

## UNIVERSIDAD DE ALMERIA

### ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

Análisis mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) del confort ambiental en el laboratorio de Termotecnia generado por el sistema de climatización centralizado y la ventilación natural.

**Curso:** 2021/2022

**Modalidad TFG:** Trabajo Experimental

**Alumno:**

Amador JIMÉNEZ NAVAS

**Director:**  
Francisco Domingo MOLINA AIZ





## Índice

Índice .....	i
Índice de figuras .....	iii
Índice de tablas .....	v
Resumen .....	1
Abstract .....	2
<b>1. Interés y objetivos .....</b>	<b>3</b>
1.1. <i>Introducción</i> .....	3
1.2. <i>Objetivos</i> .....	5
<b>2. Revisión bibliográfica.....</b>	<b>7</b>
2.1. <i>Importancia de la ventilación natural</i> .....	7
2.2. <i>Ahorro de energía</i> .....	8
2.3. <i>Simulaciones de CFD</i> .....	9
2.4. <i>Ventilación mecánica</i> .....	9
2.5. <i>Covid-19</i> .....	10
<b>3. Especificaciones técnicas .....</b>	<b>13</b>
3.1. <i>Normativa de obligado cumplimiento</i> .....	13
3.2. <i>Recomendaciones contra el COVID-19</i> .....	17
<b>4. Material y métodos .....</b>	<b>21</b>
4.1. <i>Modelo numérico de CFD</i> .....	21
4.1.1. <i>Ecuaciones de conservación</i> .....	21
4.1.2. <i>Mallado del modelo</i> .....	22
4.1.3. <i>Condiciones de contorno</i> .....	24
4.2. <i>Medidas experimentales</i> .....	29
4.2.1. <i>Características geométricas del laboratorio</i> .....	29
4.2.2. <i>Equipos de medida</i> .....	31
4.2.3. <i>Puntos de toma de datos experimentales</i> .....	32
4.3. <i>Configuraciones de los casos</i> .....	34
<b>5. Resultados y discusión .....</b>	<b>35</b>
5.1. <i>Medidas de flujo de aire con ventilación natural</i> .....	35
5.1.1. <i>Mediciones Ensayo 1</i> .....	35
5.1.2. <i>Mediciones Ensayo 2</i> .....	36
5.1.3. <i>Mediciones Ensayo 3</i> .....	38
5.1.4. <i>Mediciones Ensayo 4</i> .....	41
5.1.5. <i>Mediciones Ensayo 5</i> .....	44
5.2. <i>Modelo de CFD</i> .....	47
5.2.1. <i>Modelo Ensayo 1:</i> .....	47
5.2.2. <i>Modelo Ensayo 2:</i> .....	50
5.2.3. <i>Modelo Ensayo 3:</i> .....	52
5.2.4. <i>Modelo Ensayo 4:</i> .....	55
5.2.5. <i>Modelo Ensayo 5:</i> .....	58
5.2.6. <i>Modelo Climatización</i> .....	60
5.3. <i>Validación</i> .....	63
5.4. <i>Análisis del nivel de confort ambiental generado en el laboratorio</i> .....	65
<b>6. Conclusiones .....</b>	<b>67</b>

<b>7. Integración de las diferentes competencias .....</b>	<b>69</b>
<b>8. Fases de la realización del TFG y su cronograma asociado .....</b>	<b>71</b>
<b>9. Bibliografía.....</b>	<b>73</b>
9.1. <i>Referencias Bibliográficas .....</i>	<i>73</i>
9.2. <i>Normativa.....</i>	<i>75</i>
9.3. <i>Páginas web .....</i>	<i>75</i>
<b>10. Planos .....</b>	<b>77</b>
10.1. <i>Plano de localización-Vista satélite. E 1:25000. ....</i>	<i>77</i>
10.2. <i>Plano de localización-Vista satélite. Laboratorio de termotecnia 1.04 del CITE II-A (Universidad de Almería). E 1:5000.....</i>	<i>77</i>
10.3. <i>Plano laboratorio de termotecnia 1.04 del CITE II-A de la Universidad de Almería E 1:50. ....</i>	<i>81</i>
<b>Anexo A. Tiempos de medida de los ensayos experimentales. ....</b>	<b>83</b>
<b>Anexo B. Datos técnicos de los equipos de medida.....</b>	<b>85</b>

## Índice de figuras

Figura 1. Vista del modelo en la extensión <i>SpaceClaim</i> de ANSYS.....	22
Figura 2. Tamaño de mallado en ejes de unión de paredes 0,2 m modelo y vista en detalle de los nodos de unión entre superficies en la extensión <i>Mesh</i> de ANSYS .....	22
Figura 3. Tamaño de mallado en caras 0,005 m vista general del mallado de nuestro modelo y vista en detalle de los nodos de la puerta y la ventana sur en la extensión <i>Mesh</i> de ANSYS .....	23
Figura 4. Vista general del mallado de nuestro modelo en la extensión <i>Mesh</i> de ANSYS .....	23
Figura 5. Mostrado en azul las entradas de aire exterior a nuestro modelo en ANSYS-FLUENT.....	24
Figura 6. Ventanas de introducción de datos de datos de velocidad y temperatura con la condición de contorno <i>Velocity Inlet</i> . ANSYS-FLUENT. ....	24
Figura 7. Ventanas de introducción de datos de datos de fracción de masa de vapor de agua y fracción molar de CO <sub>2</sub> con la condición de contorno <i>Velocity Inlet</i> . ANSYS-FLUENT.....	25
Figura 8. Salida de aire de nuestro modelo.....	25
Figura 9. Distribución de las temperaturas previamente incluidas en las superficies de nuestro modelo con la condición <i>Wall</i> en ANSYS-FLUENT.....	26
Figura 10. Configuración del interior de nuestro modelo. Ventanas de acceso hacia la selección de <i>species</i> en el orden correcto. ....	26
Figura 11. Modelo previo del laboratorio realizado con formas en Word, base de partida. ....	29
Figura 12. Laboratorio de Termotecnia 1.04 del CITE II-A de la Universidad de Almería modelado y mallado a partir del modelo previo. Realizado en ANSYS FLUENT. ....	29
Figura 13. Fotos del Laboratorio de Termotecnia 1.04 del CITE II-A de la Universidad de Almería..	30
Figura 14. Plano laboratorio de termotecnia 1.04 del CITE II-A de la Universidad de Almería. ....	30
Figura 15. Equipos de medida usados en el experimento. ....	31
Figura 16. Puntos de medida en los ensayos realizados en laboratorio ventanas norte (VN) y sur (VS) y puertas lado norte (LN) y sur (LS). ....	32
Figura 17. Medidas de puerta y ventanas y sus respectivos cuadrantes.....	32
Figura 18. Situación de los aparatos en los puntos definidos.....	32
Figura 19. Instrumentos de medida Testo 440dP y Testo 445 situandose para las mediciones en los cuadrantes de las ventanas y puerta. ....	33
Figura 20. Instrumentos de medida: Testo 445 y Testo 440 con diferentes sondas usados en las mediciones de los cuadrantes de la puerta y las ventanas. ....	33
Figura 21. Velocidad del aire v [m/s]. ....	38
Figura 22. Temperatura del aire T [°C].....	38
Figura 23. Humedad absoluta del aire x [kg/kg].....	38
Figura 24. Humedad del aire. HR [%].....	39
Figura 25. Concentración de CO <sub>2</sub> C [ppm]. ....	39
Figura 26. Velocidad del aire v [m/s]. ....	41
Figura 27. Temperatura del aire T [°C].....	41
Figura 28. Humedad del aire x [kg/kg].....	41

<b>Figura 29. Humedad del aire HR [%].</b> .....	<b>42</b>
<b>Figura 30. Concentración de CO<sub>2</sub> C [ppm].</b> .....	<b>42</b>
<b>Figura 31. Velocidad del aire v [m/s].</b> .....	<b>44</b>
<b>Figura 32. Temperatura del aire T [°C].</b> .....	<b>44</b>
<b>Figura 33. Humedad del aire x [kg/kg].</b> .....	<b>44</b>
<b>Figura 34. Concentración de CO<sub>2</sub> C [ppm].</b> .....	<b>45</b>
<b>Figura 35. Datos de la velocidad del aire [m/s] en cada nodo de la salida de aire del modelo.</b> .....	<b>47</b>
<b>Figura 36. Humedad absoluta [kg/kg] en la salida de nuestro modelo.</b> .....	<b>47</b>
<b>Figura 37. Movimiento de las partículas de vapor de agua [kg/kg].</b> .....	<b>48</b>
<b>Figura 38. Temperatura de las distintas superficies de la estancia representada en el modelo [K].</b> .....	<b>48</b>
<b>Figura 39. Velocidad del aire en el modelo [m/s].</b> .....	<b>49</b>
<b>Figura 40. Humedad absoluta. [kg/kg] en la puerta, distribución en función de la altura.</b> .....	<b>50</b>
<b>Figura 41. Temperatura del interior de la estancia [K].</b> .....	<b>50</b>
<b>Figura 42. Detalle de velocidad del aire en las proximidades de la estantería [m/s].</b> .....	<b>51</b>
<b>Figura 43. Distribución de la velocidad del aire dentro del laboratorio [m/s].</b> .....	<b>51</b>
<b>Figura 44. Cantidad de humedad absoluta [kg/kg]. En las entradas y los emisores.</b> .....	<b>52</b>
<b>Figura 45. Dirección de humedad absoluta y cantidad expulsada [kg/kg].</b> .....	<b>52</b>
<b>Figura 46. Distribución de temperaturas [K] de las superficies en el ensayo 3.</b> .....	<b>53</b>
<b>Figura 47. Velocidad del aire en el ensayo 3 [m/s]. Vista isométrica.</b> .....	<b>53</b>
<b>Figura 48. Velocidad del aire en el ensayo 3 [m/s]. Vista en planta.</b> .....	<b>54</b>
<b>Figura 49. Emisores de CO<sub>2</sub> y dirección del flujo en el ensayo 4. Vista en planta.</b> .....	<b>55</b>
<b>Figura 50. Flujo del aire expulsado por los emisores. Expresado en humedad absoluta [kg/kg].</b> .....	<b>55</b>
<b>Figura 51. Distribución de temperaturas [K] de las superficies.</b> .....	<b>56</b>
<b>Figura 52. Velocidad del aire en el interior del laboratorio [m/s]. Vista desde el lado suroeste.</b> .....	<b>56</b>
<b>Figura 53. Velocidad del aire en el interior del laboratorio [m/s]. Vista isométrica.</b> .....	<b>57</b>
<b>Figura 54. Velocidad del aire en el interior del laboratorio [m/s].</b> .....	<b>57</b>
<b>Figura 55. Velocidad del aire en el interior del laboratorio [m/s].</b> .....	<b>58</b>
<b>Figura 56. Dirección de CO<sub>2</sub> en la que exhalan los emisores en el ensayo 5.</b> .....	<b>58</b>
<b>Figura 57. Humedad absoluta entrante al laboratorio [kg/kg].</b> .....	<b>59</b>
<b>Figura 58. Temperatura de las superficies del laboratorio [K].</b> .....	<b>59</b>
<b>Figura 59. Velocidad del aire en el interior del laboratorio [m/s]. Vista planta.</b> .....	<b>60</b>
<b>Figura 60. Velocidad del aire en el interior del laboratorio [m/s]. Vista isométrica.</b> .....	<b>61</b>
<b>Figura 61. Temperatura [K] de las superficies. Detalle del techo.</b> .....	<b>61</b>
<b>Figura 62. Temperatura [K] de las superficies. Detalle de la puerta.</b> .....	<b>61</b>
<b>Figura 63. Dirección del flujo de CO<sub>2</sub> en los emisores del interior.</b> .....	<b>62</b>
<b>Figura 64. Humedad absoluta [kg/kg]. Trayectoria del aire que entra en el laboratorio.</b> .....	<b>62</b>

## Índice de tablas

Tabla 1. Esquema con la clasificación de riesgo en centros educativos en función de la concentración de CO <sub>2</sub> (Di Gilio <i>et al.</i> , 2021). .....	11
Tabla 2. Condiciones interiores de diseño. Correspondiente a Tabla 1.4.1.1 (BOE, 2019).....	13
Tabla 3. Caudales de aire exterior, en dm <sup>3</sup> /s por persona correspondiente a Tabla 1.4.2.1 Caudales de aire exterior, en dm <sup>3</sup> /s por persona (RITE, 2007). .....	15
Tabla 4. Concentración de CO <sub>2</sub> en los locales ocupados por personas correspondiente a Tabla 1.4.2.3 Caudales de aire exterior, en dm <sup>3</sup> /s por persona (RITE, 2007). .....	15
Tabla 5. Condiciones de contorno utilizadas en las simulaciones de CFD para los 5 casos analizados correspondientes a los ensayos experimentales en el laboratorio. Velocidad del aire $v$ , temperatura del aire $T$ , humedad absoluta $x$ y concentración de CO <sub>2</sub> $C$ . Temperatura de las superficies $T_s$ , cantidad de vapor de agua y de CO <sub>2</sub> expulsado por respiración de los ocupantes $q_x$ y $q_c$ , respectivamente..	27
Tabla 6. Condiciones de contorno utilizadas en la simulación de CFD para el caso con sistema de climatización centralizado. Velocidad del aire $v$ , temperatura del aire $T$ , humedad absoluta $x$ y concentración de CO <sub>2</sub> $C$ . Temperatura de las superficies $T_s$ , cantidad de vapor de agua y de CO <sub>2</sub> expulsado por respiración de los ocupantes $q_x$ y $q_c$ , respectivamente. ....	27
Tabla 7. Rangos de medidas de los equipos usados. Velocidad del aire, temperatura del aire, humedad relativa y concentración de CO <sub>2</sub> . .....	31
Tabla 8. Configuraciones de los ensayos realizados en el laboratorio. ....	34
Tabla 9. Medidas experimentales realizadas el día 07/04/2021 en la ventana sur y la puerta. Velocidad del aire $v$ , temperatura del aire $T$ , humedad relativa $HR$ , humedad absoluta $x$ y concentración de CO <sub>2</sub> $C$ .....	35
Tabla 10. Medidas experimentales realizadas el día 07/04/2021 en la ventana sur y en la puerta. Velocidad del aire $v$ , temperatura del aire $T$ , humedad relativa $HR$ , humedad absoluta $x$ y concentración de CO <sub>2</sub> $C$ .....	36
Tabla 11. Medidas experimentales realizadas el día 07/04/2021 en la ventana sur y la puerta. Velocidad del aire $v$ , temperatura del aire $T$ , humedad relativa $HR$ , humedad absoluta $x$ y concentración de CO <sub>2</sub> $C$ .....	36
Tabla 12. Medidas experimentales realizadas el día 13/10/2021 en la ventana sur y en la puerta. Velocidad del aire $v$ , temperatura del aire $T$ , humedad relativa $HR$ , humedad absoluta $x$ y concentración de CO <sub>2</sub> $C$ .....	39
Tabla 13. Medidas experimentales realizadas el día 13/10/2021 en la ventana norte y en la puerta. Velocidad del aire $v$ , temperatura del aire $T$ , humedad relativa $HR$ , humedad absoluta $x$ y concentración de CO <sub>2</sub> $C$ .....	40
Tabla 14. Medidas experimentales realizadas el día 22/10/2021 en la ventana sur y en lado norte de la puerta. Velocidad del aire $v$ , temperatura del aire $T$ , humedad relativa $HR$ , humedad absoluta $x$ y concentración de CO <sub>2</sub> $C$ .....	42
Tabla 15. Medidas experimentales realizadas el día 22/10/2021 en la ventana norte y en el lado sur de la puerta. Velocidad del aire $v$ , temperatura del aire $T$ , humedad relativa $HR$ , humedad absoluta $x$ y concentración de CO <sub>2</sub> $C$ . ....	43

<b>Tabla 16. Medidas experimentales realizadas en día 22/10/2021 en la ventana sur y en el lado sur de la puerta. Velocidad del aire <math>v</math>, temperatura del aire <math>T</math>, humedad relativa <math>HR</math>, humedad absoluta <math>x</math> y concentración de <math>CO_2</math> <math>C</math>.</b> .....	<b>45</b>
<b>Tabla 17. Medidas experimentales realizadas en día 22/10/2021 en la ventana y en el lado norte de la puerta. Velocidad del aire <math>v</math>, temperatura del aire <math>T</math>, humedad relativa <math>HR</math>, humedad absoluta <math>x</math> y concentración de <math>CO_2</math> <math>C</math>.</b> .....	<b>45</b>
<b>Tabla 18. Validación de las medidas tomadas en los ensayos con los valores obtenidos en CFD. caudal del aire <math>q</math>, temperatura del aire <math>T</math>, humedad absoluta <math>x</math> y concentración de <math>CO_2</math>.</b> .....	<b>63</b>
<b>Tabla 19. Análisis del nivel de confort de las condiciones climáticas simuladas con CFD. <math>Q</math> Caudal de aire exterior por unidad de superficie, velocidad del aire <math>v</math>, temperatura del aire <math>T</math>, humedad relativa <math>HR</math> y concentración de <math>CO_2</math> <math>C</math>.</b> .....	<b>65</b>
<b>Tabla 20. Cronograma de la realización de actividades.</b> .....	<b>71</b>
<b>Tabla A1. Tiempos de medida de los diferentes puntos en el ensayo 1 del día 07/04/2021.</b> .....	<b>83</b>
<b>Tabla A2. Tiempos de medida de los diferentes puntos en el ensayo 2 del día 07/04/2021.</b> .....	<b>83</b>
<b>Tabla A3. Tiempos de medida de los diferentes puntos en el ensayo 3 del día 13/10/2021.</b> .....	<b>83</b>
<b>Tabla A4. Tiempos de medida de los diferentes puntos en el ensayo 4 del día 22/10/2021.</b> .....	<b>83</b>
<b>Tabla A5. Tiempos de medida de los diferentes puntos en el ensayo 5 del día 22/10/2021.</b> .....	<b>84</b>

## Resumen

En el presente trabajo se ha medido la capacidad de ventilación del laboratorio de Termotecnia de la Universidad de Almería (1.04 del Edificio Científico Técnico II-A con una superficie de 46,9 m<sup>2</sup>) mediante mediciones experimentales y modelos numéricos. Del mismo modo se ha analizado el nivel de confort generado mediante ventilación natural y con el sistema de climatización centralizado existente en el laboratorio. Para ello se han comparado los valores medios de velocidad, temperatura, humedad relativa y concentración de CO<sub>2</sub> del aire interior con los valores recomendados para centros educativos. Además, la medida del nivel de CO<sub>2</sub> se puede utilizar como elemento de control del riesgo para la transmisión de Sars-CoV-2 transportado por el aire.

Para visualizar el movimiento de aire en el laboratorio se ha desarrollado un modelo numérico de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), validado mediante mediciones experimentales en cinco casos, con tres configuraciones diferentes de entradas y salidas de aire a través de las ventanas y puerta del laboratorio, respectivamente. Las simulaciones se han realizado con el programa de CFD ASNYS-FLUENT versión 2021. Los ensayos experimentales consistieron en la medida de la velocidad del aire en las ventanas y en la puerta mediante anemómetros de hilo y de esfera caliente. Simultáneamente se midieron los valores de temperatura, humedad absoluta y concentración de CO<sub>2</sub> del aire. Para establecer las condiciones de contorno del modelo de CFD se midieron las temperaturas superficiales con un sensor de infrarrojos.

Mediante las mediciones experimentales realizadas se ha podido observar cómo el nivel de ventilación ha variado entre 14,6 y 83,4 renovaciones de aire por hora (correspondiendo a caudales en la puerta de 0,56 y 3,21 m<sup>3</sup>/s, para un volumen del aula de 138,4 m<sup>3</sup>). Estos valores se sitúan muy por encima de los valores recomendados de 5-6 renovaciones de aire por hora para la reducción de la transmisión del SARS-CoV-2 en aulas de enseñanza. Con una ocupación de 3 personas (15,6 m<sup>2</sup>/persona) las temperaturas han estado en todos los casos en el rango adecuado entre 21 y 26 °C y la humedad relativa entre 45 y 60% y las concentraciones de CO<sub>2</sub> por debajo de 500 ppm.

Los patrones de aire simulados mediante CFD permitieron detectar la existencia de zonas de estancamiento de aire a baja velocidad, principalmente en la zona entre las dos ventanas de entrada del aire. También se pudo visualizar la interacción del aire respirado por las personas que expulsan CO<sub>2</sub> y la humedad. De igual forma se observó cómo mediante ventilación natural se genera una difusión por desplazamiento, en la que el aire se mueve horizontalmente desde las ventanas por las que entra el aire situadas en la pared oeste hacia la puerta situada en la pared este. Mediante el sistema de climatización centralizada con una entrada de aire en el centro del techo y dos salidas de retorno en las esquinas, se genera un movimiento principalmente vertical del aire. Se produce en este caso una ventilación por mezcla mediante la cual el aire que inicialmente desciende en el centro del laboratorio se calienta desplazándose hacia la parte superior, evacuando el calor y las sustancias contaminantes hacia el techo.

