD for more efficient ventilation*. Energy and Buildings **40** (542), 849-854 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.06.003>.

Mojica-Crespo, R., Morales-Crespo, M.M. *Pandemia COVID-19, la nueva emergencia sanitaria de preocupación internacional: una revisión*. Medicina de Familia - SEMERGEN **46**, 65-77 (2020). [10.1016/j.semerg.2020.05.010](https://doi.org/10.1016/j.semerg.2020.05.010)

Molina-Aiz F.D., Fatnassi H., Boulard T., Roy J.C. y Valera D.L., 2010. Comparison of Finite Element and Finite Volume methods for simulation of natural ventilation in greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture*, **72**: 69–86. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.03.002>

Molina-Aiz F.D., Norton T., López A., Reyes-Rosas A., Moreno M.A., Marín P., Espinoza K. y Valera D.L., 2017. Using Computational Fluid Dynamics to analyse the CO₂ transfer in naturally ventilated greenhouses. *Acta Horticulturae*, **1182**: 283-292. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1182.34>

Molina Aiz F.D., Valera D.L., López A., Zormati T., Najjari H. y Boussoffara Y., 2020. Measurement of the CO₂ exchange of a tomato canopy inside an Almería type greenhouse naturally ventilated. *Acta Horticulturae*, **1296**: 65-72. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1296.9>

MS-MEFP, 2020. *Medidas de prevención, higiene y promoción de la salud frente a COVID-19 para centros educativos en el curso 2020-2021*. Ministerio de Sanidad (MS) y Ministerio de Educación y Formación Profesional (MEFP). 29 pp. <https://www.sanidad.gob.es/profesionales/saludPublica/ccayes/alertasActual/nCov/documentos/Medidas centros educativos Curso 2020 2021 17.09.20.pdf>

Norton T. y Sun D.W., 2006. *Computational fluid dynamics (CFD) – an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review*. Trends in Food Science & Technology **17** (11), 600-620. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.05.004>.

Norton T., Sun D.W., Grant J., Fallon R. y Dodd V., 2007. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review. *Bioresource Technology*, **98** (12), 2386-2414. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.025>

OMS, 2020. *Preguntas y respuestas sobre la COVID-19 y la ventilación y el aire acondicionado en espacios y edificios públicos*. Organización Mundial de la Salud (OMS). Centro de prensa. Preguntas y respuestas. <https://www.who.int/es/news-room/q-a-detail/q-a-ventilation-and-air-conditioning-in-public-spaces-and-buildings-and-covid-19> (Visitado el 16/2/2021).

Oldham D.J., de Salis M.H. y Sharples S., 2004. Reducing the ingress of urban noise through natural ventilation openings. *Indoor Air*. **14** (8): 118-26. <https://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00294.x>

Osorio Saraz J.O., Martins, M. A., Zapata Marín, O., Lucia, Flavia, A. D., y Héctor José, C. V. *Una revisión acerca de la dinámica de fluidos computacionales (CFD) en instalaciones avícolas*. Dyna, **79** (175), 142-

149 (2012). <https://www.proquest.com/scholarly-journals/una-revision-acerca-de-la-dinamica-fluidos/docview/1677463225/se-2>

Peters R., 1983. *Allometric simulation models*. En: *The Ecological Implications of Body Size*. Cambridge Studies in Ecology, pp. 197-212. Cambridge University Press, Cambridge (Reino Unido). <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511608551.013>.

Prairie Y.T. y Duarte C. M., 2007. Direct and indirect metabolic CO₂ release by humanity. *Biogeosciences*, **4** (2), 215-217. <http://dx.doi.org/10.5194/bg-4-215-2007>.

Riddell, S., Goldie, S., Hill, A. et al. *The effect of temperature on persistence of SARS-CoV-2 on common surfaces*. *Virology* **17**, 145 (2020). <https://doi.org/10.1186/s12985-020-01418-7>

Shaman, J., Goldstein, E., Lipsitch, M. *Absolute Humidity and Pandemic Versus Epidemic Influenza*. *American Journal of Epidemiology* **173** (2), 127-135 (2011). <https://doi.org/10.1093/aje/kwq347>

Sharkey B. y Gaskill S., 2001. Respiration, respirators and work capacity. *3M JobHealth Highlights*, **19** (2), 1-7. <https://multimedia.3m.com/mws/media/1431600/respiration-respirators-and-work-capacity-2001.pdf>

Silveira, J. *El tapaboca no reduce el riesgo de propagación de una enfermedad viral respiratoria como Covid 19*, 1-8 (2021). [El-tapaboca-no-reduce-el-riesgo.pdf \(medicosporlaverdad.com.uy\)](https://medicosporlaverdad.com.uy/El-tapaboca-no-reduce-el-riesgo.pdf)

Tryggvason G., 2016. *Chapter 6 - Computational Fluid Dynamics*. En: *Fluid Mechanics* (6ª Edición). Editores: Kundu P.K., Cohen I.M. y Dowling D.R., Academic Press, pp: 227-291. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405935-1.00006-X>

van Doremalen N., Bushmaker T., Morris D.H., Holbrook M.G., Gamble A., Williamson B.N., Tamin A. y Harcourt J.L., 2020. Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1. *The New England Journal of Medicine*, **382** (16): 1564-1567. <https://doi.org/10.1056/NEJMc2004973>

WHO, 2020a. *Infection prevention and control of epidemic-and pandemic prone acute respiratory infections in health care*. World Health Organization (WHO). 156 pp. <https://www.who.int/publications/i/item/infection-prevention-and-control-of-epidemic-and-pandemic-prone-acute-respiratory-infections-in-health-care>

WHO, 2020b. *Transmission of SARS-CoV-2: implications for infection prevention precautions*. *Scientific brief*. World Health Organization (WHO). 9 July 2020. 10 pp. <https://www.who.int/publications/i/item/modes-of-transmission-of-virus-causing-covid-19-implications-for-ipc-precaution-recommendations>

WHO, 2021a. *COVID-19 Weekly Epidemiological Update. 16-february-2021*. World Health Organization (WHO). 26 pp. <https://www.who.int/publications/m/item/weekly-epidemiological-update---16-february-2021>

WHO, 2021b. *Getting your workplace ready for COVID-19*. World Health Organization (WHO). 8 pp. <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/technical-guidance-publications>

Yang T., Clements-Croome D.J. y Meyers R.A., 2018. *Natural Ventilation in Built Environment*. En: *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. Ed.: Meyers R.A., Springer, New York (EE.UU.), 35 pp. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2493-6_488-3.

Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

9.2. Normativa

BOE, 2007. Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. Ministerio de la Presidencia. «BOE» núm. 207, de 29 de agosto de 2007. Referencia: BOE-A-2007-15820. Legislación Consolidada. <https://www.boe.es/buscar/pdf/2007/BOE-A-2007-15820-consolidado.pdf>.

BOE, 2019. Real Decreto 732/2019. Código técnico de técnico de la edificación. Documento Básico de Salubridad. 2019 <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HS/DccHS.pdf>.

9.3. Páginas web

ANSYS, 2021. Applications. Electronics Reliability. <https://www.ansys.com/applications/electronics-reliability>

Centros para el Control y la Prevención de enfermedades (CDC), 2021. Ventilación en edificios. <https://espanol.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/community/ventilation.html>

Cómo ventilar para prevenir la transmisión del COVID-19 por aerosoles. FSC-CCOO. *YouTube*. **29:00**. https://www.youtube.com/watch?v=oKugWlcl18c&ab_channel=FSC-CCOO (Visto 16/11/2021).

COVID-19. *Wikipedia*. [COVID-19 - Wikipedia, la enciclopedia libre](https://es.wikipedia.org/wiki/COVID-19) (Visto 06/12/2021).

MS, 2021. Las 6M siempre en mente. Ministerio de Sanidad (MS). https://www.sanidad.gob.es/profesionales/saludPublica/ccayes/alertasActual/nCov/documentos/Infografia_6M.pdf

Organización Mundial de la Salud (OMS), 2021. Preguntas y respuestas sobre la ventilación y el aire acondicionado y la COVID-19. <https://www.who.int/es/news-room/q-a-detail/coronavirus-disease-covid-19-ventilation-and-air-conditioning> (Visto 16/11/2021)

Pediatric Dermatology, 2020. ¿Qué es el COVID-19? *The Society for Pediatric Dermatology*, **37**, 27-28. <https://doi.org/10.1111/pde.14219> (Visto 16/11/2021)

Recomendaciones para la ventilación como medida de prevención frente a la Covid-19. <https://higieneambiental.com/aire-agua-y-legionella/recomendaciones-para-la-ventilacion-como-medida-de-prevencion-frente-a-la-covid-19> (Visto 16/11/2021)

Ventilación contra el COVID-19. Canal enfermero – consejo general enfermería. *YouTube*. https://www.youtube.com/watch?v=5wT5Pcg9lBw&ab_channel=CANALENFERMERO-ConsejoGeneralEnfermer%C3%ADa (Visto 16/11/2021).

Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

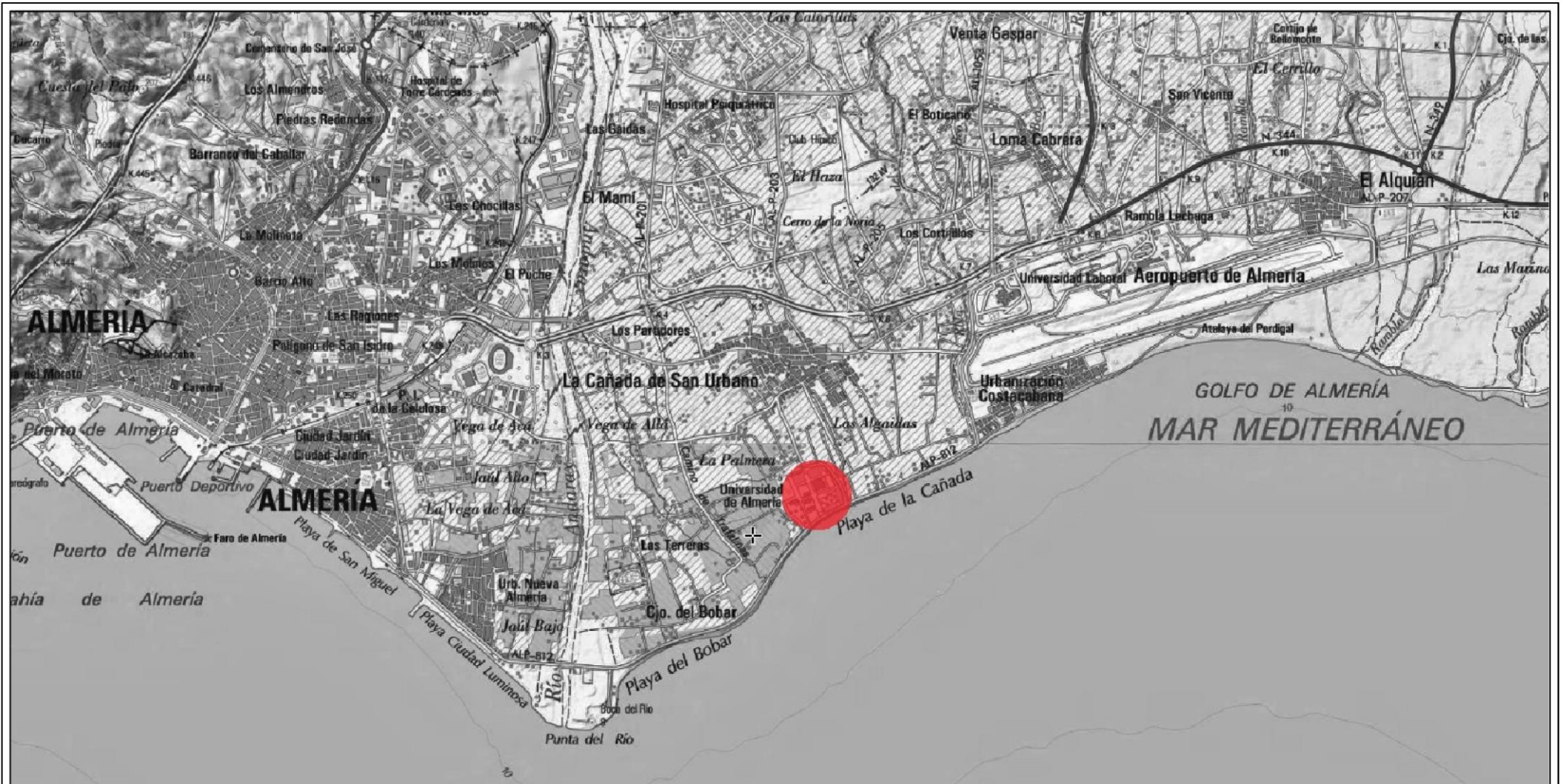
Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

10. Planos

10.1. Plano de localización del laboratorio de Motores 0.04 del CITE II-A (Universidad de Almería). E 1:50000.

10.2. Plano del laboratorio de Motores 0.04 del CITE II-A de la Universidad de Almería, E 1:50.

Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.



Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

Escala:
1:50000

Fecha:
Diciembre 2021

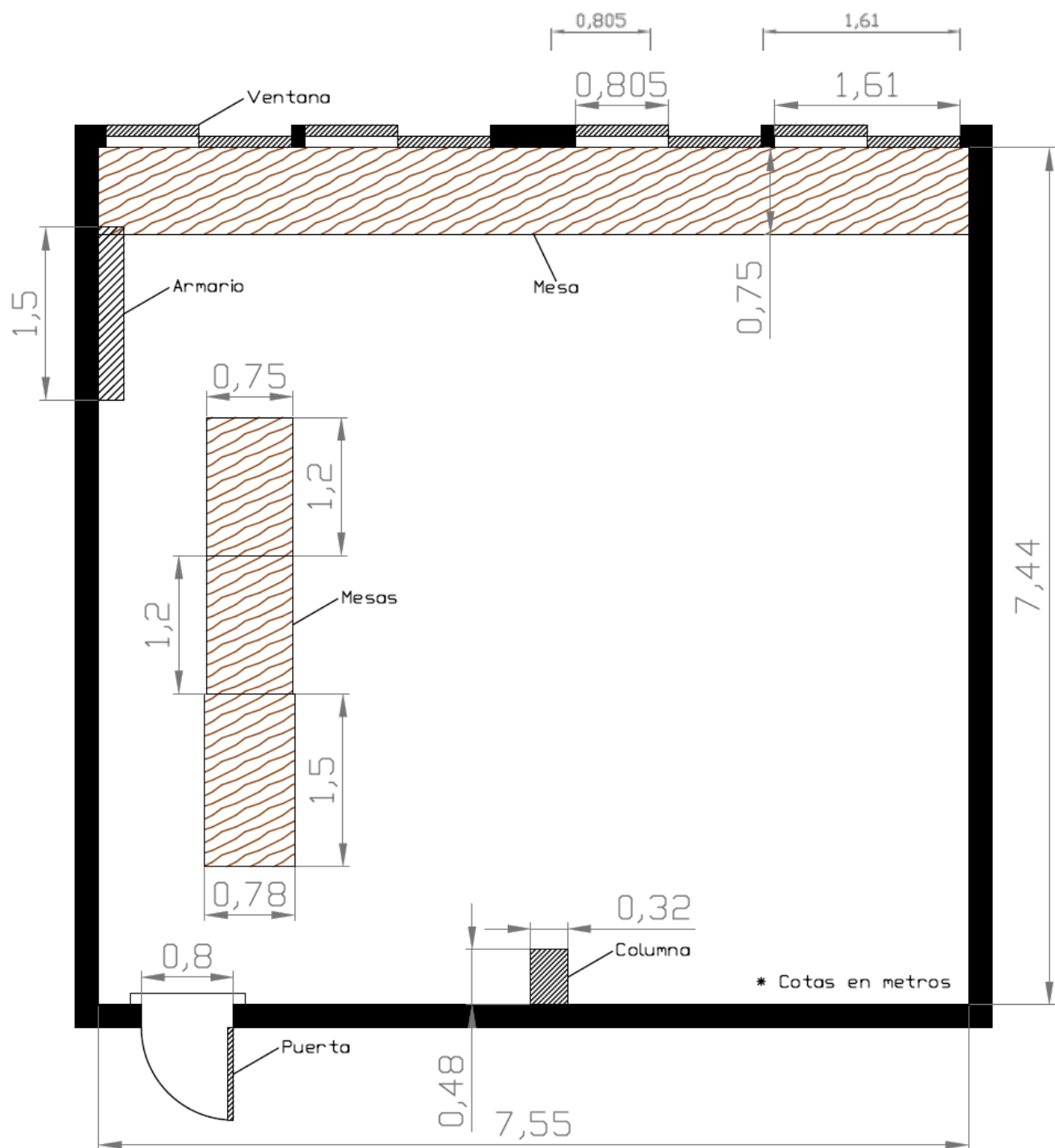
Plano de localización del laboratorio de Motores 0.04 del CITE II-A de la Universidad de Almería

Nº Plano:
1

Rubén Fernández Hidalgo

Firma:





Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

Escala:
1:50

Fecha:
Diciembre 2021

Plano del laboratorio de Motores 0.04 del CITE II-A de la Universidad de Almería

Nº Plano:
2

Rubén Fernández Hidalgo

Firma:



Evaluación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores como medida de prevención de la propagación del SARS-CoV-2.

Anexo A. Datos técnicos de los equipos de medida.

A1. Instrumentos para climatización testo 440

A2. Instrumentos para climatización testo 445

A3. Medidor de CO₂ testo 535

A4. Termómetros por infrarrojos testo 830

A5. Anemómetro sónico 3D CSAT3s

Instrumentos para climatización

- Instrumentos para climatización **testo 440**
- Instrumentos para climatización **testo 440 dP incl. presión diferencial**

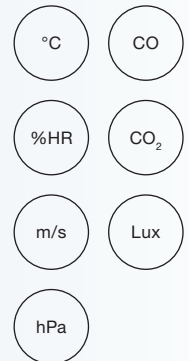
Intuitivo: menús de medición claramente estructurados para las aplicaciones más importantes

Inalámbrico: sondas Bluetooth para más comodidad en la medición y menos enredos de cables en el maletín

Ahorro de espacio: una empuñadura de aplicación universal para todas las sondas

Claro: Indicación paralela en pantalla de tres valores de medición; configuración y resultados de un vistazo

Fiable: memoria interna con capacidad hasta 7500 mediciones, puerto USB para la exportación de datos e impresión (opcional) de los valores medidos



Compatible con una amplia gama de sondas Bluetooth™ y con cable.

El testo 440 combina las ventajas de un práctico instrumento portátil con menús de medición intuitivos y una amplia gama de sondas para climatización. De este modo tendrá bajo control todas las tareas de medición en instalaciones de climatización y ventilación.