## Abstract

In the present work, the ventilation capacity of the laboratory of Thermotechnic of the University of Almería (1.04 of the Technical Scientific Building II-A with an area of 46.9 m<sup>2</sup>) has been measured by means of experimental measurements and numerical models. In the same way, the level of comfort generated by natural ventilation and with the centralized air conditioning system existing in the laboratory has been analysed. To this end, the average values of velocity, temperature, relative humidity, and CO<sub>2</sub> concentration of indoor air have been compared with the recommended values for educational centres. In addition, the measurement of the CO<sub>2</sub> level can be used as a risk control element for the transmission of airborne Sars-CoV-2.

To visualize the movement of air in the laboratory, a numerical model of Computational Fluid Dynamics (CFD) has been developed. The model was validated by experimental measurements in five cases, with three different configurations of air inlets and outlets through the windows and door of the laboratory, respectively. The simulations have been carried out with the CFD program ASNYS-FLUENT version 2021. Experimental tests consisted of measuring the air velocity in the windows and door using wire and hot sphere anemometers. Simultaneously, the values of temperature, absolute humidity and CO<sub>2</sub> concentration of the air were measured. To establish the boundary conditions of the CFD model, surface temperatures were measured with an infrared sensor.

Through the experimental measurements carried out, it has been possible to observe how the level of ventilation ranged between 14.6 and 83.4 air renewals per hour (corresponding to airflows at the door of 0.56 and 3.21 m<sup>3</sup>/s, for a classroom volume of 138.4 m<sup>3</sup>). These values are well above the recommended values of 5-6 air renewals per hour for the reduction of SARS-CoV-2 transmission in classrooms. With an occupancy of 3 people (15.6 m<sup>2</sup>/person) temperatures have in all cases been in the appropriate range between 21 and 26 °C and relative humidity between 45 and 60% and CO<sub>2</sub> concentrations below 500 ppm.

The air patterns simulated by CFD allowed to detect the existence of areas of air stagnation low speed, mainly in the area between the two air intake windows. It was also possible to visualize the interaction between the air breathed by people who expel CO<sub>2</sub> and humidity. In the same way, it was observed how through natural ventilation a diffusion is generated by mixture by means of which the air moves horizontally from the windows through which the air enters on the west wall to the door located on the east wall. Through the centralized air conditioning system with an air intake in the centre of the roof and two return outlets in the corners, a vertical movement of the air is generated. In this case, a displacement ventilation occurs by means of which the air that initially descends in the centre of the laboratory is heated by moving towards the top, evacuating heat, and polluting substances to the ceiling.

## 1. Interés y objetivos

### 1.1. Introducción

El Confort ambiental es el bienestar físico y psicológico del individuo cuando las condiciones de temperatura, humedad y velocidad del aire de la estancia son favorables a la actividad que se desarrolla. Este trabajo pretende mejorar las condiciones de confort ambiental, centrándose en estas tres variables y en la concentración de CO<sub>2</sub> que en función de la actividad desarrollada debe permanecer por debajo de unos niveles determinados.

Debido a la crisis climática actual se presenta la cuestión de cómo alcanzar el confort ambiental de la forma más eficiente posible. Los sistemas de climatización permiten de una forma más sencilla controlar los parámetros de temperatura y humedad, aunque se opone al objetivo de lograr reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera. En la mayoría de climatizadores se recircula el aire por lo que la concentración de CO<sub>2</sub> va en aumento por el efecto de la respiración de las personas en la estancia.

Esto abre paso al concepto de ventilación natural. La ventilación natural nos ayuda a alcanzar y controlar los cuatro objetivos estudiados en este proyecto: la temperatura, la velocidad del aire, la concentración de CO<sub>2</sub> y la humedad en interiores mediante la configuración de entradas y salidas de aire.

La necesidad de saber cómo funciona la ventilación para evitar concentraciones altas de cualquier sustancia que pueda ser nociva no es nada nuevo. Se ha puesto en jaque el uso de la ventilación mecánica para conseguir el confort térmico ya que estos aparatos en su gran mayoría recirculan el aire. Con la situación actual de la crisis climática la opción de entradas y salidas de aire distribuidas de manera adecuada en las estancias ha cobrado suma importancia favoreciendo la ventilación natural.

La Ventilación natural ha resurgido como una prioridad debido a la pandemia iniciada en 2020 del COVID-19. Se hace necesaria una constante renovación del aire en lugares cerrados debido a que, con altas concentraciones de personas y a poca distancia entre ellas, el riesgo de contagio es muy alto.

Durante la pandemia de COVID-19 se ha hecho evidente que la dependencia de la calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) de edificios convencionales necesitan ser repensados. Se ha establecido que las áreas cerradas con ventilación limitada aumentan el riesgo de transmisión. Por ello, el sector de la construcción debe tomar en consideración el actual paradigma HVAC en edificios. Actualmente, el mecanismo principal utilizado para ahorrar energía en edificios de ventilación centralizada es mezclar el aire de retorno con la entrada de aire fresco, pero esto pone el aire fresco y la eficiencia energética en desacuerdo. Frente a las crisis ambientales y de salud de hoy, si nuestro objetivo es proporcionar entornos que sean saludables y energéticamente eficientes, ventilación e intercambio de aire debe estar separado de la calefacción y la refrigeración. El aire debe ser principalmente para respirar, no para calefacción y refrigeración (Aviv *et al*, 2021).

La respuesta a este desafío podría ser la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), una herramienta que permite hacer simulaciones con diferentes configuraciones: variar entradas y salidas de aire, distribución de mobiliario y de emisores en el interior. Estas simulaciones no podrían ser validadas sin un trabajo experimental previo con el que comprobar las simulaciones realizadas. La CFD es muy amplia y permite diferentes condiciones para la simulación de cada caso. Estas simulaciones tendrán validez tras la comprobación experimental con mediciones realizadas con aparatos debidamente calibrados y verificados. Con esta herramienta se evita tener que hacer mediciones con cada configuración para saber cuál es la más optima y distribuir los interiores de la forma más eficiente y que además favorezcan el confort ambiental.

La concentración de sustancias como el CO<sub>2</sub> no es algo visible, al igual que la humedad relativa y la temperatura. La velocidad a la que se está moviendo el aire se siente, pero tampoco se ve. Así que, para ilustrar y ver de forma más gráfica cómo se comporta el aire, cómo se mueve, qué concentraciones de sustancias tiene y cómo afecta la temperatura en su movimiento, se realizarán simulaciones donde se podrá ver gráficamente estos parámetros.

Tras realizar las mediciones con anemómetros de hilo y de esfera caliente debidamente calibrados y verificados en los diferentes casos, servirán como comprobación de los datos obtenidos en las simulaciones.

Desarrollar un modelo que permita realizar configuraciones de interiores combinando la eficiencia energética, el confort ambiental y la concentración de sustancias nocivas para la salud. Cobra mayor importancia al permitir trasladar de forma óptima los parámetros de entrada de aire en las estancias para alcanzar los niveles de confort ambiental en el interior. Además, las comprobaciones realizadas validarán el procedimiento y los parámetros que han de ser configurados para un resultado óptimo.

El procedimiento seguido en este estudio se puede replicar a cualquier interior y permitirá configurar las estancias de la forma más eficiente, correspondiente a los estándares de confort ambiental y salud.

La ventilación natural es tan antigua como la vivienda humana, pero los actuales edificios se han convertido en complejas máquinas térmicas. Actualmente, existen muchas soluciones técnicas que ofrecen mucho más control sobre aire fresco y confort térmico que una simple apertura de fachada, pero la ventilación natural compensa en simplicidad y eficiencia. Estudios previos han demostrado el potencial de ahorro de energía de la ventilación natural, especialmente en climas cálidos. Los límites de confort térmico a través de la ventilación natural dependen, principalmente, de las condiciones de aire exterior. Estos límites a menudo se definen de manera estricta como una temperatura del aire. (Aviv *et al*, 2021).

La ventilación se utiliza en los edificios para crear un ambiente térmicamente cómodo y con una calidad aceptable del aire interior, mediante la regulación de los parámetros que intervienen en el interior, como la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del aire y las concentraciones de sustancias químicas en el aire, como el CO<sub>2</sub>. Con el fin de regular los parámetros de aire interior, es esencial contar con herramientas adecuadas para predecir el rendimiento de ventilación en los edificios (Chen, 2009). Las simulaciones de CFD son una poderosa herramienta para estimar los patrones de flujo de aire y el entorno térmico en locales climatizados mediante sistemas de aire acondicionado (Chen, 2009; Mao *et al.*, 2017; Tsou, 2001).

Existen métodos experimentales para medir la ventilación en un espacio concreto, que generalmente se basan en medidas de CO<sub>2</sub>. La tasa de ventilación se puede determinar en función del tiempo que tarda en reducirse la concentración de CO<sub>2</sub>, utilizado como gas trazador (Dols y Persily, 1995), ya que en el aire exterior su valor actual es 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).

La mejora constante de la eficiencia energética de los edificios y un mejor confort térmico se han convertido en las principales preocupaciones para el diseño y el funcionamiento de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (Shan *et al.*, 2020).

La seguridad en el ambiente del laboratorio está estrechamente relacionada con el sistema de ventilación, que también incide en la transmisión de contaminantes gaseosos. Durante las últimas décadas, el efecto de la tasa de cambio de aire por hora ha sido bien estudiado tanto experimental como numéricamente. (Jin *et al*, 2012) investigó el rendimiento de la ventilación bajo diferentes tasas de ventilación en una maqueta de laboratorio de química e indicó que la concentración de contaminantes no era linealmente proporcional a la tasa de ventilación (Liu *et al*, 2017).

## **1.2. Objetivos**

El interés del presente trabajo es mostrar visualmente, mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD), la eficiencia de la ventilación natural dentro de un laboratorio y cómo afecta la configuración de cada elemento a la misma. También el hacer comparativas con respecto a las mediciones de concentración de CO<sub>2</sub>, humedad, temperatura y velocidad del aire mediante los equipos usados y las simulaciones realizadas. Además, se podrán obtener valores como el caudal de aire y la ubicación de las entradas y salidas del mismo en la estancia. Esto permitirá saber el nivel de confort ambiental dentro del laboratorio y las posibilidades de mejora.

El objetivo principal es analizar, mediante un modelo de CFD, el confort ambiental generado mediante ventilación natural a través de las diferentes configuraciones de entradas y salidas de aire disponibles en el laboratorio.

Este objetivo principal hace necesario que tengamos una serie de subobjetivos específicos:

- Desarrollar un modelo tridimensional de CFD del laboratorio que permita analizar el movimiento del aire generado por ventilación natural y con un sistema de aire acondicionado.
- Realizar medidas en el propio laboratorio del movimiento del aire, de la concentración de CO<sub>2</sub>, de temperatura y de humedad con diferentes configuraciones de funcionamiento de las ventanas y la puerta.
- Validar el modelo de CFD, comparando los valores simulados y medidos de velocidad del aire, temperatura, humedad y concentración de CO<sub>2</sub>.
- Analizar el nivel de confort ambiental generado en el laboratorio para diferentes configuraciones de funcionamiento.



## 2. Revisión bibliográfica

### 2.1. Importancia de la ventilación natural

La ventilación natural es aquella que se consigue por medios no mecánicos (normalmente abriendo puertas y ventanas), aprovechando las diferencias de presión que generan un gradiente, bien por temperatura, bien por acción del viento. Este tipo de ventilación puede lograr ser eficaz a un bajo coste; no obstante, depende de las condiciones meteorológicas del exterior, del diseño del edificio y de la ocupación y las actividades realizadas por las personas. La mayor eficacia se consigue con una ventilación natural cruzada, esto es, con la apertura de dos aberturas en paredes opuestas. (INSST, 2021)

La ventilación natural, que permite que el aire del interior de un edificio se reponga de forma natural (es decir, sin utilizar fuentes adicionales de energía) con aire fresco del exterior, es más económica que la ventilación mecánica. Sin embargo, a su vez, la ventilación natural es más difícil de cuantificar y controlar, ya que los parámetros a considerar pueden ser demasiado numerosos: las dimensiones y configuraciones de los respiraderos y orificios a través de los cuales se produce la ventilación, la configuración del interior y los alrededores, otras características arquitectónicas del edificio que pueden cambiar el curso del flujo del viento y la dirección del viento incidente. Muchos estudios han intentado cuantificar las formas en que estos parámetros afectan la ventilación natural, utilizando modelos analíticos, modelos de redes de flujo, experimentos de túnel de viento, y simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD). La mayoría de estos estudios utilizaron modelos de forma genérica (es decir, cúbicos o rectangulares), con un solo orificio en una pared para estudiar la ventilación de un solo lado, o dos aberturas en paredes opuestas / adyacentes o en la misma pared para investigar la ventilación cruzada (Zhang *et al.*, 2020).

La ventilación natural (VN) puede compensar el consumo de energía, asociado los costos y las emisiones de dióxido de carbono al mismo tiempo que ayuda a la salud de los ocupantes y preferencias. Se ha demostrado que la VN da como resultado reducciones sustanciales en energía de refrigeración hasta en un 40-50% en algunas ciudades de Europa y Estados Unidos. Sin embargo, es difícil diseñar con ventilación natural (Li *et al.*, 2021).

El uso de sistemas de ventilación natural para ventilar completamente un edificio ha sido fuertemente discutido. Utilizando la dirección y la velocidad del viento, así como el efecto de flotabilidad de la disipación interna del calor, se pueden utilizar las fuerzas impulsoras naturales para proporcionar las tasas de aire fresco necesarias para los ocupantes. Un buen ejemplo de esto son las torres de viento de ventilación natural o los atrapa vientos que aprovechan el viento predominante, así como el efecto de flotabilidad, para proporcionar las tasas de suministro de ventilación necesarias y disipar el calor (Calautit *et al.*, 2020).

Numerosos estudios han utilizado un término general, potencial de ventilación natural (NVP), para indicar el uso de ventilación natural en edificios y sitios. Uno de los principales objetivos de estos estudios fue evaluar la idoneidad de usar ventilación natural en sitios determinados o en climas determinados. Los investigadores examinaron las condiciones locales, incluidas las meteorológicas, información morfológica, ambiental y térmica para evaluar NVP. Luego, los investigadores podrían comparar los NVP de varias regiones, países o en todo el mundo. Otro propósito importante que cumple la evaluación NVP es describir el potencial de un edificio para utilizar ventilación natural con un conjunto dado de opciones de diseño de un edificio (por ejemplo, ubicación de ventanas o áreas de apertura). Los focos de estos estudios estaban en diseño de edificios o componentes de edificios para identificar mejores soluciones utilizando ventilación natural (Yoon *et al.*, 2020).

La ventilación natural es una importante estrategia de diseño de edificios pasivos para el desarrollo de ambientes interiores sostenibles y saludables. Aunque a menudo se prefiere la ventilación cruzada por sus mayores caudales, pocos edificios pueden lograr la ventilación cruzada completamente debido al interior: particiones, obstáculos y espesores, y la ventilación de un solo lado es más comúnmente utilizada. La predicción precisa de ventilación de un solo lado es requerida; de lo contrario, si se sobrestiman las tasas de ventilación los edificios pueden sobrecalentarse y provocar una desconfianza generalizada sobre la eficacia de ventilación natural. La ventilación de un solo lado de los edificios, especialmente en áreas urbanizadas, es difícil de predecir ya que depende de muchos factores: velocidad del viento, interna diferencia de temperatura, gradientes de temperatura interior, viento dirección, turbulencia, ubicación, entorno y tipo de apertura. Todo o algunos de estos pueden tenerse en cuenta según la complejidad del modelo y los datos utilizados en el desarrollo del modelo (Gough *et al*, 2020).

El rendimiento de la ventilación natural se ve influenciado por una combinación de diferentes características de diseño, como el modo de ventilación (es decir, ventilación de un solo lado y ventilación cruzada), la relación entre la ventana y la pared, el tipo de apertura y el área. Entre estos parámetros, el modo de ventilación tiene el mayor impacto en la tasa de ventilación de un edificio. Varios estudios han investigado la ventilación cruzada utilizando mediciones a gran escala, experimentos a pequeña escala y la combinación de ambos. Lo y Novoselac investigaron la naturaleza dinámica de la ventilación cruzada midiendo la velocidad y la dirección del viento, la presión de fachada y la concentración de gas en un edificio con varias zonas de una sola planta con ventilación cruzada (Omrani *et al*, 2017).

## **2.2. Ahorro de energía**

Los edificios consumen entre el 30% y el 40% de la demanda energética final mundial, lo que representa hasta el 30% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub>. Dado que los ocupantes requieren una mayor demanda y control sobre su entorno, este valor aumentará. Un informe del Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD) muestra que este cambio de comportamiento de los ocupantes ha provocado un aumento de 3 °C en la temperatura del aire interior, lo que se correlaciona con un aumento del 20% en la demanda de energía. Recuperar este aumento de 3 °C en la temperatura del aire interior podría generar ahorros de energía de hasta un 20% en la demanda de calefacción, limitando las emisiones de gases de efecto invernadero y reduciendo los costos. La investigación del *Energy Technology Institute* sugiere que la calefacción de espacios, junto con el calentamiento de agua, representa el 23% de la demanda energética del Reino Unido y el 20% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub>. Los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) son responsables de los altos niveles de esta demanda de energía en los edificios, hasta el 50% de la demanda total de energía de los edificios. Los sistemas de ventilación natural ofrecen una alternativa al HVAC para ventilar edificios sin procesos mecánicos o intensivos en energía (Calautit *et al.*, 2020).

La calidad ambiental interior se puede definir mediante parámetros como la calidad del aire interior, el confort térmico, el confort visual y la acústica. Entre estos parámetros, la calidad ambiental interior se ve afectada principalmente por el confort térmico. En la actualidad, el confort térmico interior en los edificios se logra cada vez más mediante la aplicación de acondicionadores de aire. Este mayor uso de acondicionadores de aire da como resultado un aumento en el consumo de energía y los consiguientes efectos ambientales negativos. En los países desarrollados, los sistemas HVAC (Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado) de los edificios residenciales consumen más de dos tercios de la energía suministrada a los edificios. Estos elevados niveles de consumo de energía, así como las consiguientes cargas sobre el medio ambiente, han convertido las estrategias de eficiencia energética en una prioridad en las normativas de construcción de muchos países. A pesar de consumir mucha energía, existe un potencial significativo para la reducción del uso de energía en los edificios, en particular mediante el uso de refrigeración y calefacción pasivas en climas predominantemente de refrigeración y de calefacción, respectivamente (Omrani *et al*, 2017).

### **2.3. Simulaciones de CFD**

La simulación CFD se ha vuelto cada vez más popular para investigar la ventilación natural, ya que es económica, rápida y produce más datos (por ejemplo, datos de campo de flujo) que otros métodos. Dicha simulación sigue un enfoque acoplado o desacoplado. En el enfoque acoplado, todos los orificios están "abiertos" y se permite que los flujos de aire exterior e interior se mezclen. Por lo tanto, tanto el entorno de viento exterior como el interior se modelan en el mismo dominio computacional, y las interacciones entre los flujos interior y exterior se resuelven simultáneamente utilizando ecuaciones de gobierno apropiadas. El enfoque desacoplado, por el contrario, emplea dos pares de dominios computacionales y geometrías separadas para modelar los flujos de viento interior y exterior. (Zhang *et al.*, 2020)

La ventilación natural normalmente contiene una mezcla de flujo laminar y turbulento al llegar al edificio localizada especialmente en la entrada. El resultado de la simulación cerca de la entrada afecta en gran medida a la precisión de la solución de los campos interiores por lo que debe calcularse con precisión. El modelado turbulento CFD más utilizado es el de Navier-Stokes promediado por Reynolds. Generalmente requiere modelos específicos del sitio y de la aplicación, y se ha demostrado que no funciona correctamente para la ventilación natural. Es probable que esto se deba al hecho de que los enfoques basados en este modelado necesitan más información de los regímenes de flujo para identificar flujos laminares, de transición y turbulentos en diferentes regiones, lo que generalmente no está disponible con antelación. Esta limitación de este modelado hace que no puedan predecir de manera fiable el coeficiente de transferencia de calor en el límite (número de Nusselt), parámetro fundamental en la investigación de la eficiencia energética de los edificios. Por el contrario, con el modelado turbulento basado en *Large Eddy Simulation* es una alternativa prometedora para predecir con precisión el transporte térmico en recintos. Este modelado se ha aplicado con éxito a la convección natural en problemas de cerramiento de referencia y luego se ha implementado en simulaciones de edificios con una predicción precisa de los efectos de la ventilación natural (Xu *et al.*, 2021).

Los modelos CFD se han utilizado para el estudio de la calidad del aire interior, la ventilación natural y la ventilación estratificada, que son difíciles de predecir mediante otro tipo de modelos (Chen, 2009). 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 confort térmico generado por los sistemas de aire acondicionado (Li *et al.*, 2009; Aryal y Leephakpreeda, 2015; Shan *et al.*, 2020).