El instrumento para climatización testo 440 puede combinarse con una gran selección de sondas digitales, las testo Smart Probes o diversas sondas de temperatura de Testo. En el dispositivo están integrados menús claramente estructurados para la medición del caudal volumétrico en canales, salidas, factor K, grado de turbulencia, potencia

frigorífica/calorífica, indicación de aparición de moho y medición a largo plazo. Estos menús garantizan que la respectiva tarea de medición se ejecute de forma más rápida, eficiente y segura. Los valores medidos pueden exportarse a través del puerto USB como archivo Excel o imprimirse localmente mediante la impresora portátil.

El analizador de climatización testo 440 está disponible en dos versiones diferentes. El modelo testo 440 dP tiene adicionalmente un sensor de presión diferencial integrado para poder efectuar mediciones en los filtros, de factor K y mediante tubo Pitot.

Datos de pedido testo 440

testo 440

Instrumento para climatización, 3 pilas del tipo AA, cable USB y protocolo de calibración.

Modelo 0560 4401



testo 440 dP

Instrumento para climatización con sensor de presión diferencial integrado, 3 pilas del tipo AA, cable USB y protocolo de calibración.

Modelo 0560 4402



Datos técnicos testo 440

	testo 440	testo 440 dP
Temperatura (NTC)		
Rango de medición	-40 ... +150 °C	
Exactitud (±1 dígito)	±0,4 °C (-40 ... -25,1 °C) ±0,2 °C (-25 ... +74,9 °C) ±0,4 °C (+75 ... +99,9 °C) ±0,5 % del v.m. (rango restante)	
Resolución	0,1 °C	
Temperatura (TC)		
Rango de medición	-200 ... +1370 °C	
Exactitud (±1 dígito)	±(0,3 °C + 0,1 % del v.m.)	
Resolución	0,1 °C	
Presión diferencial		
Rango de medición		-150 ... +150 hPa
Exactitud (±1 dígito)	-	±0,05 hPa (0 ... +100 hPa) ±0,2 hPa + 1,5 % del v.m. (rango restante)
Resolución		0,01 hPa
Entradas para sondas		
TP tipo K	1x	
NTC TUC / sonda digital con cable	1x	
Sonda Bluetooth	1x sonda digital Bluetooth o una testo Smart Probe	
Presión diferencial	-	+
Datos técnicos		
Temperatura de servicio	-20 ... +50 °C	
Temperatura de almacenamiento	-20 ... +50 °C	
Tipo de pila	3 pilas , tipo AA	
Duración de la pila	12 h (normalmente medición con molinete)	
Peso	250 g	
Medidas	154 x 65 x 32 mm	



Todas las sondas digitales conectadas por cable y las sondas NTC del testo 440 tienen una práctica conexión TUC (Testo Universal Connector).

Sondas de velocidad digitales

Tipo de sonda		Rango de medición	Exactitud	Resolución	Modelo
Sondas de velocidad digitales					
Sonda de hilo caliente con Bluetooth incl. sensor de humedad y temperatura		0 ... 50 m/s -20 ... +70 °C 5 ... 95 %HR	±(0,03 + 4 % del v.m.) (0 ... 20 m/s) ±(0,5 m/s + 5 % del v.m.) (20,01 ... 30 m/s) ±0,5 °C (0 ... +70 °C) ±0,8 °C (-20 ... 0 °C) ±3,0 %HR (10 ... 35 %HR) ³⁾ ±2,0 %HR (35 ... 65 %HR) ³⁾ ±3,0 %HR (65 ... 90 %HR) ³⁾ ±5 %HR (rango restante) ³⁾ ±3 hPa	0,01 m/s 0,1 °C 0,1 %HR	0635 1571
Sonda de hilo caliente, con cable, incl. sensor de humedad y temperatura					0635 1572
Cabezal de la sonda de hilo caliente incl. sensor de humedad y temperatura					0635 1570
Sonda de molinete (Ø 16 mm) con Bluetooth, incl. sensor de temperatura		0,6 ... 50 m/s -10 ... +70 °C	±(0,2 m/s + 1 % del v.m.) (0,6 ... 40 m/s) ±(0,2 m/s + 2 % del v.m.) (40,1 ... 50 m/s) ±1,8 °C	0,1 m/s 0,1 °C	0635 9571
Sonda de molinete (Ø 16 mm), con cable, incl. sensor de temperatura					0635 9572
Cabezal de la sonda de molinete (Ø 16 mm) incl. sensor de temperatura					0635 9570
Sonda de hilo caliente, con cable, incl. sensor de temperatura		0 ... 30 m/s -20 ... +70 °C	±(0,03 m/s + 4 % del v.m.) (0 ... 20 m/s) ±(0,5 m/s + 5 % del v.m.) (20,01 ... 30 m/s) ±0,5 °C	0,01 m/s 0,1 °C	0635 1032
Sonda de molinete (Ø 16 mm), con cable		0,6 ... 50 m/s	±(0,2 m/s + 1 % del v.m.) (0,6 ... 40 m/s) ±(0,2 m/s + 2 % del v.m.) (40,1 ... 50 m/s)	0,1 m/s	0635 9532
Sonda de campana de laboratorio, con cable		0 ... 5 m/s 0 ... +50 °C	±(0,02 m/s + 5 % del v.m.) (0 ... 5 m/s) ±0,5 °C	0,01 m/s 0,1 °C	0635 1052
Para medir velocidad y caudal en conductos con una gran sección transversal se recomienda el set de extensión (0554 0990). Con este set es posible alargar hasta 2 m el brazo telescópico de todas las sondas de velocidad con empuñadura reemplazable.					
Sonda de molinete de alta precisión (Ø 100 mm) con Bluetooth, incl. sensor de temperatura		0,1 ... 15 m/s -20 ... +70 °C	±(0,1 m/s + 1,5 % del v.m.) (0,1 ... 15 m/s) ±0,5 °C	0,01 m/s 0,1 °C	0635 9371
Sonda de molinete de alta precisión (Ø 100 mm), con cable, incl. sensor de temperatura					0635 9372
Cabezal de la sonda de molinete de alta precisión (Ø 100 mm) incl. sensor de temperatura					0635 9370
Sonda de molinete (Ø 100 mm) con Bluetooth, incl. sensor de temperatura		0,3 ... 35 m/s -20 ... +70 °C	±(0,1 m/s + 1,5 % del v.m.) (0,3 ... 20 m/s) ±(0,2 m/s + 1,5 % del v.m.) (20,01 ... 35 m/s) ±0,5 °C	0,01 m/s 0,1 °C	0635 9431
Sonda de molinete (Ø 100 mm), con cable, incl. sensor de temperatura					0635 9432
Cabezal de la sonda de molinete (Ø 100 mm) incl. sensor de temperatura					0635 9430

Para realizar mediciones cómodamente en techos se ha desarrollado el brazo telescópico con ángulo de 90° (0550 0960). Se puede insertar fácilmente en sondas de molinete de 100 mm.

¹⁾ Para el uso con empuñadura con cable (modelo 0554 2222) o empuñadura con Bluetooth (modelo 0554 1111) en combinación con adaptador (modelo 0554 2160).

³⁾ Consultar la información adicional que encontrará en el manual de instrucciones sobre la exactitud en la humedad.

Otras sondas digitales y accesorios para sondas

Tipo de sonda		Rango de medición	Exactitud	Resolución	Modelo
Sondas de humedad digitales					
Sonda de temperatura y humedad con Bluetooth		0 ... 100 %HR -20 ... +70 °C	±2 %HR (5 ... 90 %HR) ³⁾ ±0,5°C	0,1 %HR 0,1 °C	0636 9731
Sonda de temperatura y humedad, con cable					0636 9732
Cabezal de la sonda de temperatura y humedad					0636 9730
Sonda de temperatura y humedad de alta precisión con Bluetooth		0 ... 100 %HR -20 ... +70 °C	±(0,6 %HR + 0,7 % del v.m.) (0 ... 90 %HR) ³⁾ ±(1,0 %HR + 0,7 % del v.m.) (90 ... 100 %HR) ³⁾ ±0,3 °C (15 ... 30 °C) ±0,5 °C (rango restante)	0,01 %HR 0,1 °C	0636 9771
Sonda de temperatura y humedad de alta precisión, con cable					0636 9772
Cabezal de la sonda de temperatura y humedad de alta precisión					0636 9770
Sonda de temperatura y humedad robusta para temperaturas hasta de +180 °C, con cable		0 ... 100 %HR -20 ... +180 °C	±3 %HR (0 ... 2 %HR) ³⁾ ±2 %HR (2,1 ... 98 %HR) ³⁾ ±3 %HR (98,1 ... 100 %HR) ³⁾ ±0,5 °C (-20 ... 0 °C) ±0,4 °C (0,1 ... +50 °C) ±0,5 °C (+50,1 ... +180 °C)	0,1 %HR 0,1 °C	0636 9775
Sondas de nivel de confort digitales					
Sonda para el grado de turbulencia, con cable		0 ... +5 m/s 0 ... +50 °C	±(0,03 m/s + 4 % del v.m.) (0 ... 5 m/s) ±0,5°C	0,01 m/s 0,1 °C	0628 0152
Sonda lux, con cable		0 ... 100 000 lux	Clase C según DIN 5032-7 f1 = 6 % V-Lambda f2 = 6 % cos	0,1 lux (< 10 000 lux) 1 lux (≥ 10 000 lux)	0635 0551
Sonda de CO ₂ con Bluetooth® incl. sensor de humedad y temperatura		0 ... 10 000 ppm CO ₂ 5 ... 95 %HR -0 ... +50 °C	±(50 ppm + 3 % del v.m.) (0 ... 5 000 ppm) ±(100 ppm + 5 % del v.m.) (5 001 ... 10 000 ppm) ±3 %HR (10 ... 35 %HR) ³⁾ ±2 %HR (35 ... 65 %HR) ³⁾ ±3 %HR (65 ... 90 %HR) ³⁾ ±5 %HR (rango restante) ³⁾ ±0,5 °C ±3 hPa	1 ppm 0,1 %HR 0,1 °C	0632 1551
Sonda de CO ₂ , con cable, incl. sensor de humedad y temperatura					0632 1552
Cabezal de la sonda de CO ₂ , incl. sensor de humedad y temperatura					0632 1550
Sonda de CO con Bluetooth		0 ... 100 ppm 100,1 ... 500 ppm	±3 ppm (0 ... 30 ppm) ±5 ppm (30,1 a 100) ±10% del v.m. (100,1 ... 500 ppm)	0,1 ppm	0632 1271
Sonda de CO, con cable					0632 1272
Cabezal de la sonda de CO					0632 1270
Empuñaduras para sonda, y adaptador					
Empuñadura con cable para conectar cabezales de la sonda testo 440					0554 2222
Empuñadura con Bluetooth para conectar cabezales de la sonda testo 440					0554 1111
Adaptador de empuñadura para conectar sondas de velocidad testo 440					0554 2160