Mediante el uso de simulaciones de CFD se pueden comparar diferentes opciones de suministro de aire para mantener el confort térmico en una zona acondicionada. Utilizando estas simulaciones, el diseñador puede elegir el mejor método de suministro de aire en una habitación disminuyendo el riesgo de una solución incorrecta (Khatri *et al.*, 2017).

### **2.4. Ventilación mecánica**

Los ocupantes de locales climatizados a menudo se quejan de demasiado frío y/o demasiado calor por lo que sigue siendo un desafío controlar el funcionamiento de los sistemas de aire acondicionado. Los sistemas de climatización deben proporcionar comodidad a los ocupantes mediante una distribución uniforme del flujo de aire (Shan *et al.*, 2020). Por otro lado, una mala ventilación en espacios interiores confinados está asociada 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).

La concentración de CO<sub>2</sub> en espacios interiores cerrados aumenta rápidamente en presencia de personas, que exhalan CO<sub>2</sub> al respirar. La renovación de aire con aire exterior reduce las concentraciones de CO<sub>2</sub> en el interior, lo que favorece la atención y rendimiento escolar, ya que la exposición a concentraciones de CO<sub>2</sub> demasiado elevadas produce aletargamiento y dificulta la atención (IDAEA-CSIC, 2021). El Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, RITE (BOE, 2007) establece una ventilación de 12.5 litros por persona y segundo para aulas de enseñanza.

## 2.5. Covid-19

Desde el brote de COVID-19 en 2019, cada vez hay más evidencia que el virus puede transmitirse a través del aire desde un paciente enfermo y que el virus en pequeñas gotas de aerosol puede sobrevivir en el aire durante horas (Doremalen *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2020; Morawska & Cao, 2020). Algunos estudios también han indicado que los sistemas de ventilación (Ding *et al.*, 2020; Pei *et al.*, 2021) utilizado para crear el ambiente interior en edificios afectaría la transmisión de enfermedades infecciosas transmitidas por el aire (Srivastava *et al.*, 2021).

Para mejorar la calidad del aire interior durante la pandemia de COVID-19, la recomendación más común ha sido suministrar suficiente aire exterior para minimizar el riesgo de infección por COVID-19 en los edificios (ASHRAE, 2020; CDC, 2020; Centro Europeo para la Prevención y el Control de Enfermedades, 2020). Más aire fresco necesita energía adicional para manejar el aire exterior, como calefacción, refrigeración y (des) humidificación. Sin embargo, no todos los sistemas de ventilación de los edificios pueden soportar la carga de calefacción y refrigeración con un 100% de aire exterior. No existen estándares de ventilación para la cantidad de aire exterior requerida en los edificios para el control de la infección por SARS-CoV-2 (American Society of Heating, 2019). Otros estudios (Feng *et al.*, 2021; Rahmani & Mirmahaleh, 2021; Xu *et al.*, 2020) han propuesto una ocupación intermitente con ventilación (Melikov *et al.*, 2020), una disminución en la densidad de ocupación (Wang *et al.*, 2020) o una reducción de la jornada laboral (Zhang *et al.*, 2020). Todas estas medidas podrían ayudar en principio, pero no son soluciones permanentes. El propósito de la presente investigación fue proporcionar un método simple y de ahorro de energía para reducir el riesgo de infección por SARS-CoV-2 con cambios mínimos en los sistemas de ventilación existentes, a fin de crear un ambiente interior saludable y permitir que las personas regresen al trabajo (Srivastava *et al.*, 2021).

La ventilación ha sido ampliamente reconocida como un medio para reducir la transmisión aérea del SARSCoV-2 y cualquier otra microgota que contenga virus en el aire, además de otras medidas (por ejemplo, evitar el hacinamiento), incluidos los controles de ingeniería de edificios que proporcionan suficiente y ventilación eficaz, preferiblemente con filtración de partículas y desinfección del aire, y evitando la recirculación del aire. Asimismo, la reconsideración de las tasas de ventilación debe incluir como objetivo la necesidad de eliminar los patógenos aerotransportados para diseñar espacios con bajo riesgo de infección, los cuales deben ser incluidos en las normas en los próximos años. En España se implementaron recomendaciones de las administraciones general y autonómica para el curso escolar 2020-21 con relación al uso obligatorio de máscaras (interiores y exteriores), distancias entre alumnos, protocolos de limpieza y desinfección, etc. Entre todas estas medidas, la mejora de la ventilación natural se consideró una medida clave para la búsqueda de un espacio interior seguro y saludable. Se priorizó la ventilación natural sobre la mecánica, y se debían tomar medidas especiales con la ventilación mecánica (filtros, tasas más altas, etc.). La recomendación fue al menos ventilar al principio y al final de cada clase, durante el receso y, si es posible, durante las clases (Monge-Barrio *et al.*, 2021).

Actualmente, la OMS sostiene que la transmisión de este virus se produce principalmente por contacto directo con personas infectadas que, al hablar, toser o estornudar, expulsan gotitas respiratorias o saliva, que caen al suelo en un breve periodo de tiempo. Estas gotículas pueden caer y depositarse sobre objetos a partir de los cuales puede darse el contagio posteriormente si se tocan y a continuación se tocan la nariz, la boca o los ojos o pueden impactar sobre las mucosas o la piel. También pueden ser inhaladas por otras personas que se encuentran cerca. Si bien los datos disponibles indican este contacto cercano como la vía principal de transmisión del virus, existe también cierta evidencia de transmisión por aerosoles, es decir, aquellas partículas que pueden permanecer en el aire durante más tiempo: bajo determinadas condiciones, se produce infección de personas a más de dos metros de distancia. Estas transmisiones ocurren normalmente en espacios cerrados y con una ventilación inadecuada, donde las personas permanecen por un periodo de tiempo largo, desde 30 minutos a varias horas. Por tanto, el riesgo de exposición de los trabajadores a los aerosoles presentes en su lugar de trabajo vendrá condicionado por el tamaño de los mismos, pues en gran medida, es el

diámetro aerodinámico de la partícula lo que determinará el tiempo que los aerosoles pueden mantenerse en suspensión pudiendo darse exposiciones a corta o a larga distancia (más allá de los 2 metros desde la fuente de generación del aerosol) (INSST, 2021).

El Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, RITE (BOE, 2007) definido en situación de no-pandemia, indica una ventilación 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 m<sup>2</sup>, 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).

La medida de las concentraciones de CO<sub>2</sub> puede servir para controlar los niveles de ventilación en locales y contribuir a prevenir la transmisión del SARS-CoV-2 (Di Gilio *et al.*, 2021). A partir de los resultados del monitoreo de CO<sub>2</sub> y con el fin de garantizar una ventilación adecuada del aire en los edificios educativos, Di Gilio *et al.* (2021) proporcionaron una clasificación de riesgo de 4 niveles que incluye acciones correctivas específicas para cada nivel (Tabla 1).

**Tabla 1. Esquema con la clasificación de riesgo en centros educativos en función de la concentración de CO<sub>2</sub> (Di Gilio *et al.*, 2021).**

Tipo de riesgo	Bajo	Moderado	Alto	Muy elevado
Acciones *	No se necesitan acciones	Aplicar acción <b>A</b>  Si ya se aplicaba <b>A</b> , aplicar <b>B</b>  Si <b>A</b> y <b>B</b> se aplicaban, aplicar <b>C</b>  Si <b>A</b> , <b>C</b> se aplicaban, aplicar <b>D</b>	Aplicar <b>A</b> y <b>B</b>  Si <b>A</b> y <b>B</b> se aplicaban, aplicar <b>C</b>  Si <b>A</b> , <b>C</b> se aplicaban, aplicar <b>D</b>  Si <b>A</b> , <b>C</b> , <b>D</b> se aplicaban, aplicar <b>E</b>	Aplicar <b>A</b> y <b>C</b>  Si <b>A</b> , <b>C</b> se aplican, aplicar <b>D</b>  Si <b>A</b> , <b>C</b> , <b>D</b> se aplican, aplicar <b>E</b>
Concentraciones máximas de CO <sub>2</sub> y/o concentraciones medias durante las horas de clase	< 700 ppm	>700 ppm < 800 ppm	> 800 ppm < 1000 ppm	> 1000 ppm

\* **A.** abrir de forma continua las puertas; **B:** abrir las ventanas durante 10 minutos al mediodía; **C:** abrir las ventanas durante 10 minutos al finar de las horas de clase y/o en los cambios de clase; **D:** cambiar la gestión (por ejemplo, el tiempo de apertura de las ventanas, el número de alumnos, ...); **E:** son necesarios cambios en las infraestructuras.



### 3. Especificaciones técnicas

#### 3.1. Normativa de obligado cumplimiento

Calidad del aire interior: las instalaciones térmicas permitirán mantener una calidad del aire interior aceptable, en los locales ocupados por las personas, eliminando los contaminantes que se produzcan de forma habitual durante el uso normal de los mismos, aportando un caudal suficiente de aire exterior y garantizando la extracción y expulsión del aire viciado (RITE, 2007).

Para la correcta aplicación de la exigencia en el diseño y dimensionado de las instalaciones térmicas debe seguirse la secuencia de verificaciones siguiente (RITE, *PARTE II: INSTRUCCIONES TÉCNICAS*, 2007):

#### **Exigencia de calidad térmica del ambiente (RITE, IT 1.1.4.1.2 Temperatura operativa y humedad relativa, 2007)**

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 de temperatura y temperatura del suelo se mantienen en la zona ocupada dentro de los valores establecidos a continuación (BOE, 2019).

1. Las condiciones interiores de diseño de la temperatura operativa y la humedad relativa se fijarán en base a 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 m, con grado de vestimenta de 0,5 clo en verano y 1 clo en invierno y un PPD entre el 10 y el 15 %, los valores de la temperatura operativa y de la humedad relativa estarán comprendidos entre los límites indicados en la tabla 2.

**Tabla 2. Condiciones interiores de diseño. Correspondiente a Tabla 1.4.1.1 (BOE, 2019).**

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 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 cambiarlas 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.
  3. La temperatura seca del aire de los locales que alberguen piscinas climatizadas se mantendrá entre 1 °C y 2 °C por encima de la del agua del vaso, con un máximo de 30 °C. La humedad relativa del local se mantendrá siempre por debajo del 65 %, para proteger los cerramientos de la formación de condensaciones.

### **Velocidad media del aire (RITE, IT 1.1.4.1.3 Velocidad media del aire, 2007).**

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 los 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%(Ec.1):

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

- b) Con difusión por desplazamiento, intensidad de la turbulencia del 15% y PPD por corrientes de aire menor que el 10% (BOE, 2019.) (Ec.2):

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

- c) 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.
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.

### **Exigencia de calidad del aire interior (RITE, IT 1.1.4.2 Exigencia de calidad del aire interior, 2007)**

1. En los edificios de viviendas, a los locales habitables del 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 consideran válidos los requisitos de calidad de aire interior establecidos en la Sección HS 3 del Código Técnico de la Edificación.
2. El resto de edificios dispondrá de un sistema de ventilación para el aporte del suficiente caudal de aire exterior que evite, en los distintos locales en los que se realice alguna actividad humana, la formación de elevadas concentraciones de contaminantes, de acuerdo con lo que se establece en el apartado 1.4.2.2 y siguientes. A los efectos de cumplimiento de este apartado se considera válido lo establecido en el procedimiento de la UNE-EN 13779.

### **Categorías de calidad del aire interior (RITE, IT 1.1.4.2.2 Categorías de calidad del aire interior en función del uso de los edificios, 2007)**

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 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 (RITE, IT 1.1.4.2.3 Caudal mínimo del aire exterior de ventilación, 2007)**

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 3 cuando las personas tengan una actividad metabólica de alrededor 1,2 m, cuando sea baja la producción de sustancias contaminantes por fuentes diferentes del ser humano y cuando no esté permitido fumar.

**Tabla 3. Caudales de aire exterior, en dm<sup>3</sup>/s por persona correspondiente a Tabla 1.4.2.1 Caudales de aire exterior, en dm<sup>3</sup>/s por persona (RITE, 2007).**

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

- b) Para locales donde esté permitido fumar, los caudales de aire exterior serán, como mínimo, el doble de los indicados en la tabla 3.
    - 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.
  - B. Método directo por concentración de CO<sub>2</sub>
    - 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 CO<sub>2</sub>, buen indicador de las emisiones de bioefluentes humanos. Los valores se indican en la Tabla 4.

**Tabla 4. Concentración de CO<sub>2</sub> en los locales ocupados por personas correspondiente a Tabla 1.4.2.3 Caudales de aire exterior, en dm<sup>3</sup>/s por persona (RITE, 2007).**

Categoría	ppm (*)
IDA 1	350
IDA 2	500
IDA 3	800
IDA 4	1200

- b) Para locales con elevada producción de contaminantes (piscinas, restaurantes, cafeterías, bares, algunos tipos de tiendas, etc.) se podrá emplear los datos de la tabla 4.

### **Artículo 13. Exigencias básicas de salubridad (HS) (Documento básico HS CTE, 2019)**

#### 13.3 Exigencia básica HS 3: Calidad del aire interior

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, 2019)**

1. 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 CO<sub>2</sub> sea menor que 900 ppm y que el acumulado anual de CO<sub>2</sub> que exceda 1.600 ppm sea menor que 500.000 ppm·h, en ambos casos con las condiciones de diseño del apéndice C.
2. 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.
3. 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.

#### **Diseño**

##### Medios de 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.

##### Medios de ventilación híbrida mecánicas

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.

#### **Ventanas y puertas exteriores**

1. La superficie total practicable de las ventanas y puertas exteriores de cada local debe ser como mínimo un veinteavo de la superficie útil del mismo.

### 3.2. Recomendaciones contra el COVID-19

Las siguientes son herramientas para identificar formas de mejorar la ventilación:

Aumentar la introducción de aire del exterior:

- **Abra los reguladores de aire del exterior** más allá de la configuración mínima para reducir o eliminar la recirculación de aire del sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado. Si el clima es templado, esto no afectará el confort térmico ni la humedad. Sin embargo, puede ser difícil implementar esto con clima frío, caluroso o húmedo, y es posible que deba consultar a un profesional experimentado en HVAC.
- **Abra puertas y ventanas**, cuando las condiciones climáticas lo permitan, para aumentar el flujo de aire del exterior. No abra las puertas y ventanas si hacerlo representa un riesgo de salud o seguridad (p. ej., riesgo de caer, riesgo de provocar síntomas de asma) para los ocupantes del edificio. Incluso una ventana apenas abierta puede incorporar aire beneficioso del exterior.
- **Usar ventiladores para potenciar la efectividad de las ventanas abiertas:**

Para lograrlo de manera segura, es importante tener en cuenta la **ubicación de los ventiladores**, la cual dependerá de la configuración de la habitación. Evite ubicar los ventiladores de manera tal que puedan provocar que el aire contaminado fluya directamente de una persona a otra (vea las preguntas frecuentes a continuación acerca del uso de ventiladores en espacios cerrados). Una estrategia útil es usar un ventilador de ventana, ubicado de manera segura en una ventana, para extraer el aire de la habitación hacia el exterior. Esto ayudará a incorporar aire puro a la habitación a través de las ventanas y puertas abiertas sin generar corrientes de aire muy fuertes. Es posible obtener resultados similares en establecimientos más grandes mediante el uso de otros sistemas de ventilación, como ventiladores de hacial y ventiladores de techo.

- Garantizar que los sistemas de ventilación funcionen correctamente y propicien una calidad de aire aceptable en el interior **de acuerdo con el nivel de ocupación de cada espacio**.
- Equilibrar o adaptar los sistemas de HVAC para aumentar el flujo total de aire hacia los espacios ocupados cuando sea posible.
- **Apagar los controles de ventilación a demanda** (DCV, por sus siglas en inglés) que reducen el suministro de aire con base en la ocupación o temperatura durante los horarios de ocupación. En casas y edificios donde el funcionamiento del ventilador de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado puede controlarse desde el termostato, configure el ventilador en la posición "encendido" en lugar de "automático", lo que hará que el ventilador funcione de manera continua, incluso cuando no sea necesaria la calefacción o el aire acondicionado.

La ventilación consiste en **introducir aire limpio en un espacio al tiempo que se elimina el aire viciado**, a fin de mantener o mejorar la calidad del aire. La ventilación se puede lograr en forma natural (por ejemplo, mediante la apertura de una ventana) o a través de la instalación de un sistema mecánico (CDC, 2021).

La propagación de la COVID-19 ocurre con mayor frecuencia cuando una **persona infectada está en contacto estrecho o directo con otra persona**. El riesgo de propagación del virus es más elevado en espacios atestados y con **ventilación deficiente**, donde las personas pasan largos periodos muy cerca unas de otras. Al mejorar la ventilación de los espacios interiores se puede reducir el riesgo de propagación del virus en dichos espacios (OMS, 2021).

La ventilación no es una medida independiente y debería implementarse como parte de un conjunto integral de medidas, tales como el distanciamiento físico, el uso de una mascarilla, el lavado frecuente de manos y toser o estornudar cubriéndose con la parte interior del codo. Cada una de estas cosas es importante para protegerlo a usted de la infección de la COVID-19.

Entre las recomendaciones básicas de salud para mantener una buena calidad del aire interior frente al coronavirus están:

- Mantener la máxima aportación posible de aire exterior en los locales, mediante ventilación natural y/o en los sistemas de ventilación y climatización. Si sólo se dispone de ventilación natural, maximizar el caudal de renovación del aire abriendo ventanas y puertas
- Iniciar **la ventilación dos horas antes de la apertura del local** y mantenerla en funcionamiento una hora después de cerrarlo, si es posible manteniendo la ventilación en funcionamiento todo el día.
- Las descargas de **las extracciones de aire deben estar alejadas de las tomas de aire exterior** y en el caso de que estén próximas, hay que interponer una barrera para impedir la recirculación del aire.
- Los **lavabos deben estar bien ventilados** y si tienen extracción forzada del aire, debe ser ininterrumpida durante todo el día.
- Para evitar la transmisión fecal-oral del virus, antes de accionar la descarga de agua en los inodoros debe cerrarse la tapa. Es poco recomendable utilizar urinarios y secadores de aire para las manos. También se recomienda revisar diariamente que los sifones de los inodoros, de las picas y el desagüe del suelo estén llenos de agua.
- Los **ventiladores** (de aspas, de pie, de sobremesa, etc.) **no son recomendables** ya que pueden ser una fuente de dispersión de gotículas, dado el flujo de aire que generan a su alrededor. Si es necesario su uso, hay que usarlo a la menor velocidad posible y complementarlo con una ventilación natural cruzada, de forma que el flujo de aire generado no se dirija hacia las personas, vigilando además que la posición del ventilador no facilite la transmisión entre grupos.
- La recirculación del aire producida por las Unidades de Tratamiento del Aire (UTAs) puede ayudar a mantener los aerosoles en el ambiente, evitando que precipiten por gravedad y recirculándolos, por lo que se recomienda cerrar las compuertas de recirculación y trabajar exclusivamente con aire exterior.
- La ventilación se refiere a renovación de aire, es decir, sustitución del aire interior por aire limpio exterior. El uso de un ventilador en un ambiente interior cerrado no equivaldría a ventilar en el sentido de renovación de aire.
- En este aspecto, el parámetro más importante a tener en cuenta es la renovación de aire por ocupante, pudiendo cuantificarse la ventilación de un espacio mediante dos parámetros:
- Renovaciones de aire por hora (ACH). Con 3 renovaciones por hora se renueva el 95% de aire interior por aire exterior. Se recomiendan entre 5-6 renovaciones por hora.
- Litros de aire por persona y segundo. El Ministerio de Sanidad recomienda un mínimo de 12,5 l/segundo y ocupante. Dicho valor es prácticamente equiparable a las 5-6 renovaciones por hora indicadas anteriormente.
- La concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en el aire es un buen indicador de la tasa de renovación de aire en un espacio cerrado. Al respirar generamos CO<sub>2</sub> y su acumulación en el ambiente nos da una idea de lo “viciado” que está el ambiente en su interior. Su concentración dependerá de varios factores como el volumen de la sala, el número de ocupantes, su edad y la actividad realizada... siendo difícil establecer un valor o rango de valores de concentración aplicable a todos los espacios. De manera general, se podría establecer un umbral de 800-1000 ppm de concentración de CO<sub>2</sub> como intervalo de concentración que no debería superarse como garantía de una buena ventilación. No se puede establecer una relación directa de la concentración de CO<sub>2</sub> medida con la cantidad de bioaerosoles o carga viral de los mismos en un espacio. Únicamente indica aspectos de calidad de aire entendiéndose que, a mayor calidad,

mejor ventilación, mejor tasa de renovación de aire y menor probabilidad de transmisión, siempre sin obviar el resto de medidas universales y teniendo en mente que el riesgo cero no existe (Segura, 2021).

La ventilación natural es insustituible, es el mejor método para mejorar la calidad del aire interior en las aulas y reducir la presencia de virus, para que esto sea eficiente el consejo es que sea continua y constante. Por eso durante el invierno, el Comité de Salud Medioambiental de la Asociación Española de Pediatría, aconseja mantener abiertas las ventanas, e incorporar un sensor de CO<sub>2</sub> en los centros educativos, para poder monitorizar el nivel en las aulas. De esta forma poder tomar medidas para que el nivel de CO<sub>2</sub> esté por debajo de 700 ppm en el aula de forma deseable. En el invierno, en la mayoría de las ocasiones (95%) se puede conseguir con una apertura parcial de las ventanas de 10 a 30 cm (AEP, 2020).

Las recomendaciones para ventilar en el colegio (AEP, 2020), serían: Educación al aire libre en el patio parques urbanos cercanos. Abrir ventanas y puertas de forma constante y continua. Sensor de CO<sub>2</sub>. Abrir parcialmente ventanas para mantener CO<sub>2</sub> < 700 ppm. Buscar la temperatura de confort térmico infantil. Abrigarse un poco más. Sistemas de calefacción o ventilación mecánica/filtración de fuentes renovables.



## 4. Material y métodos

### 4.1. Modelo numérico de CFD

#### 4.1.1. Ecuaciones de conservación

La ecuación 3 es la forma general de la **ecuación de conservación de masa** y es válida para flujos incompresibles y compresibles.  $S_m$  es la masa agregada a la fase continua desde la segunda fase dispersa y cualquier fuente definida por el usuario (ANSYS, 2013):

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

La **conservación del momento** en un marco de referencia inercial (no acelerado) se describe en (4) (ANSYS, 2013):

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

donde  $p$  es la presión estática,  $\bar{\tau}$  es el tensor de tensión,  $\rho \vec{g}$  y  $\vec{F}$  son la fuerza del cuerpo gravitacional y las fuerzas del cuerpo externo, respectivamente.  $\vec{F}$  también contiene otros términos de origen dependientes del modelo, como medios porosos y fuentes definidas por el usuario.

#### Ecuaciones de transporte para el modelo k-ε estándar

La energía cinética de la turbulencia, y su velocidad de disipación, se obtienen de las siguientes ecuaciones (5 y 6) (ANSYS, 2013):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (6)$$

#### Ecuaciones de viscosidad

El campo de flujo en el dominio computacional se modela con ecuaciones instantáneas, tridimensionales de Navier-Stokes. Para un flujo viscoso, confinado e incompresible de un fluido newtoniano, usando (7, 8 y 9) (Zhang *et al*, 2020):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\nu s_{ij}) \quad (8)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (c u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( D \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) \quad (9)$$

donde  $u_i$  y  $x_i$  son los vectores instantáneos de velocidad y posición,  $p$  es la presión instantánea;  $t$  tiempo y  $\nu$  densidad;  $\mu$  es la viscosidad molecular cinemática,  $c$  es la concentración instantánea,  $D$  es el coeficiente de difusividad molecular, y  $s_{ij}$  es el tensor de velocidad de deformación definido en (10) (Zhang *et al*, 2020).

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (10)$$

#### 4.1.2. Mallado del modelo

El modelo en 3D de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se realizará utilizando el programa ANSYS-FLUENT en la versión 2021 (ANSYS, Inc., Canonsburg, EE. UU.).

Este modelo está realizado con las medidas del laboratorio y reproducido con todos los elementos que interfieren en el paso del aire del mismo. Las entradas de aire se encuentran en las ventanas y la salida la puerta. Esto se ha comprobado experimentalmente en el laboratorio mediante mediciones.

En primer lugar, como se ha comentado antes, se ha utilizado el programa ANSYS en su versión Fluid Flow (*Fluent*), una de las múltiples herramientas que posee ANSYS. En él se ha realizado un modelado geométrico mediante la extensión *SpaceClaim*. (Fig. 1.).

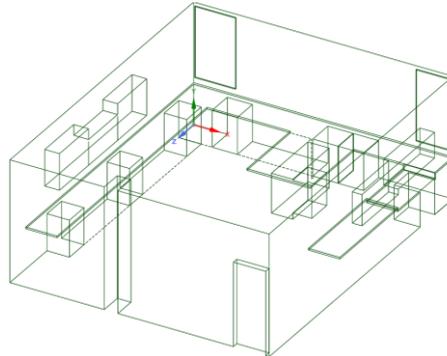


Figura 1. Vista del modelo en la extensión *SpaceClaim* de ANSYS

ANSYS es un programa de análisis de elementos finitos (FEA) por lo que, tras la realización del modelo geométrico, se ha realizado un mallado del mismo es necesario realizar la malla para saber los nodos en los que se van a realizar los cálculos.

Hay otra extensión que solo se dedica al mallado del modelo y al control de todos los parámetros del mismo llamada *Mesh*. Para el mallado de este modelo se han diferenciado tres tipos de ajustes de mallado.

En primer lugar, se ha definido el mallado en los ejes de unión de las cuatro paredes y el suelo para que tengan la misma medida, esto hace que coincidan los nodos y no haya puntos de desunión. El ajuste se denomina *Edge Sizing* y la medida de los elementos es de 0,2 m (Fig. 2.).

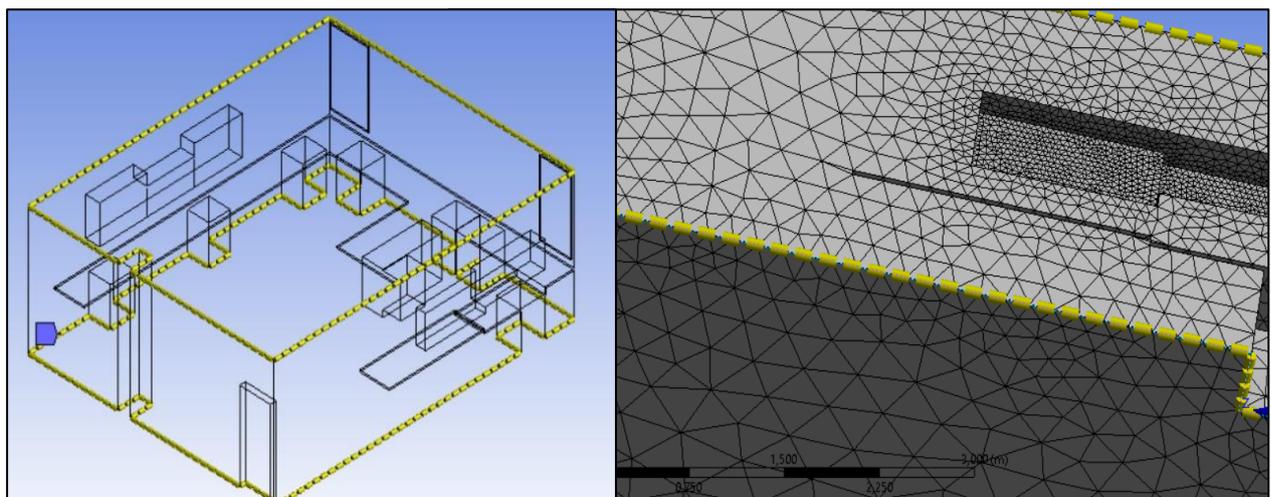


Figura 2. Tamaño de mallado en ejes de unión de paredes 0,2 m modelo y vista en detalle de los nodos de unión entre superficies en la extensión *Mesh* de ANSYS

El segundo elemento de mallado se realiza en los puntos que tienen mayor relevancia en el cálculo de los parámetros, o sea, en entradas y salidas de aire y en las estanterías (se sitúan delante de las entradas). El ajuste se denomina *Face Sizing*. El tamaño del elemento es de 0,005 m (Figura 3.).

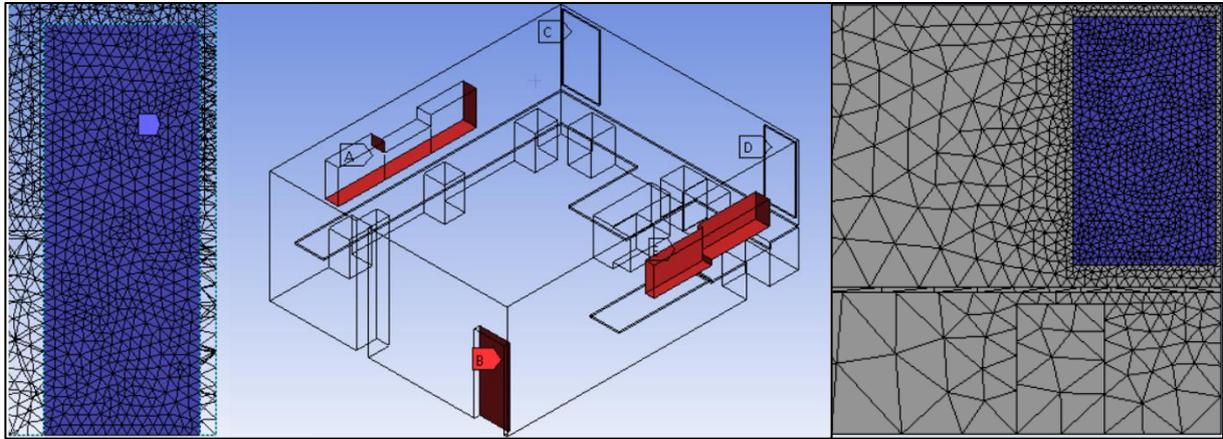


Figura 3. Tamaño de mallado en caras 0,005 m vista general del mallado de nuestro modelo y vista en detalle de los nodos de la puerta y la ventana sur en la extensión *Mesh* de ANSYS

El resto se ha generado de forma normal y predeterminada según las medidas del modelo, quedando como resultado lo que se puede observar en la Fig. 4.

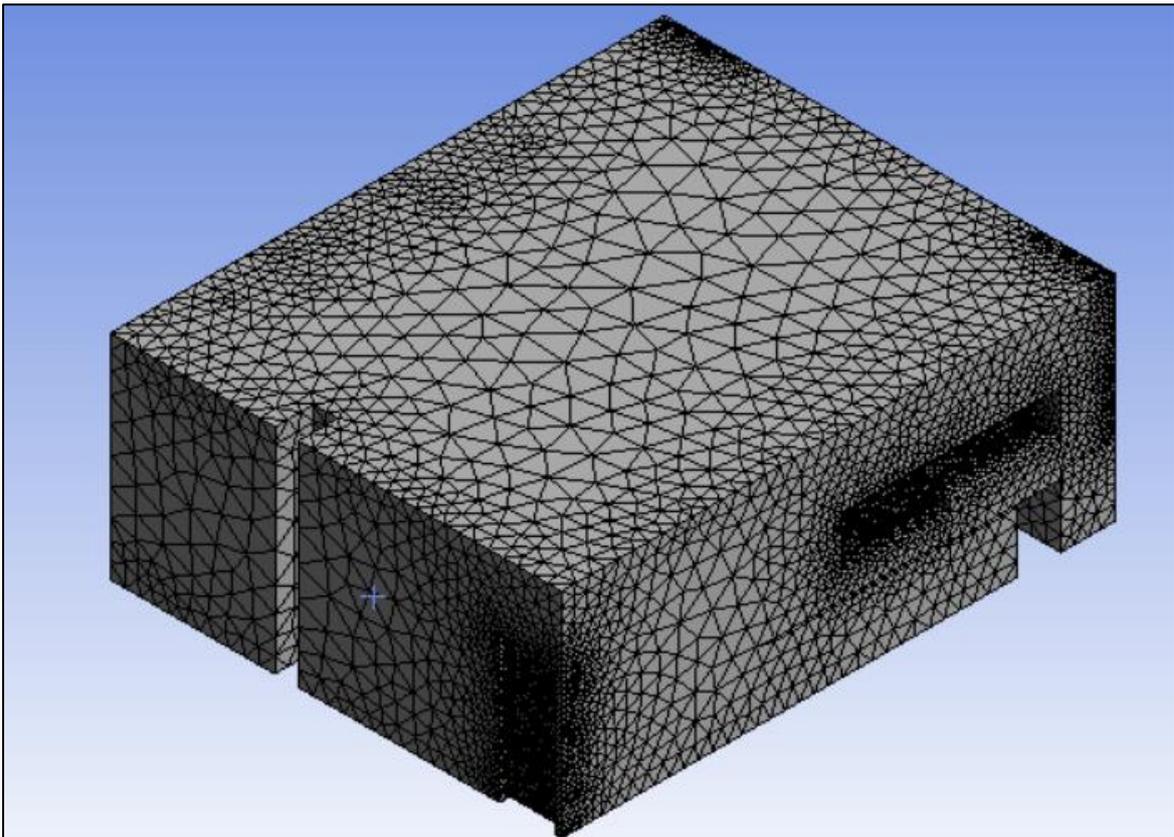


Figura 4. Vista general del mallado de nuestro modelo en la extensión *Mesh* de ANSYS

#### 4.1.3. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno de nuestro modelo vienen determinadas por las entradas y salidas de aire, y las condiciones del interior. Estas se configuran en *Fluent*.

Las entradas de aire (Fig. 5.) al modelo serán las ventanas situadas en la pared este. Las entradas serán de aire exterior y gracias a las medidas tomadas en los ensayos se podrá configurar según los parámetros de velocidad, temperatura, humedad y CO<sub>2</sub>.

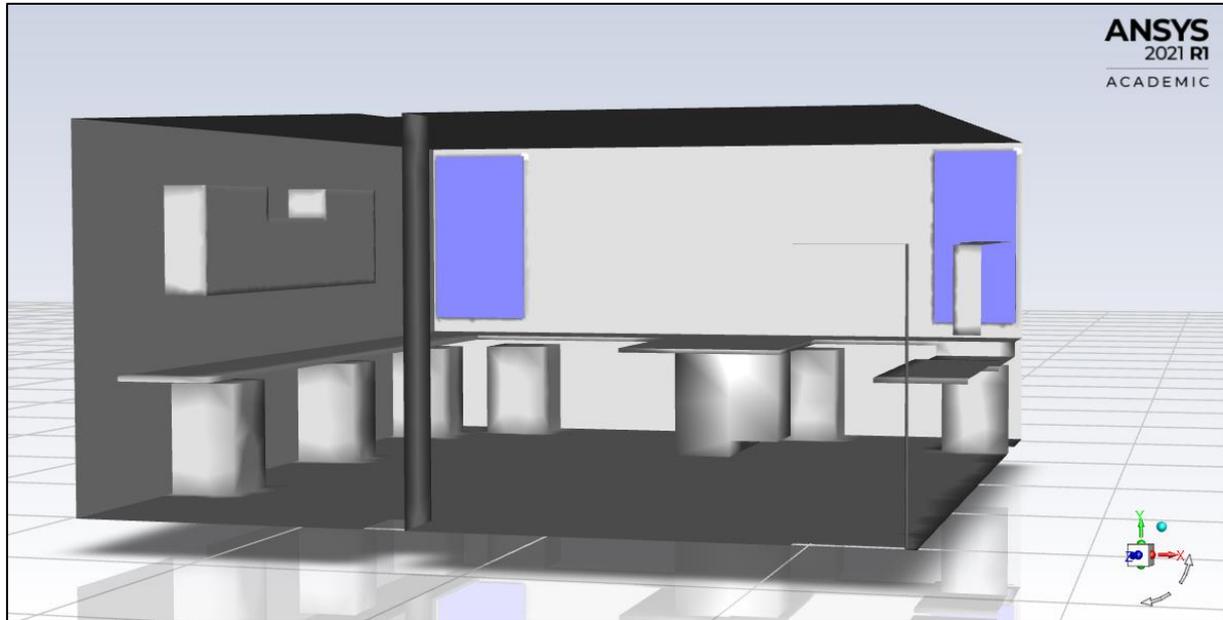


Figura 5. Mostrado en azul las entradas de aire exterior a nuestro modelo en ANSYS-FLUENT.

Una vez obtenidos experimentalmente los datos de velocidad, temperatura, humedad y concentración de CO<sub>2</sub>, se podrán introducir en el modelo en las condiciones de contorno. Una vez seleccionadas las entradas y puestas con la condición *Velocity Inlet*, los datos que se pueden incorporar directamente son la velocidad de entrada de aire y la temperatura. (Fig. 6.)

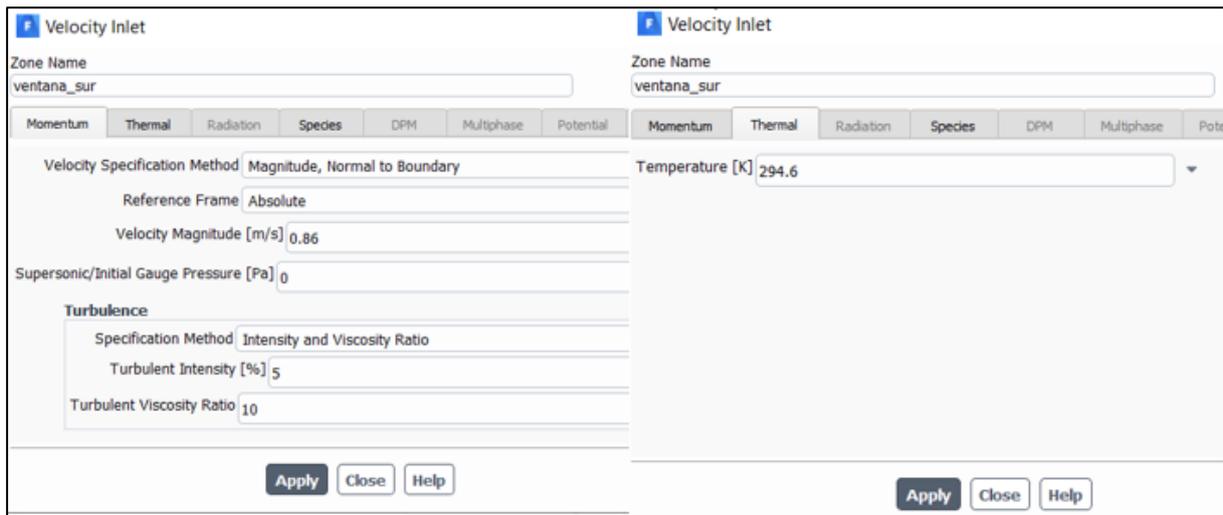


Figura 6. Ventanas de introducción de datos de datos de velocidad y temperatura con la condición de contorno *Velocity Inlet*. ANSYS-FLUENT.

Sin embargo para las condiciones de humedad y concentración de  $\text{CO}_2$  se ha de activar la pestaña *species*. Esta pestaña se habrá activado una vez se haya introducido en el modelo como fluidos el vapor de agua y el  $\text{CO}_2$ , en la pestaña *species transport*.

Con los datos de humedad se ha calculado la cantidad de vapor de agua en fracción de masa que entra desde el exterior al laboratorio.

A estos datos se añadirá la cantidad en fracción molar de  $\text{CO}_2$  proveniente del exterior.

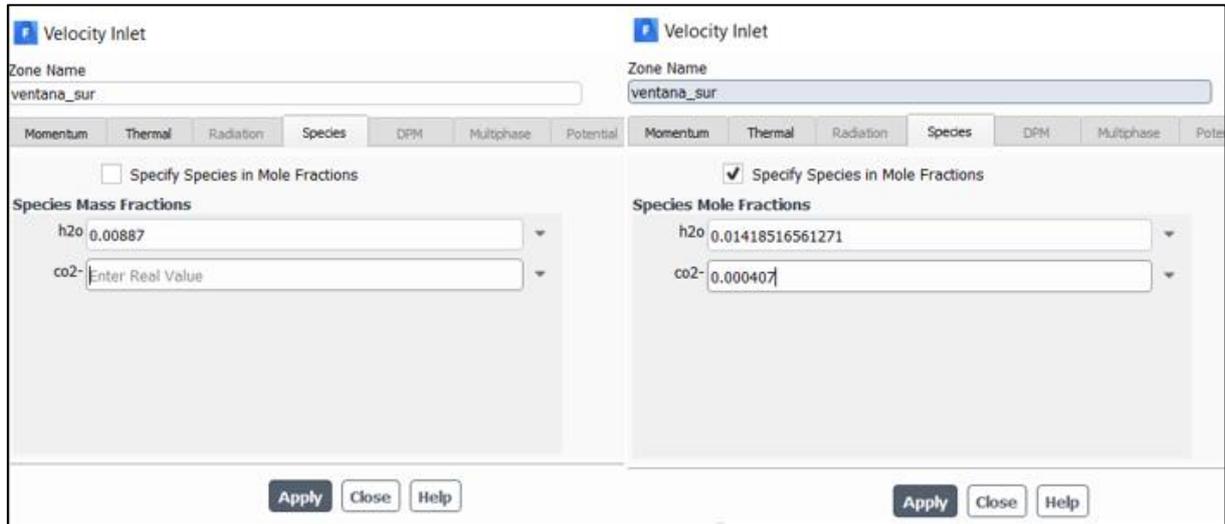


Figura 7. Ventanas de introducción de datos de fracción de masa de vapor de agua y fracción molar de  $\text{CO}_2$  con la condición de contorno *Velocity Inlet*. ANSYS-FLUENT.