²⁾ Para el uso con empuñadura con cable (modelo 0554 2222) O empuñadura con Bluetooth (modelo 0554 1111).

³⁾ Consultar la información adicional que encontrará en el manual de instrucciones sobre la exactitud en la humedad.



Service instrument for ventilation/air conditioning systems

- PC analysis
- 2 probe sockets
- Probes
- 3,000 readings



The testo 445 VAC instrument measures temperature, relative humidity, dew point, absolute humidity, degree of humidity, enthalpy, all types of air velocity (in ducts, duct openings or extractors), volume flow, pressure and indoor air quality.

Data can be saved according to location and then analysed on PC or printed on the Testo printer on site.

- Automatic mean calculation and volume flow measurement
- Automatic allocation of duct cross-section to location (max. 99 locations)
- Internal data logger (3,000 readings)
- Simultaneous measurement of up to 6 parameters



Volume flow measurement using timed and multi-point mean calculation



Monitors indoor air quality with CO2 probe

testo 445
Set with TopSafe
 testo 445, VAC measuring instrument, incl. TopSafe, battery and calibration protocol
 Part no. 0563 4450

Suitable probes at a glance

Description	Illustration	Probe type	Meas. range	Accuracy	Part no.
Vane probe, Ø 12 mm, can be attached to handle or telescopic handle		Vane	+0.6... +20 m/s Oper. temp. -30... +140 °C	±(0.2 m/s ±1% of mv) (+0.6... +20 m/s)	0635 9443
Vane/temperature probe, Ø 16 mm, attachable to handle or telescopic handle		Vane Type K (NiCr-Ni)	+0.4... +60 m/s -30... +140 °C	±(0.2 m/s ±1% of mv) (+0.4... +60 m/s)	0635 9540
Vane/temperature probe, Ø 25 mm, can be attached to handle or telescopic handle		Vane Type K (NiCr-Ni)	+0.4... +40 m/s -30... +140 °C	±(0.2 m/s ±1% of mv) (+0.4... +40 m/s)	0635 9640
Bendable vane probe (can be bent by 90°), Ø 60 mm, attachable to handle or telescopic handle, for measurements on ventilation outlets		Vane	+0.25... +20 m/s Oper. temp. 0... +60 °C	±(0.1 m/s ±1.5% of mv) (+0.25... +20 m/s)	0635 9440
Bendable vane probe (can be bent by 90°), Ø 100 mm, attachable to handle or telescopic handle, for measurements on ventilation outlets		Vane	+0.2... +15 m/s Oper. temp. 0... +60 °C	±(0.1 m/s ±1.5% of mv) (+0.2... +15 m/s)	0635 9340
Affordable, robust hot bulb probe, Ø 3 mm, for measurements in the lower velocity range, with handle		Hot bulb NTC	0... +10 m/s -20... +70 °C	±(0.03 m/s ±5% of mv) (0... +10 m/s)	0635 1549
Robust hot bulb probe, Ø 3 mm, with handle and telescopic handle for measurements in the lower velocity range		Hot bulb NTC	0... +10 m/s -20... +70 °C	±(0.03 m/s ±5% of mv) (0... +10 m/s)	0635 1049
Quick-action hot wire probe, Ø 10 mm, with telescopic handle, for measurements in the lower velocity range with direction recognition		Hot wire NTC	0... +20 m/s -20... +70 °C	±(0.03 m/s ±4% of mv) (0... +20 m/s)	0635 1041
Vane probe, Ø 16 mm, with telescopic handle, Tmax +60°C		Vane	+0.6... +40 m/s	±(0.2 m/s ±1.5% of mv) (+0.6... +40 m/s)	0628 0005
Vane probe, Ø 60 mm, with telescopic handle, for integrating velocity measurement		Vane	+0.25... +20 m/s	±(0.1 m/s ±1.5% of mv) (+0.25... +20 m/s)	0635 9449
High temperature vane probe, Ø 25 mm, with handle for continuous measurements up to +350°C		Vane Type K (NiCr-Ni)	+0.6... +20 m/s -40... +350 °C	±(0.3 m/s ±1% of f.v.) (+0.6... +20 m/s)	0635 6045
Precision pressure probe, 100 Pa, measures differential pressure and velocities (in connection with Pitot tube)		Differential pressure probe	0... +100 Pa	±(0.3 Pa ±0.5% of mv) (0... +100 Pa)	0638 1345
Pressure probe, 10 hPa, measures differential pressure and velocities (in connection with Pitot tube)		Differential pressure probe	0... +10 hPa	±0.03 hPa (0... +10 hPa)	0638 1445

Suitable probes at a glance

Description	Illustration	Probe type	Meas. range	Accuracy	Part no.
Pressure probe, 100 hPa, measures differential pressure and velocities (in connection with Pitot tube)		Differential pressure probe	0...+100 hPa	±0.5% of mv (+20...+100 hPa) ±0.1 hPa (0...+20 hPa)	0638 1545
Pressure probe, 2000 hPa, measures absolute pressure		Absolute pressure probe	0...+2000 hPa	±5 hPa (0...+2000 hPa)	0638 1645
Pitot tube, 500 mm long, stainless steel, measures velocity in connection with pressure probes 0638 1345/..1445/..1545			Oper. temp. 0...+600 °C		0635 2045
Pitot tube, 350 mm long, stainless steel, measures velocity flow in connection with pressure probes 0638 1345/..1445/..1545			Oper. temp. 0...+600 °C		0635 2145
Pitot tube, 300 mm long, stainless steel, measures velocity in connection with pressure probes 0638 1345/..1445/..1545			Oper. temp. 0...+600 °C		0635 2245
Pitot tube, 1000 mm long, stainless steel, measures velocity in connection with pressure probes 0638 1345/..1445/..1545			Oper. temp. 0...+600 °C		0635 2345
3-function probe for simultaneous measurement of temperature, humidity and velocity. With plug-in head, 0430 0143 connection cable required		Hot bulb Testo humid. sensor, cap. NTC	0...+10 m/s 0...+100 %RH -20...+70 °C	±(0.03 m/s ±5% of mv) (0...+10 m/s) ±2 %RH (+2...+98 %RH) ±0.4 °C (0...+50 °C) ±0.5 °C (-20...+70 °C) ±0.5 °C (+50.1...+70 °C)	0635 1540
Comfort level probe for measuring degree of turbulence levels, with telescope and stand. Fulfills DIN 1946 Part 2 or VDI 2080		Hot wire NTC	0...+5 m/s 0...+50 °C	±(0.03 m/s ±4% of mv) (0...+5 m/s) ±0.3 °C (0...+50 °C)	0628 0009
CO2 probe measures indoor air quality and monitors the workplace. With plug-in head, connection cable 0430 0143 or 0430 0145 required		CO2 probe	0...+1 Vol. % CO2 0...+10000 ppm CO2	±(50 ppm CO2 ±2% of mv) (0...+5000 ppm CO2) ±(100 ppm CO2 ±3% of mv) (+5001...+10000 ppm CO2)	0632 1240
CO probe to measure CO level in ambient air		CO probe	0...+500 ppm CO	±5% of mv (+100.1...+500 ppm CO) ±5 ppm CO (0...+100 ppm CO)	0632 1247