La salida de aire del laboratorio se encuentra en la pared oeste como se muestra en la Fig. 8., esta salida se configura con la condición salida de caudal (*outflow*).

En la salida es donde se validarán los resultados de los ensayos realizados, obteniéndose datos de comparación con los datos medidos en esa superficie.

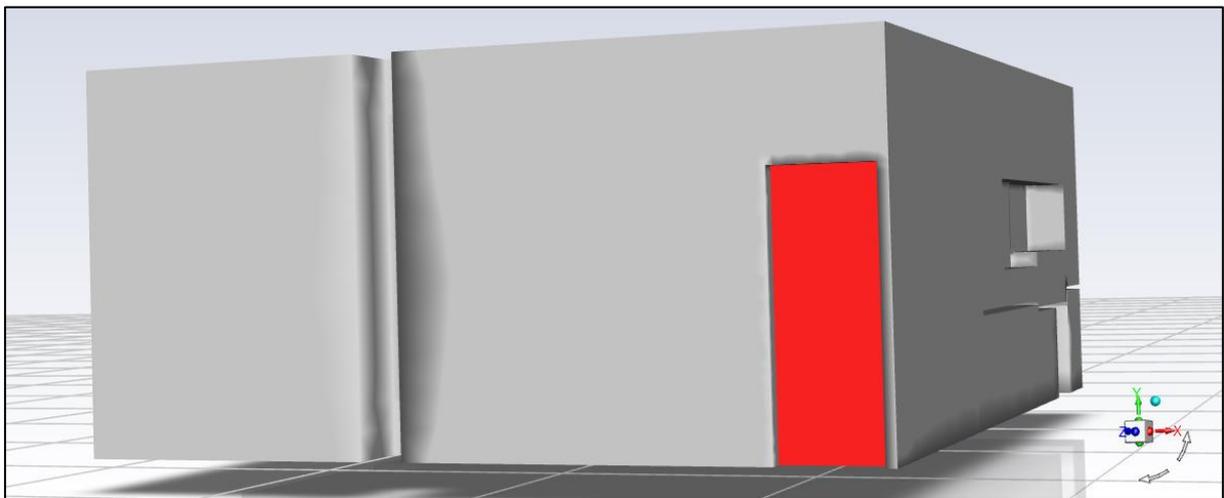


Figura 8. Salida de aire de nuestro modelo.

Las condiciones del interior vendrán dadas por la temperatura de las superficies, tomadas experimentalmente en el laboratorio con el aparato TESTO 835-T1. A las superficies previamente nombradas y seleccionadas se introducirá el dato de temperatura de cada una de ellas con la condición *wall*.

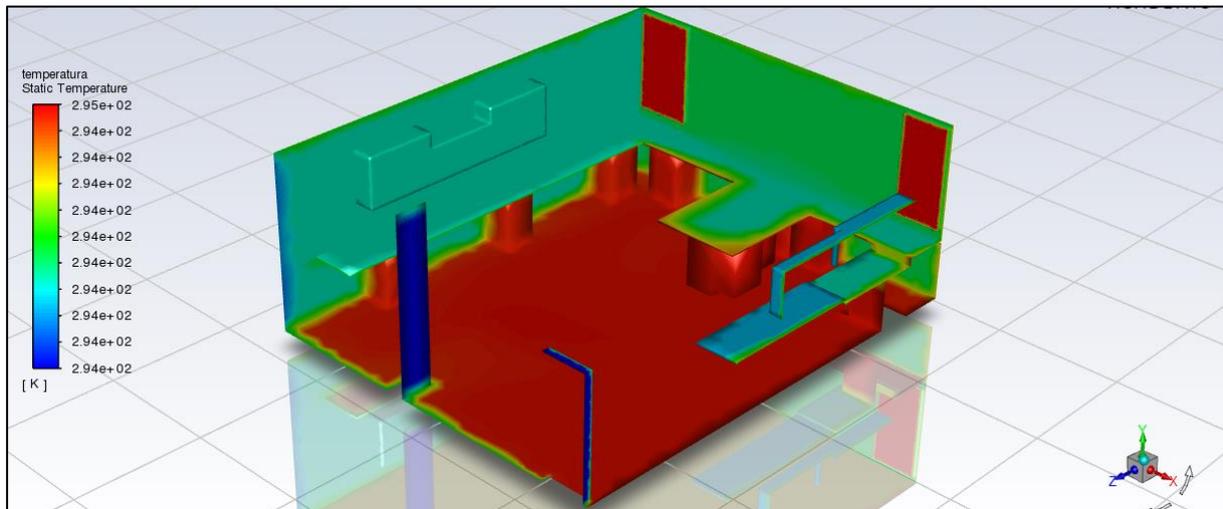


Figura 9. Distribución de las temperaturas previamente incluidas en las superficies de nuestro modelo con la condición *Wall* en ANSYS-FLUENT

También se ha de configurar el fluido que hay en el interior del modelo, además de las temperaturas de la superficie. Para ello hay que ponerlo como condición de fluido (*Fluid*). En configuración se ha de elegir *mixture-template* y a continuación *edit* para indicar que es una mezcla de vapor de agua, CO<sub>2</sub> y aire. El aire debe ir en último lugar debido a que los cálculos se iteran con los dos primeros de la selección y el restante se calcula con la diferencia en tanto por uno. Los datos a comparar son la cantidad de agua y la concentración de CO<sub>2</sub> con los datos obtenidos en los ensayos. Por lo que se justifica que estén en primer lugar (Fig. 10.).

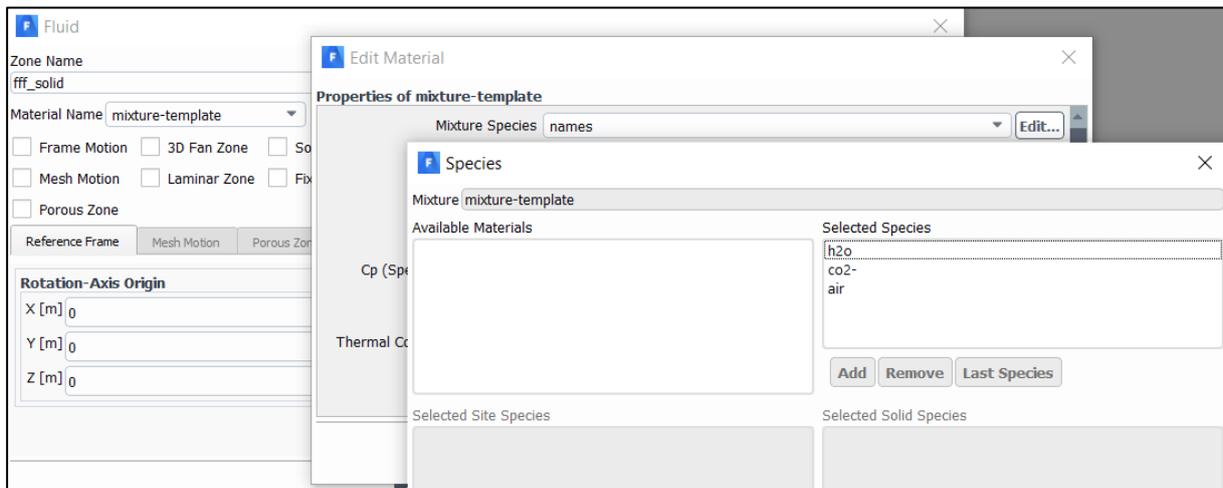


Figura 10. Configuración del interior de nuestro modelo. Ventanas de acceso hacia la selección de *species* en el orden correcto.

Para cada una de las cinco simulaciones correspondientes con los ensayos experimentales realizados en el laboratorio, se utilizaron como condiciones de contorno las mostradas en la Tabla 5.

Para la simulación realizada con climatización, se usaron como condiciones de contorno las mostradas en la Tabla 6.

**Tabla 5. Condiciones de contorno utilizadas en las simulaciones de CFD para los 5 casos analizados correspondientes a los ensayos experimentales en el laboratorio. Velocidad del aire  $v$ , temperatura del aire  $T$ , humedad absoluta  $x$  y concentración de  $\text{CO}_2$   $C$ . Temperatura de las superficies  $T_s$ , cantidad de vapor de agua y de  $\text{CO}_2$  expulsado por respiración de los ocupantes  $q_x$  y  $q_c$ , respectivamente.**

Superficie	Ventana Sur				Ventana Norte				Suelo	Techo	Pared N	Pared E	Pared S	Pared O	Encimera	Cabezas		
Condición	Flujo de entrada ( <i>Velocity inlet</i> )				Flujo de entrada o pared ( <i>Wall</i> )				Pared ( <i>Wall</i> )							Fuente ( <i>Source terms</i> )		
Ensayo	$v$ [m/s]	$T$ [°C]	$x$ [kg/kg]	$C$ [ppm]	$v$ [m/s]	$T$ [°C]	$x$ [kg/kg]	$C$ [ppm]	$T_s$ [°C]	$T_s$ [°C]	$T_s$ [°C]	$T_s$ [°C]	$T_s$ [°C]	$T_s$ [°C]	$T_s$ [°C]	$T_s$ [°C]	$q_x$ [kg/m <sup>3</sup> ·s]	$q_c$ [kg/m <sup>3</sup> ·s]
1 (07/04/2021)	0,72	21,6	0,0088	418	pared				21,6	21,3	20,8	21,0	20,9	20,6	20,9	0	0	
2 (07/04/2021)	1,40	21,6	0,0088	407	1,18	21,6	0,0088	415	21,6	21,3	20,8	21,0	20,9	20,6	20,9	0	0	
3 (13/10/2021)	0,21	23,9	0,0111	365	0,25	24,2	0,0110	365	24,2	24,5	24,5	23,6	24,3	24,4	23,9	0,001537	8,6077×10 <sup>-4</sup>	
4 (22/10/2021)	0,40	24,9	0,0110	360	0,30	24,6	0,0104	374	24,1	24,6	23,8	23,6	23,6	24,4	23,4	0,001537	8,6077×10 <sup>-4</sup>	
5 (22/10/2021)	0,17	23,0	0,0119	369	0,25	23,2	0,0122	369	24,1	24,6	23,8	23,6	23,6	24,4	23,4	0,001537	8,6077×10 <sup>-4</sup>	

**Tabla 6. Condiciones de contorno utilizadas en la simulación de CFD para el caso con sistema de climatización centralizado. Velocidad del aire  $v$ , temperatura del aire  $T$ , humedad absoluta  $x$  y concentración de  $\text{CO}_2$   $C$ . Temperatura de las superficies  $T_s$ , cantidad de vapor de agua y de  $\text{CO}_2$  expulsado por respiración de los ocupantes  $q_x$  y  $q_c$ , respectivamente.**

Superficie	Surtidor central				Ventana Sur	Ventana Norte	Suelo	Techo	Pared N	Pared E	Pared S	Pared O	Encimera	Cabezas	
Condición	Flujo de entrada ( <i>mass flow</i> )				Pared ( <i>Wall</i> )									Fuente ( <i>Source terms</i> )	
Caso	$q$ [kg/s]	$T$ [°C]	$x$ [kg/kg]	$C$ [ppm]	$T_s$ [°C]	$T_s$ [°C]	$T_s$ [°C]	$T_s$ [°C]	$T_s$ [°C]	$T_s$ [°C]	$T_s$ [°C]	$T_s$ [°C]	$T_s$ [°C]	$q_x$ [kg/m <sup>3</sup> ·s]	$q_c$ [kg/m <sup>3</sup> ·s]
Climatización central	0,6125	22,0	0,005	369	23,0	23,2	24,1	24,6	23,8	23,6	23,6	24,4	23,4	0,001537	8,6077×10 <sup>-4</sup>



## 4.2. Medidas experimentales

### 4.2.1. Características geométricas del laboratorio

El trabajo se desarrollará mediante simulaciones numéricas en CFD y mediciones directas en el laboratorio de Termotecnia 1.04 del CITE II-A de la UAL (Fig. 11 y Fig. 12).

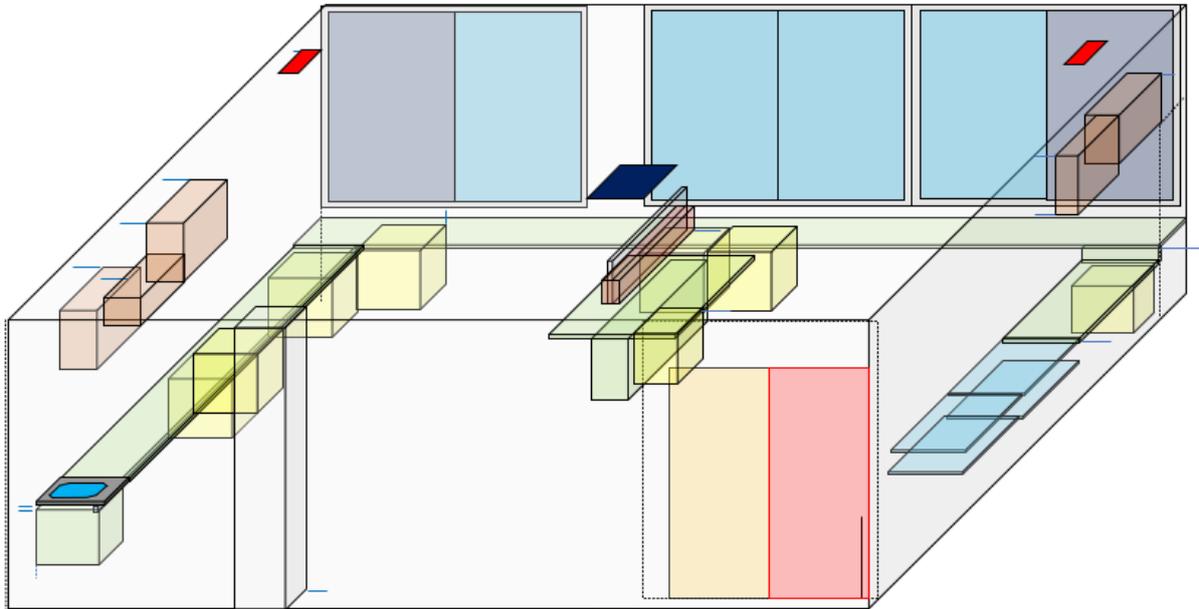


Figura 11. Modelo previo del laboratorio realizado con formas en Word, base de partida.

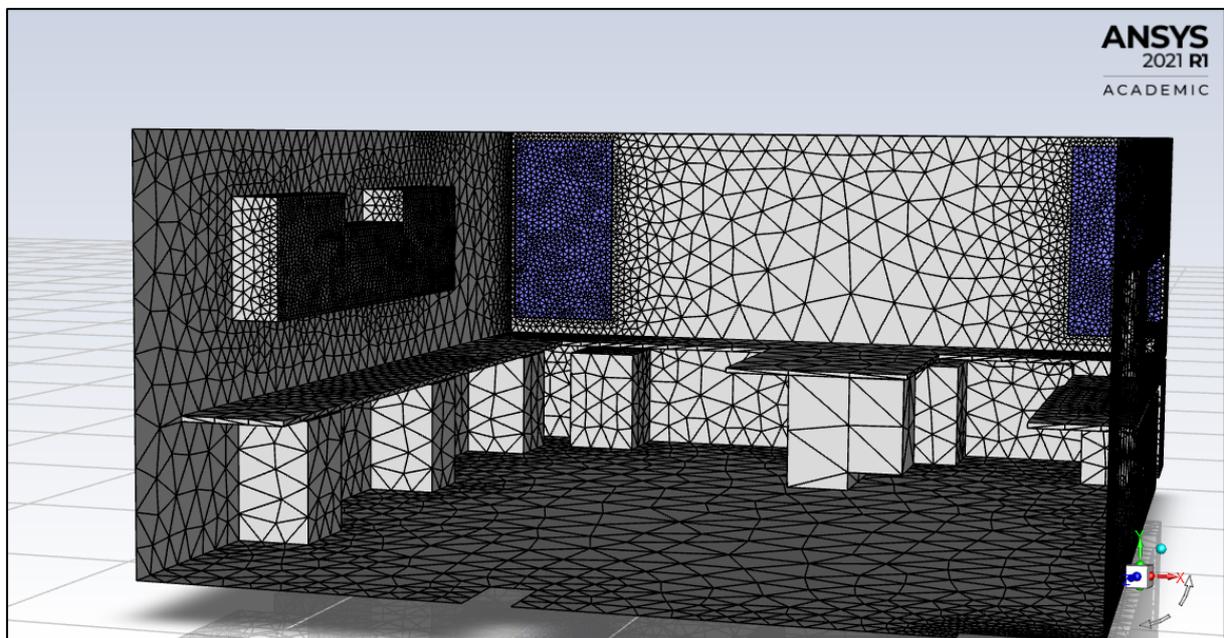


Figura 12. Laboratorio de Termotecnia 1.04 del CITE II-A de la Universidad de Almería modelado y mallado a partir del modelo previo. Realizado en ANSYS FLUENT.



Figura 13. Fotos del Laboratorio de Termotecnia 1.04 del CITE II-A de la Universidad de Almería.

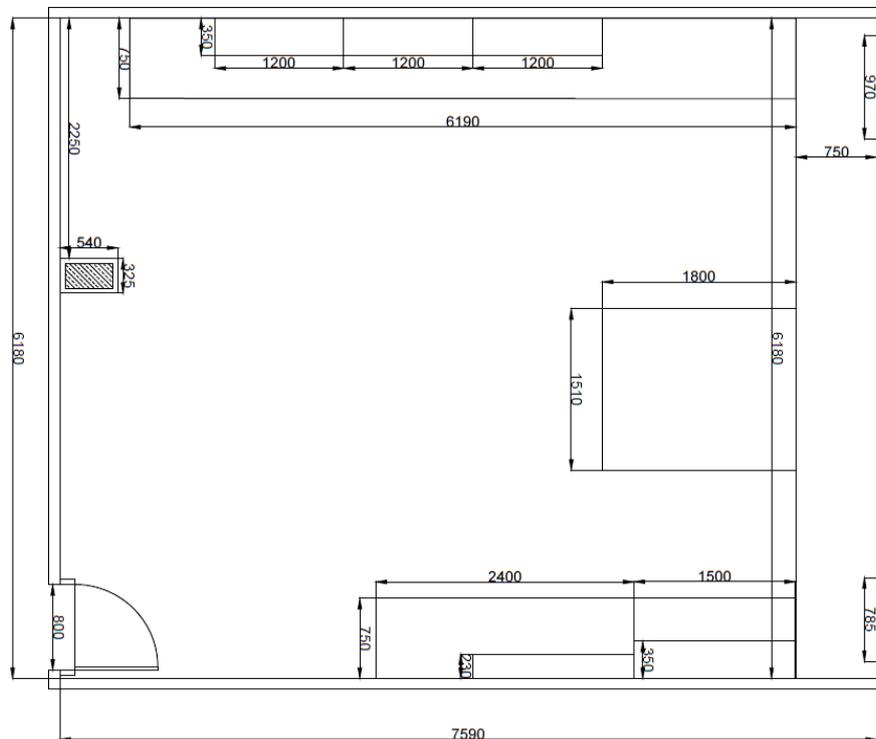


Figura 14. Plano laboratorio de termotecnia 1.04 del CITE II-A de la Universidad de Almería.

#### 4.2.2. Equipos de medida

Las medidas en el laboratorio se realizarán mediante dos anemómetros portátiles Testo 445 (2) y 440dP (6) (Instrumentos Testo S.A., Cabrils, España) con sondas de temperatura, humedad, concentración de CO<sub>2</sub> (TESTO 158 (3)) y con sondas de temperatura, humedad y velocidad del aire (TESTO 858 (4) y TESTO 560 (5)). El anemómetro (6) cuenta además con un sensor diferencial de presión que permitirá medir la diferencia de presión entre las ventanas y la puerta, por la que se origina el movimiento del aire por ventilación natural y comprobar en qué sentido va el aire y así determinar la entrada y la salida. También se dispone de un medidor de CO<sub>2</sub> Testo 535 (1) para la medida de la concentración de CO<sub>2</sub> y de un sensor de infrarrojos Testo 830-T1 (7) para la medida de las temperaturas de todas las superficies del laboratorio. Los equipos se pueden observar en la Fig. 15.

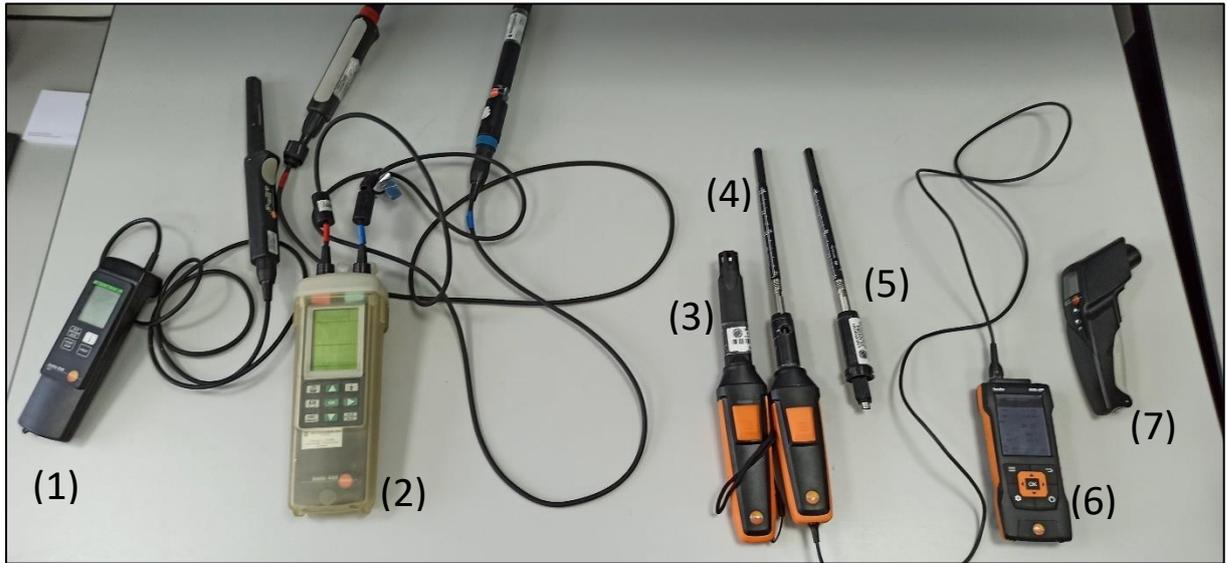


Figura 15. Equipos de medida usados en el experimento (Instrumentos de Testo S.A., Cabrils, España).

Los rangos de medidas y las tolerancias de los equipos usados en los ensayos se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Rangos de medidas de los equipos usados. Velocidad del aire, temperatura del aire, humedad relativa y concentración de CO<sub>2</sub>.

	Temperatura [°C]		Humedad relativa [%]		CO <sub>2</sub> [ppm]		Velocidad [m/s]	
	Rango	Exactitud	Rango	Exactitud	Rango	Exactitud	Rango	Exactitud
TESTO 445	-20...+70	±0,5	0...100	±2%	0...10000	±100±3%v.m.	0...10	±0,03±5%v.m.
	0...+50	±0,4	0..98	±2%	0...5000	±50±2%v.m.	0...10	±0,03±5%v.m.
TESTO 440	-20...+70	±0,8	5...95	±5%	0...10000	±100±3%v.m.	0...50	±0,05±5%v.m.
	0...+70	±0,5	35...65	±2%	0...5000	±50±3%v.m.	0...20	±0,03±4%v.m.
TESTO 535	---	---	---	---	0...9999 0.5000	±150 ±3%v.m. ±75±3%v.m.	---	---
TESTO 830-T1	-30...+400	±2 o 2%v.m.	---	---	---	---	---	---
	+0,1...+400	±1,5 o 1,5%v.m.	---	---	---	---	---	---

#### 4.2.3. Puntos de toma de datos experimentales.

Para la realización de las medidas con los equipos se han dividido las entradas y las salidas en cuadrantes, de forma que quedan 8 puntos de medida en los puntos centrales de cada cuadrante (Figura 16). Las medidas de los cuadrantes en entradas y salidas de aire del laboratorio están representadas en la Fig. 17. En la Fig. 18 se muestra la situación real de los anemómetros.

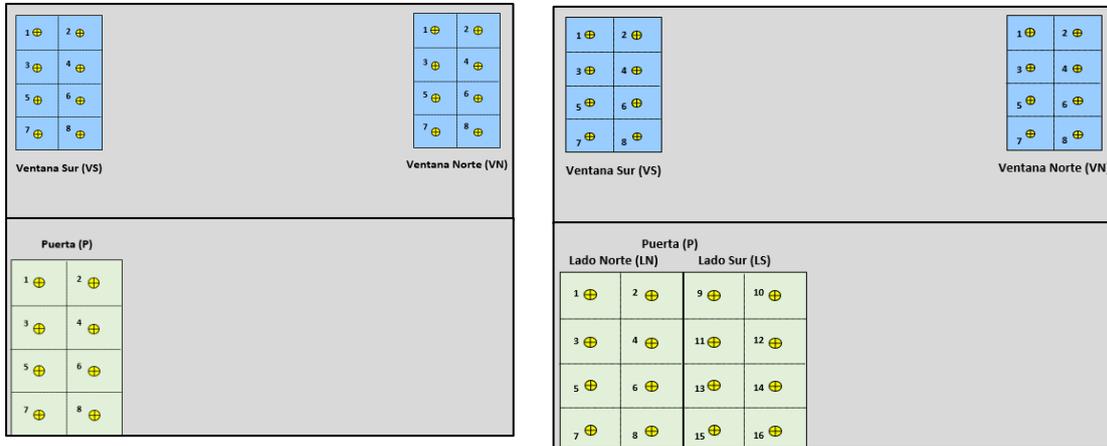


Figura 16. Puntos de medida en los ensayos realizados en laboratorio ventanas norte (VN) y sur (VS) y puertas lado norte (LN) y sur (LS).

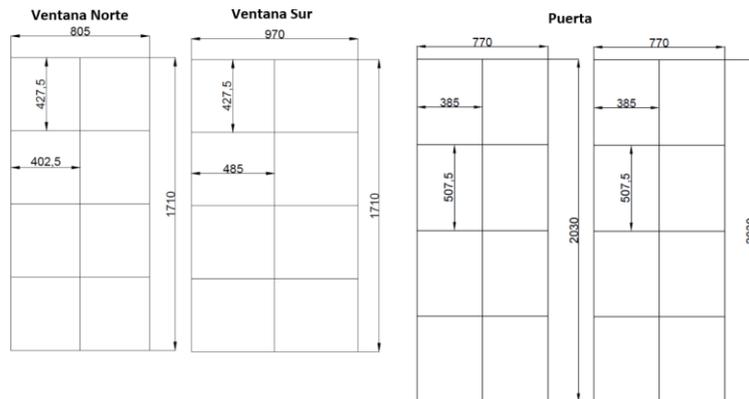


Figura 17. Medidas de puerta y ventanas y sus respectivos cuadrantes (medidas expresadas en milímetros).



Figura 18. Situación de los aparatos en los puntos definidos.

En los primeros ensayos los equipos fueron puestos en los puntos de medida manualmente por el director y el autor de este trabajo. Las medidas también se tomaron a mano en intervalos de dos minutos y anotando el valor que tomaba al estabilizarse.



Figura 19. Instrumentos de medida Testo 440dP y Testo 445 situándose para las mediciones en los cuadrantes de las ventanas y puerta.

En los ensayos posteriores, se usaron soportes hechos a mano con el fin de no interferir en las medidas. Además, permitía la movilidad para crear emisiones en puntos situados dentro de la estancia, acercándose más a un caso real dentro del laboratorio (Fig.19).



Figura 20. Instrumentos de medida: Testo 445 y Testo 440 con diferentes sondas usados en las mediciones de los cuadrantes de la puerta y las ventanas.

### **4.3. Configuraciones de los casos**

#### **Ensayo 1**

En el ensayo realizado el día 07/04/2021 se optó por el caso más sencillo, con una entrada y una salida, que fueron la ventana del lado sur y la puerta del lado norte favoreciendo el movimiento del aire. Sin emisores en el interior e influyendo lo menos posible en las mediciones. Con este ensayo se quería demostrar que la entrada del aire provenía del exterior del edificio y la salida era la puerta del laboratorio, lo que hacía favorable la ventilación natural cruzada.

#### **Ensayo 2**

Durante el ensayo llevado a cabo el día 07/04/2021 se optó por dos entradas de aire y una salida y sin emisores en el interior. Lo que conllevó un aumento de velocidad con respecto al caso anterior, por tanto, una mayor ventilación.

#### **Ensayo 3**

Para el ensayo realizado el día 13/10/2021 se optó por la misma configuración igual que en el caso 2, añadiendo tres emisores dentro de la estancia. Esto hizo que los niveles de CO<sub>2</sub> y humedad relativa resultantes aumentaran.

#### **Ensayo 4**

El ensayo efectuado el día 22/10/2021 se abrió el otro lado de la puerta, por lo que había dos entradas de aire y se incrementó la superficie de salida. Se hizo con tres emisores dentro del laboratorio.

#### **Ensayo 5**

En el último ensayo realizado el día 22/10/2021 se configuró con las mismas condiciones del ensayo 4.

**Tabla 8. Configuraciones de los ensayos realizados en el laboratorio.**

	<b>Ensayo 1 (07/04/2021)</b>	<b>Ensayo 2 (07/04/2021)</b>	<b>Ensayo 3 (13/10/2021)</b>	<b>Ensayo 4 (22/10/2021)</b>	<b>Ensayo 5 (22/10/2021)</b>
<b>Puerta lado sur</b>	Cerrado	Cerrado	Cerrado	Abierto	Abierto
<b>Puerta lado norte</b>	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto
<b>Ventana norte</b>	Cerrada	Abierta	Abierta	Abierta	Abierta
<b>Ventana sur</b>	Abierta	Abierta	Abierta	Abierta	Abierta
<b>Emisores</b>	0	0	3	3	3

## 5. Resultados y discusión

### 5.1. Medidas de flujo de aire con ventilación natural

#### 5.1.1. Mediciones Ensayo 1

Ensayo desarrollado el día 7 de abril del 2021, medidas realizadas con la configuración del caso 1: ventana sur abierta y puerta abierta. En la ventana se situaron los aparatos TESTO 440dP y TESTO 535, fueron tomados a mano y sujetados por el director. En la puerta se usó el aparato TESTO 445, fueron tomados a mano y sujetado por el autor. Las mediciones fueron realizadas de forma simultánea en los mismos cuadrantes.

Tabla 9. Medidas experimentales realizadas el día 07/04/2021 en la ventana sur y la puerta. Velocidad del aire  $v$ , temperatura del aire  $T$ , humedad relativa  $HR$ , humedad absoluta  $x$  y concentración de  $CO_2$   $C$ .

Lugar	Ventana sur					Puerta				
Equipo	TESTO 440dP		TESTO 535			TESTO 445				
Punto	$v$ [m/s]	$T$ [°C]	$HR$ [%]	$x$ [kg/kg]	$C$ [ppm]	$v$ [m/s]	$T$ [°C]	$HR$ [%]	$x$ [kg/kg]	$C$ [ppm]
1	0,20	21,3	55,7	0,0088	408	0,34	21,5	55,2	0,0088	435
2	0,38	21,6	54,6	0,0088	398	0,37	21,5	55,1	0,0088	430
3	0,76	21,6	54,9	0,0088	414	0,56	21,5	55,1	0,0088	421
4	0,74	21,6	55,0	0,0088	430	0,71	21,4	55,2	0,0088	423
5	0,48	21,7	54,5	0,0088	432	0,73	21,3	55,4	0,0088	448
6	1,29	21,6	54,7	0,0088	424	0,77	21,7	54,9	0,0088	444
7	1,37	21,6	54,6	0,0088	419	1,63	21,4	55,4	0,0088	412
8	0,51	21,4	55,0	0,0088	421	1,74	21,5	55,2	0,0088	397
<b>Promedio</b>	<b>0,72</b>	<b>21,6</b>	<b>54,9</b>	<b>0,0088</b>	<b>418</b>	<b>0,86</b>	<b>21,5</b>	<b>55,2</b>	<b>0,0088</b>	<b>426</b>

La velocidad del aire varió debido a que las superficies de entrada y salida no son iguales.

La temperatura cambió debido a la temperatura interior del laboratorio y de las superficies, aunque su variación solo fue de medio grado centígrado, por lo que no fue muy significativo.

La humedad se mantuvo, ya que no había emisores dentro de la estancia ni nada que pudiera hacer modificar esta concentración. Por otra parte, la humedad relativa varió un poco debido al cambio de temperatura referido anteriormente.

El  $CO_2$ , aunque varió un poco no debería haberlo hecho, si bien, este cambio se puede explicar por haberse realizado la toma de datos de forma manual y sin soportes.

El caudal entrante al laboratorio proveniente del exterior a través de la ventana sur es:

$$Q_{vs} = 1,188 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

El caudal saliente del laboratorio por la puerta es:

$$Q_p = 1,338 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

Por lo que la variación de caudal es de 11,2 [%]

El caudal de entrada y de salida debería ser el mismo, el aire que entra a la estancia debe ser el mismo que el que sale de la estancia, aunque la variación de este caudal se justifica por la existencia de rejillas del sistema de climatización y la precisión de los aparatos. La aproximación en el cálculo de caudales a través de la velocidad medida puede añadirse a esta justificación.

### 5.1.2. Mediciones Ensayo 2

Ensayo desarrollado el día 7 de abril de 2021. Medidas realizadas con la configuración del caso dos: puerta abierta y ventanas norte y sur abiertas. En las ventanas se situaron los equipos TESTO 440dP y TESTO 535, sujetados por el director y los datos se tomaron a mano en intervalos de dos minutos. En la puerta se usó el equipo TESTO 445, con el mismo procedimiento que en la ventana, pero por parte del autor. Las mediciones fueron realizadas de forma simultánea en los mismos cuadrantes.

Tabla 10. Medidas experimentales realizadas el día 07/04/2021 en la ventana sur y en la puerta. Velocidad del aire  $v$ , temperatura del aire  $T$ , humedad relativa  $HR$ , humedad absoluta  $x$  y concentración de  $CO_2$   $C$ .

Lugar	Ventana sur					Puerta				
Equipo	TESTO 440dP		TESTO 535			TESTO 445				
Punto	$v$ [m/s]	$T$ [°C]	$HR$ [%]	$x$ [kg/kg]	$C$ [ppm]	$v$ [m/s]	$T$ [°C]	$HR$ [%]	$x$ [kg/kg]	$C$ [ppm]
1	1,26	21,3	55,7	0,0088	406	2,37	21,6	52,1	0,0084	383
2	1,32	21,6	54,6	0,0088	406	2,01	21,4	52,0	0,0088	389
3	1,19	21,6	54,9	0,0088	406	2,14	21,6	52,0	0,0088	396
4	1,78	21,6	55,0	0,0088	406	2,72	21,6	51,8	0,0088	401
5	1,81	21,7	54,5	0,0088	404	2,40	21,7	51,2	0,0088	410
6	1,04	21,6	54,7	0,0088	407	1,41	21,8	51,0	0,0088	418
7	1,48	21,6	54,6	0,0088	410	1,58	21,8	50,9	0,0088	408
8	1,31	21,4	55,0	0,0088	409	2,50	21,8	50,8	0,0088	397
Promedio	1,40	21,6	54,9	0,0088	407	2,14	21,7	51,5	0,0088	400

Tabla 11. Medidas experimentales realizadas el día 07/04/2021 en la ventana sur y la puerta. Velocidad del aire  $v$ , temperatura del aire  $T$ , humedad relativa  $HR$ , humedad absoluta  $x$  y concentración de  $CO_2$   $C$ .

Lugar	Ventana Norte					Puerta				
Equipo	TESTO 440dP		TESTO 535			Testo 445				
Punto	$v$ [m/s]	$T$ [°C]	$HR$ [%]	$x$ [kg/kg]	$C$ [ppm]	$v$ [m/s]	$T$ [°C]	$HR$ [%]	$x$ [kg/kg]	$C$ [ppm]
1	1,29	21,3	55,7	0,0088	416	1,84	21,8	50,5	0,0082	399
2	1,18	21,6	54,6	0,0088	410	1,11	21,7	50,6	0,0088	406
3	1,55	21,6	54,9	0,0088	416	2,18	21,8	50,4	0,0088	403
4	1,61	21,6	55,0	0,0088	419	1,83	21,7	50,3	0,0088	397
5	0,53	21,7	54,5	0,0088	409	2,60	21,8	50,3	0,0088	410
6	1,09	21,6	54,7	0,0088	412	1,02	22,0	49,9	0,0088	408
7	1,37	21,6	54,6	0,0088	421	1,48	22,0	50,0	0,0088	421
8	0,78	21,4	55,0	0,0088	414	3,65	21,8	50,4	0,0088	396
Promedio	1,18	21,6	54,9	0,0088	415	1,96	21,8	50,3	0,0087	405

En este ensayo, los resultados obtenidos son parecidos a los del ensayo anterior.

Con respecto a la velocidad, aumentó. La velocidad media de las dos entradas es bastante inferior a la de salida. Esto se debe además del aumento del área de entrada, a la turbulencia generada por la mezcla de las dos entradas.

En cuanto a la temperatura, varió, debido a la presencia de los participantes dentro del laboratorio durante el análisis de datos, que hizo aumentar la temperatura de la estancia.

La humedad absoluta y la concentración de CO<sub>2</sub> se mantuvieron constantes.

En esta ocasión el caudal de entrada y el de salida tuvo una variación importante. Hubo una disminución de caudal del 22,7 %.

El caudal entrante al laboratorio proveniente del exterior a través de la ventana sur es:

$$Q_{VS} = 2,320 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

El caudal entrante al laboratorio proveniente del exterior a través de la ventana norte es:

$$Q_{VN} = 1,617 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

El caudal saliente del laboratorio por la puerta es:

$$Q_P = 3,208 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

Por lo que la variación de caudal es de 22,7 [%]

### 5.1.3. Mediciones Ensayo 3

Ensayo desarrollado el día 13 de octubre de 2021. Medidas realizadas con la configuración del caso 3: ventana norte, ventana sur y puerta abierta. En las ventanas se situaron los aparatos TESTO 445 y fueron tomados por el ordenador en intervalos de dos minutos y sujetas por los soportes mostrados en la Fig. 19. En la puerta se usó el aparato TESTO 440dP con dos sondas TESTO 858 y TESTO 158 que tienen como medidas comunes temperatura, humedad y la primera mide velocidad y la segunda CO<sub>2</sub> y fueron tomados por el ordenador en intervalos de dos minutos y sujetados por los soportes de la Fig. 19. Las mediciones fueron realizadas de forma simultánea en los mismos cuadrantes.

Los datos obtenidos están representados en la Figuras 21, 22, 23, 24 y 25 que se muestran a continuación. Y una vez recogidos y tratados, las tablas 12 y 13 muestran la situación de cada punto de medida.

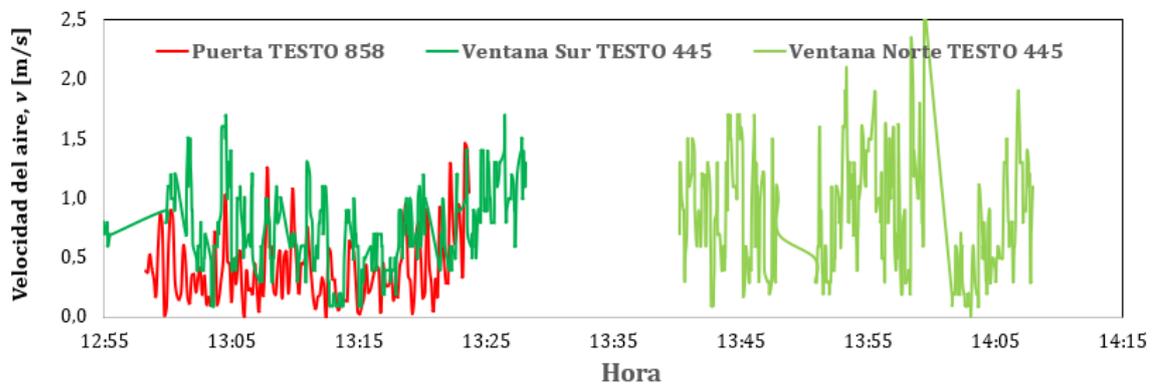


Figura 21. Velocidad del aire v [m/s].

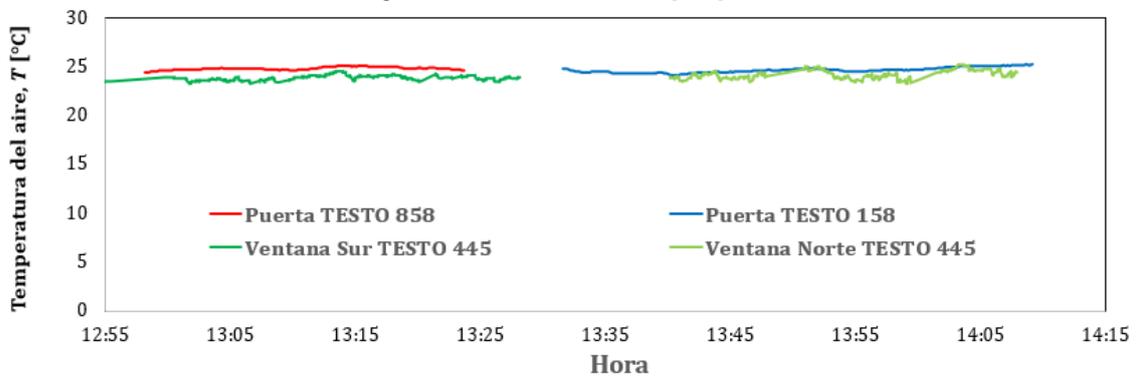


Figura 22. Temperatura del aire T [°C].