Description	Illustration	Meas. range	Accuracy	t90	Conn.	Part no.	
Standard indoor air quality probe up to +70°C		0...+100 %RH -20...+70 °C	±2 %RH (+2...+98 %RH)	±0.4 °C (-10...+50 °C) ±0.5 °C (-20...-10.1 °C) ±0.5 °C (+50.1...+70 °C)	12 s	Plug-in head, connection cable 0430 0143 or 0430 0145 required	0636 9740
Duct humidity/temperature probe, can be connected to telescopic handle Telescopic handle 0430 9715, see Ordering data for Accessories		0...+100 %RH -20...+70 °C	±2 %RH (+2...+98 %RH)	±0.4 °C (-10...+50 °C) ±0.5 °C (-20...-10.1 °C) ±0.5 °C (+50.1...+70 °C)	12 s	Fixed cable	0636 9715
NEW Thin humidity probe incl. 4 attachable protection caps for ambient air measurements, measurements in exhaust air ducts and equilibrium moisture measurements		0...+100 %RH -20...+70 °C	±2 %RH (+2...+98 %RH)	±0.4 °C (-10...+50 °C) ±0.5 °C (-20...-10.1 °C) ±0.5 °C (+50.1...+70 °C)	15 s	Plug-in head, connection cable 0430 0143 or 0430 0145 required	0636 2130
Highly accurate reference humidity/temp. probe incl. calibration certificate		0...+100 %RH -20...+70 °C	±1 %RH (+10...+90 %RH)* ±2 %RH (0...+9.9 %RH) ±2 %RH (+90.1...+100 %RH)	±0.4 °C (-10...+50 °C) ±0.5 °C (-20...-10.1 °C) ±0.5 °C (+50.1...+70 °C)	12 s	Plug-in head, connection cable 0430 0143 or 0430 0145 required	0636 9741
Flexible humidity probe with mini module for meas. e.g. on material testing rigs, module cable length 1500mm, probe tip 50x19x7mm		0...+100 %RH -20...+125 °C	±2 %RH (+2...+98 %RH)	±0.4 °C (-10...+50 °C) ±0.5 °C (-20...-10.1 °C) ±0.5 °C (+50.1...+125 °C)	20 s	Plug-in head, connection cable 0430 0143 or 0430 0145 required	0628 0013
Sword probe for measuring humidity and temperature in stacked material		0...+100 %RH -20...+70 °C	±2 %RH (+2...+98 %RH)	±0.4 °C (-10...+50 °C) ±0.5 °C (-20...-10.1 °C) ±0.5 °C (+50.1...+70 °C)	12 s	Plug-in head, connection cable 0430 0143 or 0430 0145 required	0636 0340
NEW High humidity level probe with heated sensor element, no condensation on sensor		0...+100 %RH -20...+85 °C	±2.5 %RH (0...+100 %RH)	±0.4 °C (-10...+50 °C) ±0.5 °C (-20...-10.1 °C) ±0.5 °C (+50.1...+85 °C)	30 s	Plug-in head, connection cable 0430 0143 or 0430 0145 required	0636 2142
Robust humidity probe e.g. for measuring equilibrium moisture or for measurements in exhaust ducts to +120°C		0...+100 %RH -20...+120 °C	±2 %RH (+2...+98 %RH)	±0.4 °C (-10...+50 °C) ±0.5 °C (-20...-10.1 °C) ±0.5 °C (+50.1...+120 °C)	30 s	Plug-in head, connection cable 0430 0143 or 0430 0145 required	0636 2140
Robust high temperature/humidity probe up to +180°C		0...+100 %RH -20...+180 °C	±2 %RH (+2...+98 %RH)	±0.4 °C (+0.1...+50 °C) ±0.5 °C (-20...-10.1 °C) ±0.5 °C (+50.1...+180 °C)	30 s	Plug-in head, connection cable 0430 0143 or 0430 0145 required	0628 0021
Flexible humidity probe (does not retain shape) for measurements in inaccessible places		0...+100 %RH -20...+180 °C	±2 %RH (+2...+98 %RH)	±0.4 °C (+0.1...+50 °C) ±0.5 °C (-20...-10.1 °C) ±0.5 °C (+50.1...+180 °C)	30 s	Plug-in head, connection cable 0430 0143 or 0430 0145 required	0628 0022
Standard pressure dew point probe for measurements in compressed air systems		0...+100 %RH -30...+50 °C tpd		±0.9 °C tpd (+0.1...+50 °C tpd) ±1 °C tpd (-4.9...-0 °C tpd) ±2 °C tpd (-9.9...-5 °C tpd) ±3 °C tpd (-19.9...-10 °C tpd) ±4 °C tpd (-30...-20 °C tpd)	300 s	Plug-in head, connection cable 0430 0143 or 0430 0145 required	0636 9840
Precision pressure dew point probe for measurements in compressed air systems incl. cert. with test point -40°C tpd		0...+100 %RH -60...+50 °C tpd		±0.8 °C tpd (-4.9...+50 °C tpd) ±1 °C tpd (-9.9...-5 °C tpd) ±2 °C tpd (-19.9...-10 °C tpd) ±3 °C tpd (-29.9...-20 °C tpd) ±4 °C tpd (-40...-30 °C tpd)	300 s	Plug-in head, connection cable 0430 0143 or 0430 0145 required	0636 9841
Flexible humidity probe (retains shape) for measurements at inaccessible points		0...+100 %RH -20...+140 °C	±2 %RH (+2...+98 %RH)	±0.4 °C (-10...+50 °C) ±0.5 °C (-20...-10.1 °C) ±0.5 °C (+50.1...+140 °C)	30 s	Plug-in head, connection cable 0430 0143 or 0430 0145 required	0628 0014

☑ The measuring instrument inside TopSafe is waterproof with this probe.

* in the temperature range from +10°C to +30°C

Medidor de CO₂

testo 535 - Monitorización fiable de la calidad del aire interior

Medición de CO₂ de alta precisión

Sensor infrarrojo de 2 canales muy estable a largo plazo

Monitorización a largo plazo gracias al cálculo de valores máx. y medios

Sin necesidad de ajustes repetitivos



ppm
CO₂

Una mala calidad del aire dentro de los edificios debido a concentraciones elevadas de CO₂ (superiores a 1000 ppm) puede ser la causa de cansancio, falta de concentración e incluso fuente de enfermedades. El testo 535 es un medidor preciso y fiable de CO₂ para monitorizar la calidad del aire interior. Su sensor de 2 canales de alta calidad y estabilidad permite también mediciones a largo plazo sin requerir ajustes repetitivos.

Con la visualización seleccionable de valores mín./máx. y promedio, el cliente obtiene la monitorización óptima de los resultados de medición.

Con la impresora rápida Testo se pueden documentar los datos de medición in situ, inclusive fecha y hora. La funda opcional TopSafe protege al instrumento contra polvo, suciedad y golpes.

Datos técnicos / Accesorios

testo 535

testo 535, medidor de CO₂ con sonda fija, protocolo de calibración y pilas

Modelo 0560 5350



Tipo de sensor Sensor de infrarrojos de 2 canales

Rango de medición	0 ... +9999 ppm CO ₂
Exactitud ±1 dígito	±(75 ppm CO ₂ +3 % del v.m.) (0 ... +5000 ppm CO ₂) ±(150 ppm CO ₂ +5 % del v.m.) (+5001 ... +9999 ppm CO ₂)
Resolución	1 ppm CO ₂

Datos técnicos generales

Medio de medición	Aire
Temperatura de servicio	0 ... +50 °C
Temperatura de almacenamiento	-20 ... +70 °C
Tipo de pila	Pila cuadrada de 9 V
Tiempo de operatividad	6 h
Medidas	190 × 57 × 42 mm
Peso	300 g
Pantalla	LCD de 2 líneas
Material de la carcasa	ABS
Auto-Off	10 min

Accesorios

Modelo

Accesorios para instrumentos de medición

Estuche de transporte, para almacenar el medidor de forma segura	0516 0191	
Maletín de servicio para instrumento de medición y sondas, medidas 454 x 316 x 111 mm	0516 1201	
Impresora rápida IRDA testo con interfaz infrarroja inalámbrica, 1 rollo de papel térmico y 4 pilas AA	0554 0549	
Cargador externo rápido para 1-4 pilas recargables AA, inclusive 4 pilas Ni-MH con recarga de una pila e indicación del nivel de recarga; comprende carga de mantenimiento, función de descarga incorporada, enchufe internacional para 100-240 V CA, 300 mA, 50/60 Hz integrado	0554 0610	
Papel térmico de repuesto para impresora (6 rollos), adecuado para documentos; documentación de datos de medición legible a largo plazo, hasta 10 años	0554 0568	
Pila recargable de 9 V para medidor, en lugar de pila	0515 0025	
Cargador de sobremesa con enchufes internacionales	0554 1143	
Certificado de calibración ISO de CO ₂ Sondas de CO ₂ ; puntos de calibración 0; 1000; 5000 ppm	0520 0033	

Termómetros por infrarrojos

testo 830 – Medición rápida sin contacto de la temperatura superficial

Indicador láser de la marca de medición y óptica de gran alcance para medir con precisión incluso a larga distancia

Medición muy rápida (dos valores por segundo)

Emisividad ajustable

Dos valores límite configurables

Manejo idóneo gracias a la empuñadura tipo “pistola”

Función “Hold” y visualización de valores mín./máx.



El testo 830 es un termómetro por infrarrojos para la medición de la temperatura superficial sin contacto apto para todo tipo de aplicaciones. Tanto para sector comercial como para la industria. Gracias al nuevo procesador que permite mayor resolución, ahora se pueden hacer mediciones aún más exactas. La temperatura se puede medir con una exactitud de hasta 0.1 °C. Gracias a la función mín./máx. se pueden visualizar y controlar los valores límite de la última medición.

A continuación se detalla una breve descripción de la gama de termómetros por infrarrojos testo 830:

testo 830-T1 con 1-puntero láser para marcar el punto de medición y óptica de 10:1.

testo 830-T2 con 2-punteros láser para marcar el punto de medición y óptica de 12:1.

testo 830-T4 con 2-punteros láser para marcar el punto de medición, entrada para conectar sondas de temperatura externas y óptica de 30:1. Este instrumento mide la temperatura superficial, incluso en los objetos más pequeños, y a una distancia segura.