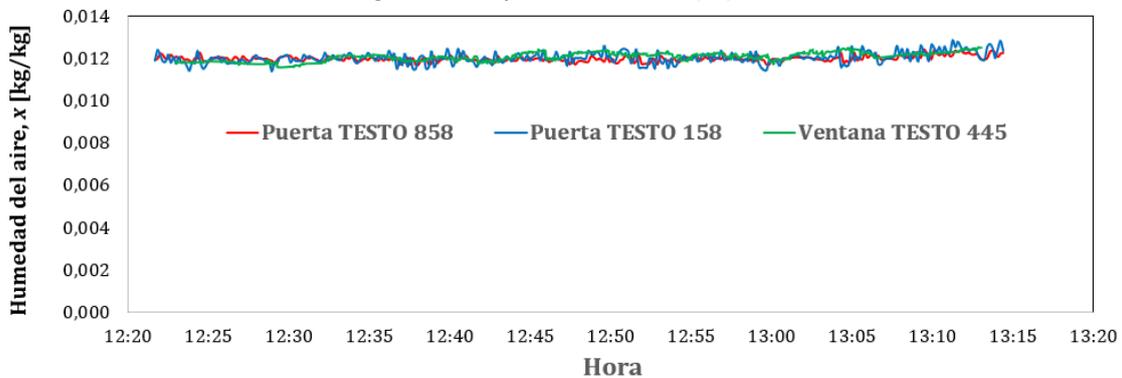


Figura 23. Humedad absoluta del aire x [kg/kg].

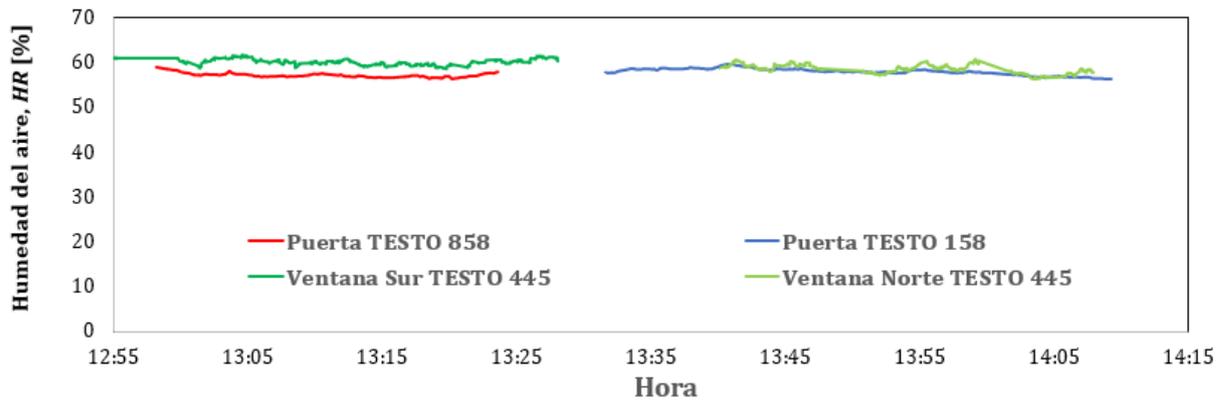


Figura 24. Humedad del aire. HR [%].

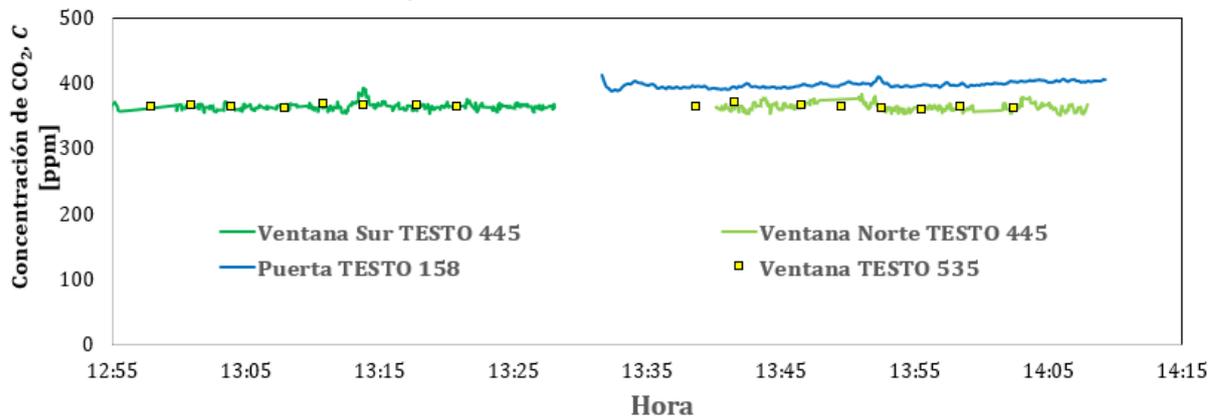


Figura 25. Concentración de CO<sub>2</sub> C [ppm].

Los resultados obtenidos durante el ensayo se pueden observar en las tablas que vienen a continuación.

Tabla 12. Medidas experimentales realizadas el día 13/10/2021 en la ventana sur y en la puerta. Velocidad del aire  $v$ , temperatura del aire  $T$ , humedad relativa  $HR$ , humedad absoluta  $x$  y concentración de CO<sub>2</sub> C.

Lugar	Ventana sur						Puerta			
	TESTO 445			TESTO 535			SONDA TESTO 858			
Punto	$v$ [m/s]	$T$ [°C]	$HR$ [%]	$x$ [kg/kg]	$C$ [ppm]	$C$ [ppm]	$v$ [m/s]	$T$ [°C]	$HR$ [%]	$x$ [kg/kg]
1	0,31	23,7	59,8	0,0109	363	365	0,41	24,5	58,6	0,0113
2	0,28	23,6	61,2	0,0112	362	367	0,32	24,7	57,3	0,0111
3	0,17	24,0	60,0	0,0112	362	362	0,47	24,7	57,0	0,0111
4	0,21	23,5	60,1	0,0109	363	364	0,42	24,8	57,3	0,0112
5	0,11	24,3	59,5	0,0113	375	370	0,33	24,8	57,1	0,0112
6	0,14	24,0	59,5	0,0111	363	368	0,28	25,1	56,6	0,0113
7	0,24	24,0	60,2	0,0112	363	364	0,58	24,8	57,0	0,0112
8	0,23	23,8	59,3	0,0109	367	368	0,46	24,9	56,7	0,0111
<b>Promedio</b>	<b>0,21</b>	<b>23,9</b>	<b>59,9</b>	<b>0,0111</b>	<b>365</b>	<b>366</b>	<b>0,41</b>	<b>24,8</b>	<b>57,2</b>	<b>0,0112</b>

**Tabla 13. Medidas experimentales realizadas el día 13/10/2021 en la ventana norte y en la puerta. Velocidad del aire  $v$ , temperatura del aire  $T$ , humedad relativa  $HR$ , humedad absoluta  $x$  y concentración de  $CO_2$   $C$ .**

Lugar	Ventana norte					Puerta				
Equipo	TESTO 445				TESTO 535	SONDA TESTO 158				
Punto	$v$ [m/s]	$T$ [°C]	$HR$ [%]	$x$ [kg/kg]	$C$ [ppm]	$C$ [ppm]	$T$ [°C]	$HR$ [%]	$x$ [kg/kg]	$C$ [ppm]
1	0,29	23,9	59,5	0,0110	362	364	24,3	58,9	0,0112	394
2	0,34	23,9	58,8	0,0109	368	371	24,4	58,9	0,0112	396
3	0,25	24,5	57,7	0,0111	364	364	24,8	57,9	0,0113	400
4	0,16	24,8	57,5	0,0112	370	367	24,6	58,1	0,0112	399
5	0,33	23,8	59,3	0,0109	362	362	24,6	57,8	0,0112	397
6	0,29	23,8	59,2	0,0109	363	360	24,6	58,0	0,0112	398
7	0,20	24,5	56,9	0,0109	361	363	25,0	57,1	0,0113	402
8	0,11	24,5	57,7	0,0111	361	365	24,7	57,8	0,0112	398
<b>Promedio</b>	<b>0,25</b>	<b>24,2</b>	<b>58,3</b>	<b>0,0110</b>	<b>364</b>	<b>365</b>	<b>24,6</b>	<b>58,1</b>	<b>0,0112</b>	<b>398</b>

El día del ensayo 3 hizo menos viento lo que justifica los valores en la toma de datos.

La velocidad en las entradas y la salida no cambió apenas.

Este día hizo bastante más calor que en el ensayo realizado en abril por lo que las temperaturas eran más altas. La temperatura entre las entradas y las salidas varió poco.

Lo que se vio atípico son los niveles de  $CO_2$ , que se encontraban por debajo de 400. Pero lo que se quería demostrar es la intervención de los tres emisores dentro de la estancia y cómo la concentración de  $CO_2$  aumenta. Con los resultados obtenidos se puede ver cómo afectan los tres emisores correspondientes al interior de la estancia a la variación de la humedad absoluta.

La variación de caudal fue bastante menor que cuando el viento lleva una velocidad más alta, esto conllevó a una variación del 8,5 %. Además, la velocidad se mantuvo constante en las entradas y la salida.

El caudal entrante al laboratorio proveniente del exterior a través de la ventana sur es:

$$Q_{Vs} = 0,352 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

El caudal entrante al laboratorio proveniente del exterior a través de la ventana norte es:

$$Q_{VN} = 0,339 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

El caudal saliente del laboratorio por la puerta es:

$$Q_P = 0,637 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

Por lo que la variación de caudal es de 8,5 [%]

#### 5.1.4. Mediciones Ensayo 4

Desarrollado el día 22 de octubre de 2021. Medidas realizadas con la configuración del caso 3: ventanas norte y sur abiertas, puerta abierta por el lado norte y por el lado sur. Las mediciones fueron realizadas de forma simultánea en los mismos cuadrantes con soportes para los anemómetros y datos recogidos por el ordenador. En las ventanas se midió con los equipos TESTO 445, sonda TESTO 560 y TESTO 535 y en la puerta con sonda TESTO 858.

Los datos obtenidos están representados en las figuras 26, 27, 28, 29 y 30 que se muestran a continuación. Y una vez recogidos y tratados, las tablas 14 y 15 muestran la situación de cada punto de medida.

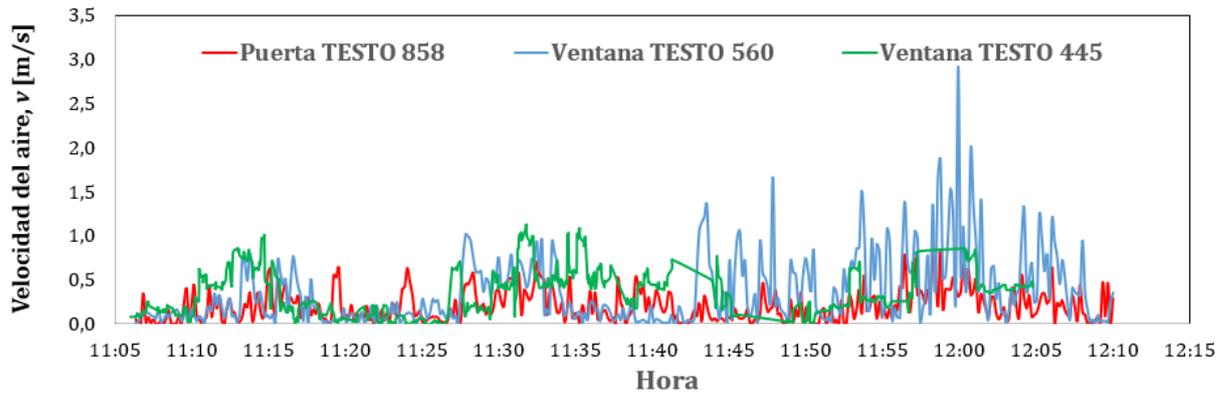


Figura 26. Velocidad del aire  $v$  [m/s].

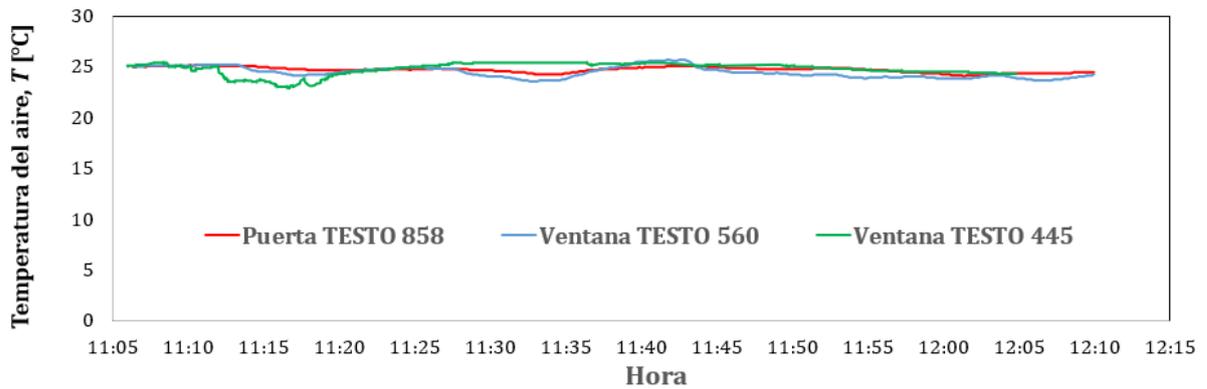


Figura 27. Temperatura del aire  $T$  [°C].

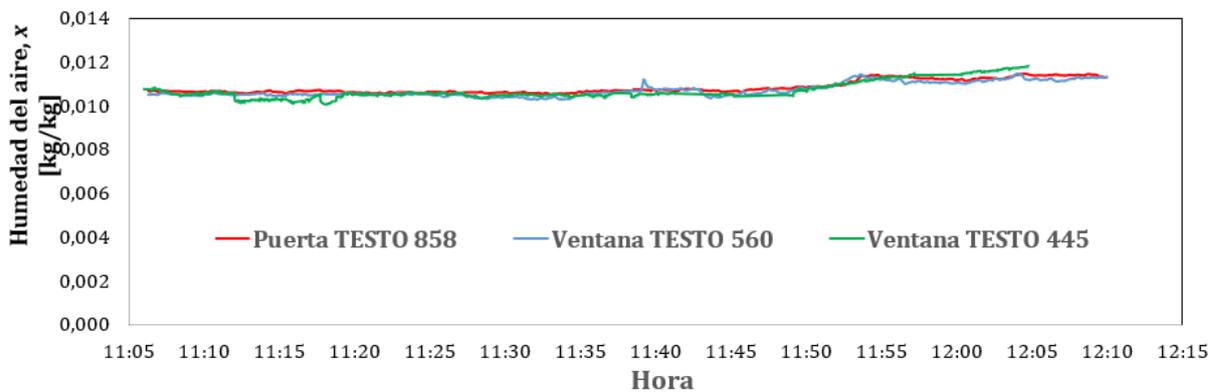


Figura 28. Humedad del aire  $x$  [kg/kg].

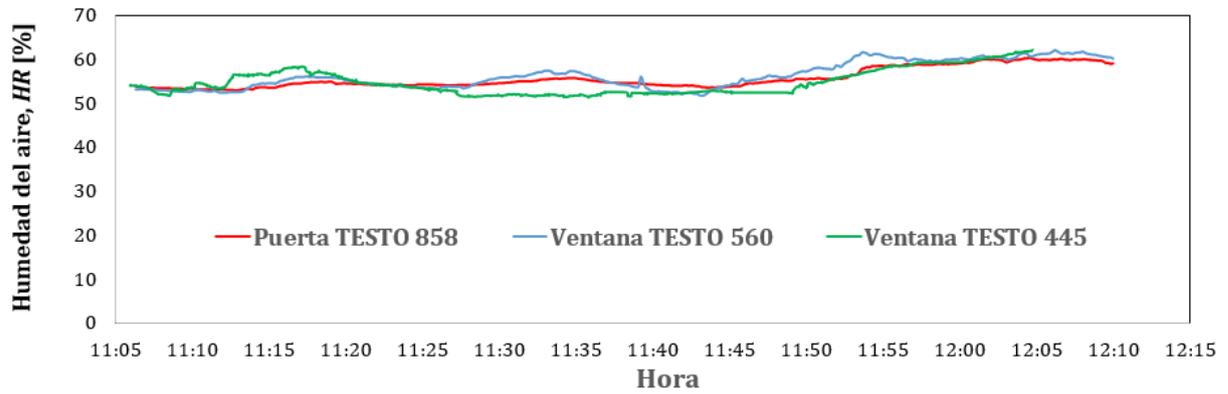


Figura 29. Humedad del aire HR [%].

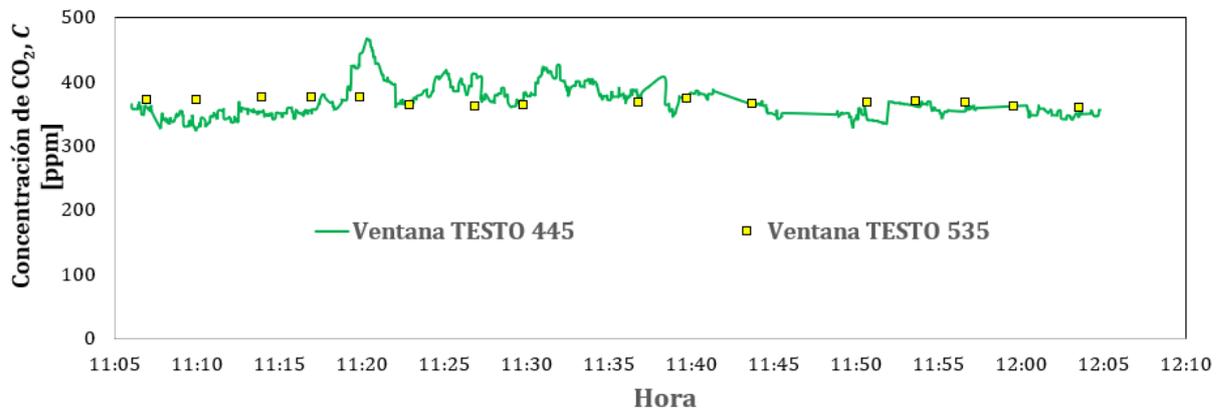


Figura 30. Concentración de CO<sub>2</sub> C [ppm].

Los resultados obtenidos durante el ensayo se pueden observar en las tablas que vienen a continuación.

Tabla 14. Medidas experimentales realizadas el día 22/10/2021 en la ventana sur y en lado norte de la puerta. Velocidad del aire  $v$ , temperatura del aire  $T$ , humedad relativa  $HR$ , humedad absoluta  $x$  y concentración de CO<sub>2</sub>  $C$ .