Termómetros por infrarrojos testo 830

Termómetro por infrarrojos con 1 puntero láser

testo 830-T1

testo 830-T1, termómetro por infrarrojos con puntero láser de 1 haz, óptica 10:1, valores límite ajustables y función de alarma, incl. pilas y protocolo de calibración

Modelo 0560 8311



Termómetro por infrarrojos con 2 punteros láser y conexión para sondas externas

testo 830-T2

Termómetro por infrarrojos con señalización de la marca de medición por puntero láser de dos haces, valores límite ajustables, función de alarma, conexión para sondas externas, incl. pilas y protocolo de calibración.

Modelo 0560 8312



El termómetro por infrarrojos rápido y universal con 1 puntero láser y óptica 10:1 en un ergonómico diseño tipo “pistola”.

- Lecturas rápidas
- Indicador láser
- Límites de alarma ajustables
- Alarma visual y acústica si se exceden los límites
- Facilidad de uso gracias al diseño “tipo pistola”
- Visualizador iluminado
- Factor de emisividad ajustable (0,1 a 1,0)

Set testo 830-T2

Instrumento de medición, sonda de superficie de acción rápida para medición por contacto y funda protectora de cuero.

Modelo 0563 8312

El termómetro rápido y universal por infrarrojos con 2 punteros láser, óptica 12:1 y conexión para sonda externa Tipo K para medición por contacto.

Además de las ventajas del testo 830-T1:

- Indicador láser de 2 haces
- Medición por contacto con sonda de temperatura acoplable
- Medición de emisividad con sonda T/P externa

Termómetros por infrarrojos testo 830

Termómetro por infrarrojos con óptica 30:1 para mediciones precisas a larga distancia

testo 830-T4

testo 830-T4, termómetro por infrarrojos, indicador 2 punteros láser, óptica 30:1, valores límite ajustables, entrada para sondas externas, incl. pila y protocolo de calibración

Modelo 0560 8314



Set testo 830-T4

Set testo 830-T4, termómetro por infrarrojos con funda protectora de piel, incl. sonda de superficie con resorte de banda termopar, pila y protocolo de calibración

Modelo 0563 8314

Con el termómetro por infrarrojos rápido y versátil con 2 punteros láser y óptica 30:1 se puede medir la temperatura superficial incluso en objetos pequeños a una distancia segura. El diámetro de la marca de medición es de tan solo 36 mm a una distancia de 1 m. Además dispone conexión para sondas externas de temperatura.

- Óptica 30:1 para mediciones de temperatura a distancia, incluso en objetos pequeños
- Medición de °C por contacto con sonda TP acoplable
- Ajuste de la emisividad mediante sonda de temperatura externa
- Configuración del valor límite inferior y superior
- Alarma acústica y óptica cuando se exceden los valores límite
- Iluminación del visualizador

Datos técnicos

Datos técnicos comunes a toda la gama

Rango espectral	8 ... 14 μm
Factor de emisividad	Ajustable de 0.1 a 1.0
Temp. Almac.	-40 ... +70 °C
Temp. Func.	-20 ... +50 °C

Tipo de pila	Pila cuadrada de 9V
Vida de la pila	15 h
Peso	200 g
Medidas	190 x 75 x 38 mm
Material/Caja	ABS

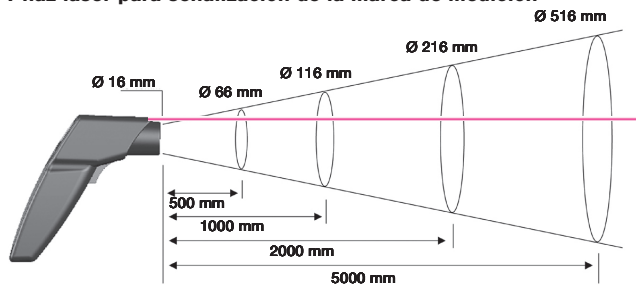
Datos técnicos individuales

	testo 830-T1	testo 830-T2	testo 830-T4
Rango			
Infrarrojos	-30 ... +400 °C	-30 ... +400 °C	-30 ... +400 °C
Tipo K (NiCr-Ni)	-	-50 ... +500 °C	-50 ... +500 °C
Exactitud ± 1 dígito			
Infrarrojos	± 1.5 °C o 1.5 % del v.m. (+0.1 ... +400 °C) ± 2 °C o ± 2 % del v.m. (-30 ... 0 °C) se aplica el valor mayor	± 1.5 °C o ± 1.5 % del v.m. (+0.1 ... +400 °C) ± 2 °C o ± 2 % del v.m. (-30 ... 0 °C) se aplica el valor mayor	± 1.5 °C (-20 ... 0 °C) ± 2 °C (-30 ... -20,1 °C) ± 1 °C o 1 % del v.m. (rango restante)
Tipo K (NiCr-Ni)	-	± 0.5 °C +0.5% del v.m.	± 0.5 °C +0.5% del v.m.
Resolución	0.1 °C	0.1 °C	0.1 °C
Intervalo de medición			
Infrarrojos	0.5 s	0.5 s	0,5 s
Tipo K (NiCr-Ni)	-	1.75 s	1.75 s
Señalización de la marca de medición	1 puntero láser	2 punteros láser	2 punteros láser
Distancia hasta la marca de medición	10:1	12:1	30: 1 (habitual a una distancia de 0,7 m del objeto de medición) 24 mm a 700 mm (90%)

Óptica

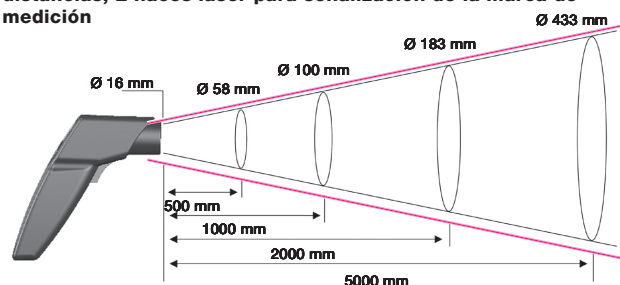
testo 830-T1

Óptica estándar 10:1,
1 haz láser para señalización de la marca de medición



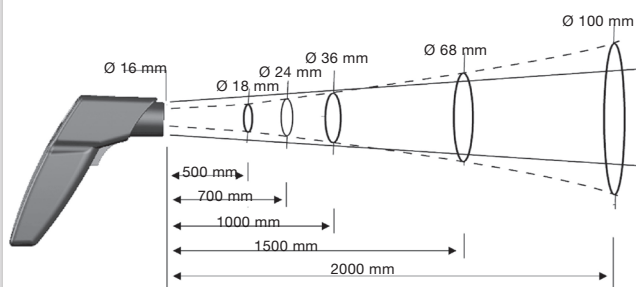
testo 830-T2

La óptica precisa 12:1 permite mediciones exactas a grandes distancias, 2 haces láser para señalización de la marca de medición



testo 830-T4

Distancia hasta la marca de medición 30:1,
2 haces láser para señalización de la marca de medición



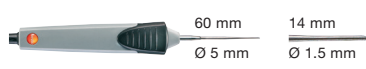
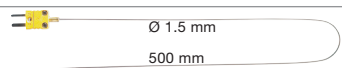

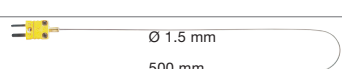
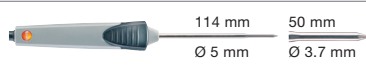
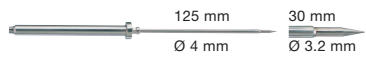
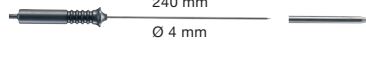


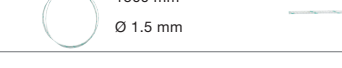


Accesorios

Accesorios para toda la gama 830	Modelo
Cinta adhesiva, p. ej., para superficies brillantes (rollo de 10 m de long., 25 mm de grosor), E = 0,95, resistente a la temperatura hasta +250 °C	0554 0051
Funda de piel para proteger el instrumento de medición, incl. sujeción para cinturón	0516 8302
Pila recargable de 9 V para instrumento, en lugar de pila normal	0515 0025
Cargador para pila recargable de 9 V, para recarga externa de la pila 0515 0025	0554 0025
Certificado de calibración ISO de temperatura, termómetro por infrarrojos; puntos de calibración +60 °C; +120 °C; 180 °C	0520 0002

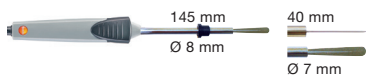
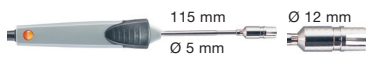
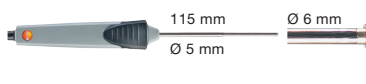


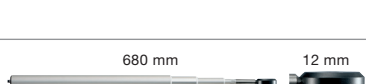

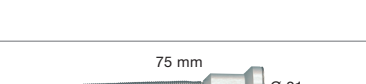
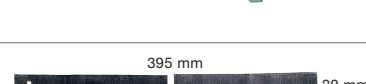



Accesorios para testo 830-T2 /-T4	Modelo
Certificado de calibración ISO de temperatura, instrumentos de medición con sondas de superficie; puntos de calibración +60 °C; +120 °C; +180 °C	0520 0071
Certificado de calibración ISO de temperatura, para sondas aire/inmersión, punto de calibración +60 °C	0520 0063
Certificado de calibración ISO de temperatura, para sondas aire/inmersión, puntos de calibración -18 °C; 0 °C; +60 °C	0520 0001
Certificado de calibración ISO de temperatura, instrumentos con sonda de aire/inmersión, ptos. calibración: 0 °C; +150 °C; +300 °C (Se aplica sólo a la sonda de inmersión/penetración 0602 2693)	0520 0021

Sondas testo 830-T2 / -T4

Tipo de sonda	Medidas Vaina/Extremo de la vaina	Rango medición	Exactitud	t ₉₉	Modelo
Sondas de ambiente					
Sonda de aire resistente, T/P tipo K, Cable fijo 1.2 m		-60 ... +400 °C	Clase 2*	25 s	0602 1793
Sondas de inmersión/penetración					
Sonda de inmersión rápida, precisa, flexible y estanca, T/P tipo K, Cable fijo 1.2 m		-60 ... +1000 °C	Clase 1*	2 s	0602 0593
Sonda de inmersión/penetración ultrarrápida, estanca, T/P tipo K (No es posible la calibración por encima de +300 °C), Cable fijo 1.2 m		-60 ... +800 °C	Clase 1*	3 s	0602 2693
Punta de medición de inmersión, flexible, T/P tipo K		-200 ... +1000 °C	Clase 1*	5 s	0602 5792
Punta de medición de inmersión, flexible, para mediciones en aire/gases de escape (no adecuada para mediciones en fundiciones), T/P tipo K		-200 ... +1300 °C	Clase 1*	4 s	0602 5693
Punta de medición de inmersión, flexible, T/P tipo K		-200 ... +40 °C	Clase 3*	5 s	0602 5793
Sonda de inmersión/penetración estanca, T/P tipo K, Cable fijo 1.2 m		-60 ... +400 °C	Clase 2*	7 s	0602 1293
Sondas para alimentación					
Sonda de alimentación, estanca, en acero inoxidable (IP65), T/P tipo K, Cable fijo		-60 ... +400 °C	Clase 2*	7 s	0602 2292
Sonda de inmersión/penetración, estanca, resistente, cable con protección metálica T _{máx} 230°C, p.ej. para controlar la t ^a del aceite de cocinar, T/P tipo K, Cable fijo		-50 ... +230 °C	Clase 1*	15 s	0628 1292
Termopares					
Termopar con adaptador T/P, flexible, 800 mm de longitud, de fibra de vidrio, T/P tipo K		-50 ... +400 °C	Clase 2*	5 s	0602 0644
Termopar con adaptador T/P, flexible, 1500 mm de longitud, de fibra de vidrio, T/P tipo K		-50 ... +400 °C	Clase 2*	5 s	0602 0645
Termopar con adaptador T/P, flexible, 1500 mm de longitud, PTFE, T/P tipo K		-50 ... +250 °C	Clase 2*	5 s	0602 0646

*Según la normativa EN 60584-2, la exactitud de la Clase 1 se aplica de -40 hasta +1000 °C (Tipo K), la Clase 2 de -40 hasta +1200 °C (Tipo K), la Clase 3 de -200 hasta +40 °C (Tipo K).

Sondas testo 830-T2 /-T4

Tipo de sonda	Medidas Vaina/Extremo de la vaina	Rango medición	Exactitud	t ₉₉	Modelo
Sondas de superficie					
Sonda plana de superficie rápida, para mediciones en lugares de difícil acceso como aberturas estrechas o ranuras, T/P tipo K, Cable fijo		0 ... +300 °C	Clase 2*	5 s	0602 0193
Sonda rápida de superficie con resorte de banda termopar, incluso para superficies irregulares, rango de medición (brevemente) hasta +500 °C, T/P tipo K, Cable fijo 1.2 m		-60 ... +300 °C	Clase 2*	3 s	0602 0393
Sonda de superficie estanca con punta de medición plana para superficies lisas, T/P tipo K, Cable fijo 1.2 m		-60 ... +400 °C	Clase 2*	30 s	0602 1993
Sonda de superficie de gran rapidez con resorte de banda termopar, con ángulo para adaptarse también a superficies irregulares, rango de medición (brevemente) hasta +500 °C, T/P tipo K, Cable fijo 1.2 m		-60 ... +300 °C	Clase 2*	3 s	0602 0993
Sonda de superficie precisa y estanca con cabezal de medición pequeño para superficies lisas, T/P tipo K, Cable fijo 1.2 m		-60 ... +1000 °C	Clase 1*	20 s	0602 0693
Sonda de superficie de cabezal plano con telescopio (máx. 680 mm) para mediciones en lugares de difícil acceso, T/P tipo K, Cable fijo, 1.6 m (menor en consonancia a la extensión del telescopio)		-50 ... +250 °C	Clase 2*	3 s	0602 2394
Sonda magnética, fuerza de adhesión de aprox. 20 N, con imán, para medir en superficies metálicas, T/P tipo K, Cable fijo		-50 ... +170 °C	Clase 2*	150 s	0602 4792
Sonda magnética, fuerza de adhesión de aprox. 10 N, con imán, para medir a temperaturas elevadas en superficies metálicas, T/P tipo K, Cable fijo		-50 ... +400 °C	Clase 2*		0602 4892
Sonda abrazadera con velcro para medición de la temperatura en tuberías con diámetro máx. hasta 120 mm, Tmáx +120 °C, TP tipo K, Cable fijo		-50 ... +120 °C	Clase 1*	90 s	0628 0020
Sonda abrazadera para tuberías de 5 a 65 mm de diámetro, con cabezal de medición intercambiable. Rango de medición, brevemente hasta +280°C, T/P tipo K, Cable fijo		-60 ... +130 °C	Clase 2*	5 s	0602 4592
Cabezal de medición de repuesto para la sonda abrazadera para tuberías, T/P tipo K		-60 ... +130 °C	Clase 2*	5 s	0602 0092
Sonda de pinza para medir en tuberías de 15 a 25 mm de diámetro (máx. 1"), rango de medición, brevemente hasta +130 °C, T/P tipo K, Cable fijo		-50 ... +100 °C	Clase 2*	5 s	0602 4692

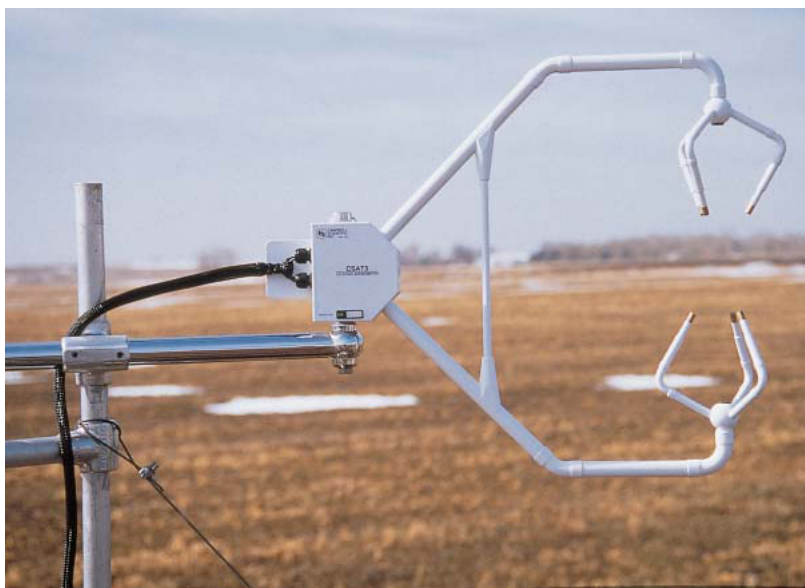
*Según la normativa EN 60584-2, la exactitud de la Clase 1 se aplica de -40 hasta +1000 °C (Tipo K), la Clase 2 de -40 hasta +1200 °C (Tipo K), la Clase 3 de -200 hasta +40 °C (Tipo K).

Instrumentos Testo, S.A.
P.I. La Baileta-Can Xinxà, C/ B, nº 2
08348 Cabriels (Barcelona)
Tel: 937 539 520
Fax: 937 539 526
E-Mail: info@testo.es

Síguenos en:



www.testo.es



The CSAT3, shown making measurements over a fallow field in Minnesota, provides precision turbulence measurements with minimal flow distortion.

Precision Measurements

Best instrument for flux and other turbulence research projects

Overview

Campbell Scientific's CSAT3 3D Sonic Anemometer is the 3D sonic anemometer of choice for eddy-covariance measurements. It has an aerodynamic design, a 10 cm vertical measurement path, operates in a pulsed acoustic mode, and withstands exposure to harsh weather conditions. Three orthogonal wind components (u_x , u_y , u_z) and the speed of sound (c) are measured and output at a maximum rate of 60 Hz. Analogue outputs and two types of digital outputs are provided.

Measurements can be triggered from three sources:

- › Datalogger's SDM command
- › CSAT3's internal clock
- › PC-generated RS-232 command

The SDM protocol supports a group trigger for synchronizing multiple CSAT3s.

Benefits and Features

- › Innovative design provides precision turbulence measurements with minimal flow distortion
- › Can be combined with EC150 or EC155 gas analyzers giving near complete co-location for eddy-covariance measurements
- › Compatible with most Campbell Scientific dataloggers
- › Measurements can be used to calculate momentum flux and friction velocity
- › Campbell Scientific's fine wire thermocouples are an option for fast-response temperature measurements
- › Field rugged
- › Rain: Innovative signal processing and transducer wicks considerably improves performance of the anemometer during rain events
- › Sealed sonic transducers and electronics

Specifications

Measurements

- Outputs: u_x , u_y , u_z , c (u_x , u_y , u_z are wind components referenced to the anemometer axes; c is speed of sound)
- Speed of Sound: Determined from three acoustic paths; corrected for crosswind effects
- Measurement Rate: programmable from 1 to 60 Hz, instantaneous measurements; two over-sampled modes are block averaged to either 20 Hz or 10 Hz

Measurement Precision RMS^a

- u_x , u_y : 1 mm s⁻¹ rms
- u_z : 0.5 mm s⁻¹ rms
- c : 15 mm s⁻¹ (0.025°C) rms
- Wind Direction: 0.06° rms

Accuracy^b

- Offset error: $<\pm 8.0$ cm s⁻¹ (u_x , u_y), $<\pm 4.0$ cm s⁻¹ (u_z)
- Gain Error
 - Wind Vector within $\pm 5^\circ$ of horizontal: $<\pm 2\%$ of reading
 - Wind Vector within $\pm 10^\circ$ of horizontal: $<\pm 3\%$ of reading
 - Wind Vector within $\pm 20^\circ$ of horizontal: $<\pm 6\%$ of reading
- Wind Direction: $\pm 0.7^\circ$ at 1 m s⁻¹ for horizontal wind

Output Signals

- Digital SDM: CSI 33.3 k baud serial interface for datalogger/sensor communication. Data type is 2 B integer per output plus 2 B diagnostic

Digital RS-232

- Baud rate: 9600, 19200 bps
- Data type: 2-byte integer per output plus 2-byte diagnostic

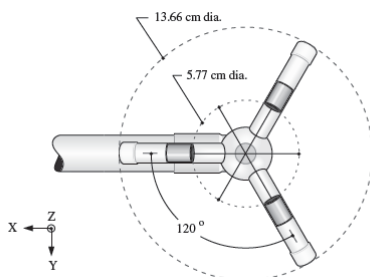
Analogue

- Number of outputs: 4
- Voltage range: ± 5 V
- Number of bits: 12

Reporting Range

- Analogue Outputs:

Output	Reporting Range	LSB
u_x , u_y	± 30 m s ⁻¹ , ± 60 m s ⁻¹	15 mm s ⁻¹ , 30 mm s ⁻¹
u_z	± 8 m s ⁻¹	4 mm s ⁻¹
c	300 to 366 m s ⁻¹ (-50° to +60°C)	16 mm s ⁻¹ (0.026°C)



Low Transducer Assembly Top View

SDM and RS-232 Digital Outputs

- Full scale wind: ± 65.535 m s⁻¹ autoranging between four ranges; least significant bit is 0.25 to 2 mm s⁻¹
- Speed of Sound: 300 to 366 m s⁻¹ (-50° to +60°C); least significant bit is 1 mm s⁻¹ (0.002°C)

Physical Description

- Measurement Path Length: 10.0 cm vertical; 5.8 cm horizontal
- Path Angle from Horizontal: 60 degrees
- Transducer: 0.64 cm diameter
- Transducer Mounting Arms: 0.84 cm diameter
- Support Arms: 1.59 cm diameter

Dimensions

- Anemometer head: 47.3 cm (l) x 42.4 cm (h)
- Electronics box: 26 x 16 x 9 cm

Weight

- Anemometer head: 1.7 kg (3.7 lb)
- Electronics box: 3.8 kg (8.4 lb)

Materials

- Anemometer head: stainless steel tubing
- Electronics box: cast aluminium

Environmental

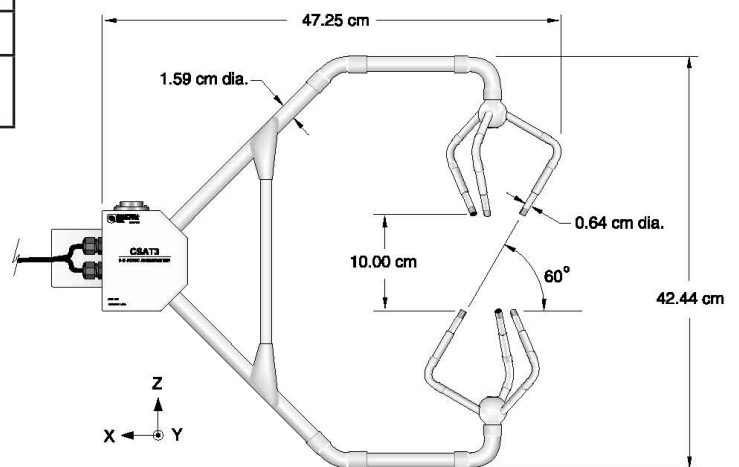
- Operating Temperature: -30° to +50°C

Power Requirements

- Voltage Supply: 10 to 16 Vdc
- Current: 200 mA @ 60 Hz measurement rate; 100 mA @ 20 Hz measurement rate

^aResolution values are for instantaneous measurements made on a constant signal; noise is not affected by sample rate.

^bAccuracy specifications assume -30° to +50°C operating range; wind speeds < 30 m s⁻¹; wind angles between $\pm 170^\circ$.



Anemometer Head

Para analizar la capacidad de ventilación del laboratorio de Motores de la Universidad de Almería (0.04 del Edificio Científico Técnico II-A) se ha usado el programa de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) Ansys Fluent. Para ello, se tomaron las medidas del laboratorio y se creó un modelo geométrico en tres dimensiones en el programa de diseño asistido por ordenador Solidworks. Para la validación del modelo numérico, se llevaron a cabo tres ensayos experimentales en el laboratorio (los dos primeros sin alumnos y el tercero durante una clase con 19 estudiantes), en los que se midieron la velocidad del aire, la temperatura y humedad y la concentración de CO₂, en dos ventanas de entrada de aire y en la puerta de salida. También se midieron las temperaturas de las superficies del laboratorio para utilizarlas como condiciones de contorno del modelo de CFD. Las diferencias entre los valores medidos y simulados con CFD en la puerta de salida fueron inferiores al 10% para todos los parámetros analizados. Una vez validado el modelo de CFD, se realizaron varias simulaciones con el objetivo de optimizar la capacidad de ventilación del laboratorio. Se consideró que la mejor combinación de apertura de ventanas es la que permite mantener la menor concentración de CO₂ posible y la mayor tasa de renovaciones de aire por hora. En las simulaciones de CFD, observaremos distintos parámetros del movimiento del aire en el interior del laboratorio, desde que entra por las ventanas hasta que sale por la puerta, como la velocidad, la concentración de CO₂, la humedad relativa, la temperatura o la humedad absoluta. Estos parámetros nos permitirán analizar el nivel de ventilación y, por lo tanto, podremos evaluar el riesgo de contagio si alguno de los alumnos estuviere infectado con el virus SARS-CoV-2. Las simulaciones de CFD permiten observar el recorrido que sigue el aire en el interior del laboratorio, como se mueve entre los alumnos, mostrando las zonas donde la concentración de CO₂ es mayor, y por tanto el riesgo de contagio entre alumnos es máximo. Pudimos observar cómo en una de las esquinas se estanca el aire, concretamente en la esquina que une la pared norte con la del pasillo (observado una concentración de CO₂ de 470 ppm cercana al máximo admisible de 500 ppm). Otra observación fue que cuando la velocidad del aire de entrada entre las ventanas tiene cierta diferencia, este se ve sometido a una mayor turbulencia y, por tanto, su recorrido en el interior del laboratorio es mayor hasta que sale por la puerta. Las simulaciones con programa Ansys Fluent han permitido determinar la mejor opción para la ventilación del laboratorio. En las últimas simulaciones realizadas con diferentes combinaciones de la apertura de las ventanas, se determinó que la mejor opción, que reduce la concentración máxima de CO₂ interior, se correspondía con la apertura de 4 ventanas más próximas al lado norte. De esta manera, podremos minimizar el riesgo de contagio entre los alumnos.

To analyse the ventilation capacity of the Engine Laboratory of the University of Almería (0.04 of the Technical Scientific Building II-A) the Ansys Fluent Computational Fluid Dynamics (CFD) software has been used. To do this, the laboratory measurements were taken and a three-dimensional geometric model was created in the Solidworks computer-aided design program. For the validation of the numerical model, three experimental tests were carried out in the laboratory (the first two without students and the third during a class with 19 students), in which air velocity, temperature and humidity and CO₂ concentration were measured, in two air intake windows and in the exit door. The temperatures of the laboratory surfaces were also measured to be used as boundary conditions of the CFD model. The differences between the values measured and simulated with CFDs at the exit door were less than 10% for all the parameters analyzed. Once the CFD model was validated, several simulations were carried out with the aim of optimizing the ventilation capacity of the laboratory. We considered that the best combination of window opening was the one that allowed maintaining the lowest concentration of CO₂ possible and the highest rate of air renewals per hour.

In the CFD simulations, we will observe different parameters of the movement of air inside the laboratory, from the moment it enters through the windows until it leaves through the door, such as air velocity, CO₂ concentration, relative humidity, temperature or absolute humidity. These parameters will allow us to analyse the level of ventilation and, therefore, we can evaluate the risk of contagion if any of the students were infected with the SARS-CoV-2 virus. CFD simulations allow observing the path that the air follows inside the laboratory, as it moves between the students, showing the areas where the concentration of CO₂ is higher, and therefore the risk of contagion between students is maximum. We were able to observe how in one of the corners the air stagnates, specifically in the corner that joins the north wall with that of the corridor (observing a CO₂ concentration of 470 ppm close to the maximum allowable of 500 ppm). Another observation was that when the velocity of the inlet air between the windows has a certain difference, it is subjected to greater turbulence and, therefore, its path inside the laboratory is greater until it leaves through the door.

Simulations with an Ansys Fluent program have made it possible to determine the best option for laboratory ventilation. In the latest simulations carried out with different combinations of the opening of the windows, it was determined that the best option, which reduces the maximum concentration of indoor CO₂, corresponded to the opening of 4 windows closer to the north side. In this way, we can minimize the risk of contagion among students.