Lugar	Ventana sur										Puerta lado norte			
	TESTO 445					TESTO 560					TESTO 535	TESTO 858		
Punto	$v$ [m/s]	$T$ [°C]	$HR$ [%]	$x$ [kg/kg]	$C$ [ppm]	$v$ [m/s]	$T$ [°C]	$HR$ [%]	$x$ [kg/kg]	$C$ [ppm]	$v$ [m/s]	$T$ [°C]	$HR$ [%]	$x$ [kg/kg]
1	0,41	25,3	52,1	0,0105	376,1	0,12	24,7	54,4	0,0106	368	0,16	24,7	54,7	0,0105
2	0,49	25,4	52,0	0,0105	379,6	0,04	25,5	52,6	0,0108	375	0,19	25,1	53,2	0,0105
3	0,17	24,9	55,1	0,0109	345,8	0,18	24,1	58,0	0,0109	369	0,16	24,7	54,7	0,0105
4	0,33	25,2	52,5	0,0105	356,8	0,41	24,7	53,7	0,0104	367	0,26	25,0	53,6	0,0105
5	0,28	24,7	57,5	0,0112	357,4	0,69	23,8	60,9	0,0113	370	0,10	24,7	54,4	0,0105
6	0,41	24,6	58,8	0,0114	357,8	0,58	23,9	59,6	0,0111	368	0,26	24,7	54,1	0,0105
7	0,43	24,3	61,6	0,0117	351,4	0,62	23,9	60,8	0,0113	360	0,40	24,6	54,7	0,0104
8	0,71	24,5	59,7	0,0115	353,8	1,09	23,8	60,1	0,0111	363	0,28	24,7	54,1	0,0104
Promedio	0,40	24,9	56,2	0,0110	360	0,47	24,4	57,5	0,0109	368	0,16	24,8	54,2	0,0105

**Tabla 15. Medidas experimentales realizadas el día 22/10/2021 en la ventana norte y en el lado sur de la puerta. Velocidad del aire  $v$ , temperatura del aire  $T$ , humedad relativa  $HR$ , humedad absoluta  $x$  y concentración de  $CO_2$   $C$ .**

Lugar	Ventana norte										Puerta lado sur				
Equipo	TESTO 445					TESTO 560					TESTO 535	TESTO 858			
Punto	$v$ [m/s]	$T$ [°C]	$HR$ [%]	$x$ [kg/kg]	$C$ [ppm]	$v$ [m/s]	$T$ [°C]	$HR$ [%]	$x$ [kg/kg]	$C$ [ppm]	$v$ [m/s]	$T$ [°C]	$HR$ [%]	$x$ [kg/kg]	
1	0,17	25,3	52,4	0,0105	344,7	0,09	25,1	52,9	0,0105	373	0,13	24,8	54,7	0,0106	
2	0,40	24,9	53,9	0,0106	340,8	0,15	25,2	52,8	0,0105	372	0,22	25,0	54,2	0,0108	
3	0,17	23,3	57,3	0,0102	364,0	0,19	24,2	55,9	0,0105	376	0,07	24,9	55,6	0,0109	
4	0,56	23,5	56,7	0,0102	348,9	0,27	24,6	54,4	0,0105	376	0,07	25,0	53,8	0,0104	
5	0,09	24,5	54,7	0,0105	428,8	0,08	24,5	54,7	0,0105	376	0,20	24,8	58,2	0,0113	
6	0,04	24,8	53,7	0,0105	383,1	0,10	24,8	53,8	0,0105	365	0,41	24,5	58,6	0,0111	
7	0,57	25,4	51,7	0,0105	399,1	0,58	23,9	55,9	0,0104	365	0,24	24,4	59,8	0,0113	
8	0,41	25,3	51,8	0,0104	381,4	0,52	24,6	53,8	0,0104	362	0,41	24,3	59,1	0,0111	
Promedio	0,30	24,6	54,0	0,0104	374	0,25	24,6	54,3	0,0105	371	0,22	24,7	56,7	0,0109	

Durante el último día de mediciones el viento era bastante tenue, pero los resultados obtenidos son también de interés ya que comprobamos que las condiciones exteriores son lo que más afectan a la forma de ventilar mediante la ventilación natural.

Las mediciones de la velocidad del aire son mayores en las ventanas que en la puerta, esto es debido a que ese día al abrir el lado sur de la puerta, la superficie de salida aumentó al doble.

La temperatura se debe a la hora y a que el aire acondicionado no funciona, por lo que la estancia se encontraba bastante caldeada.

El caudal entrante al laboratorio proveniente del exterior a través de la ventana sur es:

$$Q_{Vs} = 0,77 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

El caudal entrante al laboratorio proveniente del exterior a través de la ventana norte es:

$$Q_{VN} = 0,34 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

El caudal saliente del laboratorio por la puerta es:

$$Q_P = 0,693 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

Por lo que la variación de caudal es de 36 [%]

### 5.1.5. Mediciones Ensayo 5

Desarrollado el día 22 de octubre de 2021. Medidas realizadas con la configuración del caso 3: ventanas norte y sur abiertas, puerta abierta por el lado norte y por el lado sur. Las mediciones fueron realizadas de forma simultánea en los mismos cuadrantes, utilizando soportes para los equipos y datos recogidos por el ordenador. En las ventanas se midió con los equipos TESTO 445 y TESTO 535 y en la puerta con sonda TESTO 858 y sonda TESTO 158.

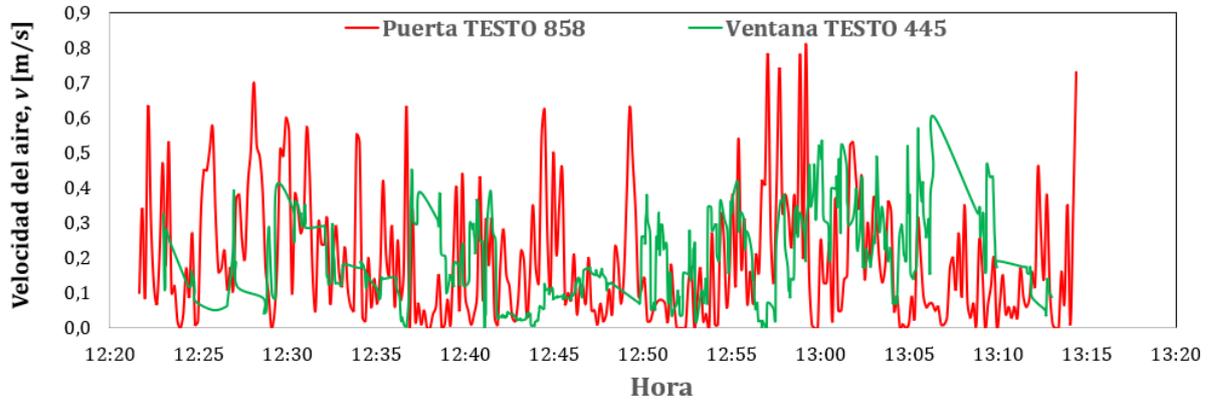


Figura 31. Velocidad del aire  $v$  [m/s].

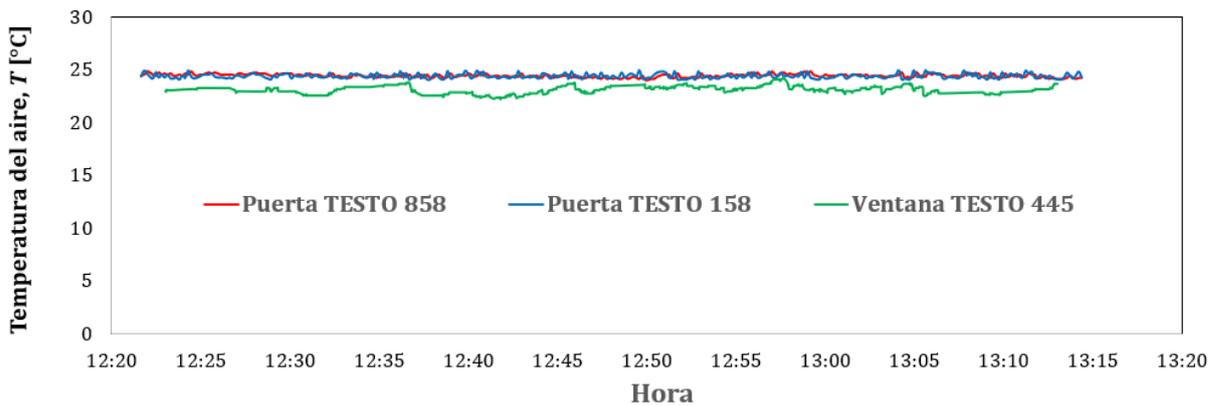


Figura 32. Temperatura del aire  $T$  [°C].

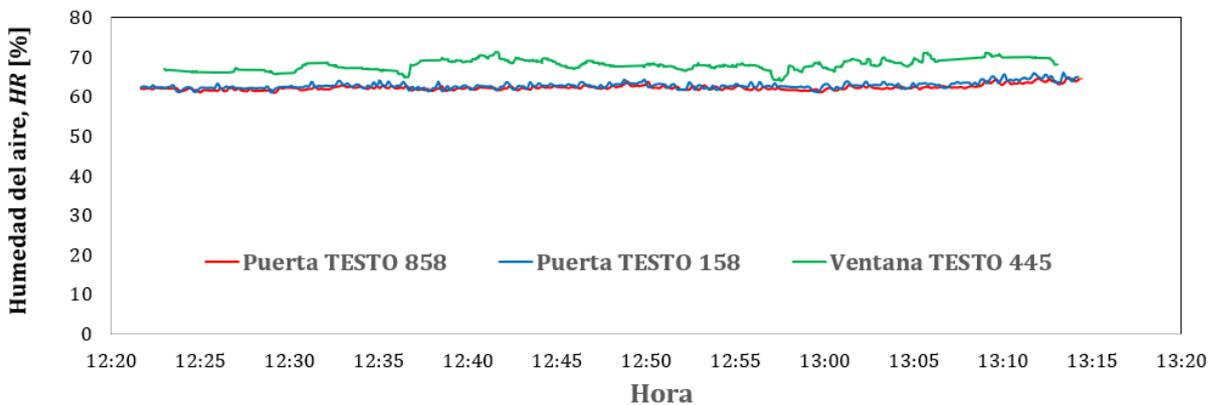


Figura 33. Humedad del aire  $x$  [kg/kg].

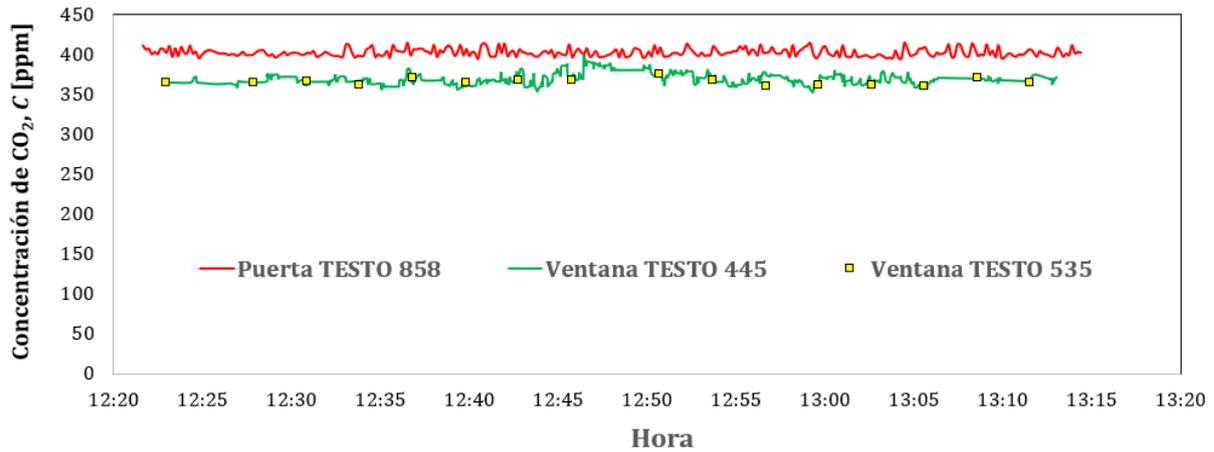


Figura 34. Concentración de CO<sub>2</sub> C [ppm].

Tabla 16. Medidas experimentales realizadas en día 22/10/2021 en la ventana sur y en el lado sur de la puerta. Velocidad del aire  $v$ , temperatura del aire  $T$ , humedad relativa  $HR$ , humedad absoluta  $x$  y concentración de CO<sub>2</sub>  $C$ .

Lugar	Ventana sur						Puerta lado sur							
Equipo	TESTO 445					TESTO 535	TESTO 858				TESTO 158			
Punto	$v$ [m/s]	$T$ [°C]	$HR$ [%]	$x$ [kg/kg]	$C$ [ppm]	$C$ [ppm]	$v$ [m/s]	$T$ [°C]	$HR$ [%]	$x$ [kg/kg]	$T$ [°C]	$HR$ [%]	$x$ [kg/kg]	$C$ [ppm]
1	0,16	23,2	66,6	0,0118	367	365	0,17	24,6	62,0	0,0120	24,4	62,0	0,0118	404
2	0,17	23,2	66,3	0,0118	372	365	0,34	24,7	61,8	0,0120	24,5	62,1	0,0119	402
3	0,13	23,5	66,9	0,0121	364	362	0,21	24,5	62,5	0,0120	24,4	62,9	0,0121	403
4	0,22	22,9	68,1	0,0119	367	366	0,27	24,5	62,2	0,0120	24,4	62,9	0,0121	401
5	0,33	22,8	68,9	0,0119	369	370	0,06	24,4	62,0	0,0119	24,4	62,1	0,0118	406
6	0,20	22,5	70,0	0,0120	367	364	0,17	24,6	62,3	0,0120	24,5	62,4	0,0120	405
7	0,13	23,1	68,2	0,0121	382	368	0,09	24,4	62,5	0,0119	24,5	62,8	0,0121	402
8	0,04	22,8	69,3	0,0121	366	367	0,23	24,5	62,3	0,0120	24,4	62,8	0,0120	403
Promedio	0,17	23,0	68,0	0,0119	369	366	0,19	24,5	62,2	0,0120	24,4	62,5	0,0120	403

Tabla 17. Medidas experimentales realizadas en día 22/10/2021 en la ventana y en el lado norte de la puerta. Velocidad del aire  $v$ , temperatura del aire  $T$ , humedad relativa  $HR$ , humedad absoluta  $x$  y concentración de CO<sub>2</sub>  $C$ .

Lugar	Ventana norte						Puerta lado norte							
Equipo	TESTO 445					TESTO 535	TESTO 858				TESTO 158			
Punto	$v$ [m/s]	$T$ [°C]	$HR$ [%]	$x$ [kg/kg]	$C$ [ppm]	$C$ [ppm]	$v$ [m/s]	$T$ [°C]	$HR$ [%]	$x$ [kg/kg]	$T$ [°C]	$HR$ [%]	$x$ [kg/kg]	$C$ [ppm]
1	0,17	23,4	67,5	0,0122	374	375	0,06	24,4	62,3	0,0119	24,4	62,6	0,0120	404
2	0,29	23,2	67,8	0,0121	365	367	0,19	24,5	62,3	0,0120	24,4	62,6	0,0120	406
3	0,37	23,1	68,0	0,0120	371	362	0,13	24,5	62,1	0,0119	24,4	62,6	0,0119	403
4	0,15	23,7	66,1	0,0121	370	360	0,40	24,7	62,0	0,0120	24,5	62,6	0,0120	404
5	0,28	23,3	68,6	0,0123	368	362	0,21	24,5	62,3	0,0120	24,4	63,0	0,0120	400
6	0,36	22,9	69,9	0,0122	366	360	0,09	24,6	62,5	0,0121	24,5	63,0	0,0121	404
7	0,11	23,3	69,4	0,0124	371	365	0,15	24,3	64,0	0,0122	24,3	65,0	0,0124	402
8	0,27	22,8	70,5	0,0122	369	370	0,10	24,5	63,6	0,0122	24,4	64,3	0,0123	402
Promedio	0,25	23,2	68,5	0,0122	369	365	0,17	24,5	62,6	0,0120	24,4	63,2	0,0121	403

Estos resultados muestran que al ser el mismo día que el caso anterior y la configuración, las velocidades no aumentaron.

La temperatura varió con respecto al ensayo anterior, al igual que la humedad.

La concentración de CO<sub>2</sub> se mantuvo en los valores del caso anterior y como resultado se puede observar cómo los emisores cambian la concentración de CO<sub>2</sub> en el interior, corroborando lo realizado en el caso previo.

El caudal entrante al laboratorio proveniente del exterior a través de la ventana sur es:

$$Q_{VS} = 0,29 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

El caudal entrante al laboratorio proveniente del exterior a través de la ventana norte es:

$$Q_{VN} = 0,35 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

El caudal saliente del laboratorio por la puerta es:

$$Q_P = 0,56 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

Por lo que la variación de caudal es de 11,3 [%]

En este caso, la variación de caudal fue un tercio de la variación experimentada en el ensayo anterior, debido a la mejora en la colocación de los equipos este caso se acerca más al modelo real y a las variaciones de caudal obtenidas en los demás ensayos.

## 5.2. Modelo de CFD

### 5.2.1. Modelo Ensayo 1:

Con la imagen siguiente (Fig. 35) se quiere mostrar como el CFD hace los cálculos. Al tratarse de un sistema de elementos finitos, en el que calcula en cada nodo de la malla realizada previamente todos los parámetros que afectan a este caso. Con todos estos datos se hace la media que es lo que da el resultado de la velocidad media en la puerta. En el gráfico se puede observar como la velocidad en la parte más inferior de la puerta tiene unos valores más dispersos y como se estabiliza conforme se asciende en la misma. Esto se debe al movimiento natural del aire y que la velocidad va descendiendo con la altura. Esto se puede ver de forma más visual con los vectores de la Fig. 39.

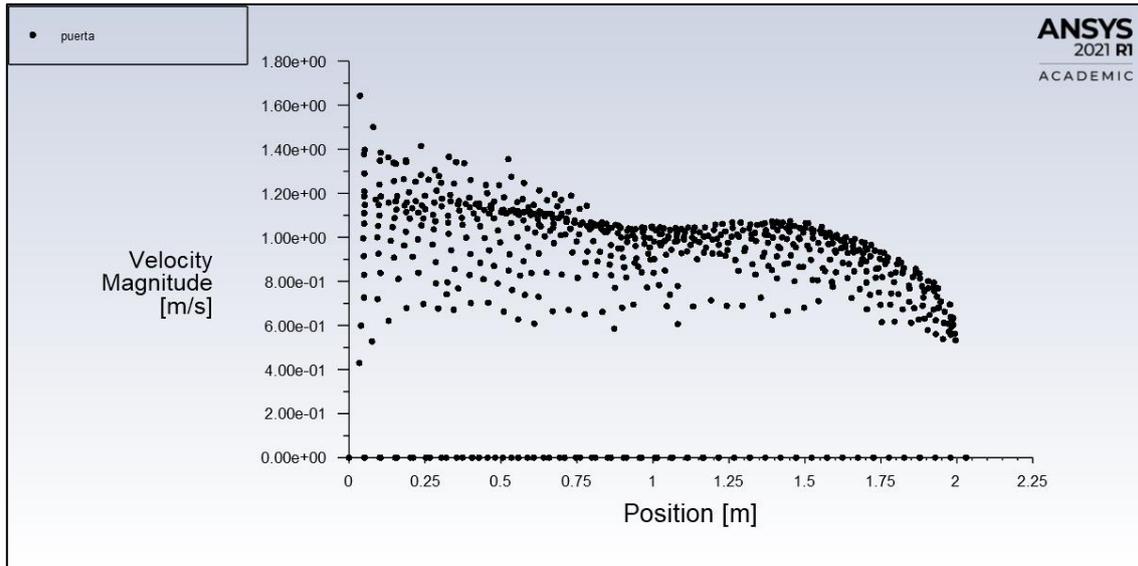


Figura 35. Datos de la velocidad del aire [m/s] en cada nodo de la salida de aire de nuestro modelo.

La humedad absoluta en la salida de la estancia se puede observar al igual que la velocidad en la Fig. 36. Estos datos nos aportan la medida para comparar con los datos reales medidos en los ensayos. En la imagen de la Fig. 37 se puede observar cómo se mueven las partículas de vapor de agua en la estancia desde la entrada del aire a la salida.

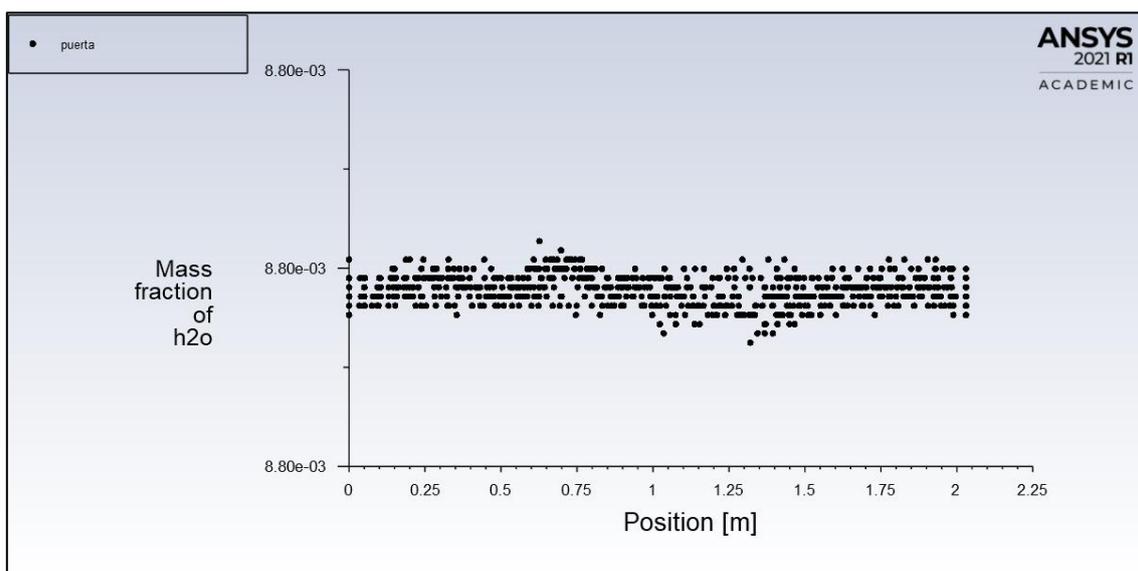


Figura 36. Humedad absoluta [kg/kg] en la salida de nuestro modelo.

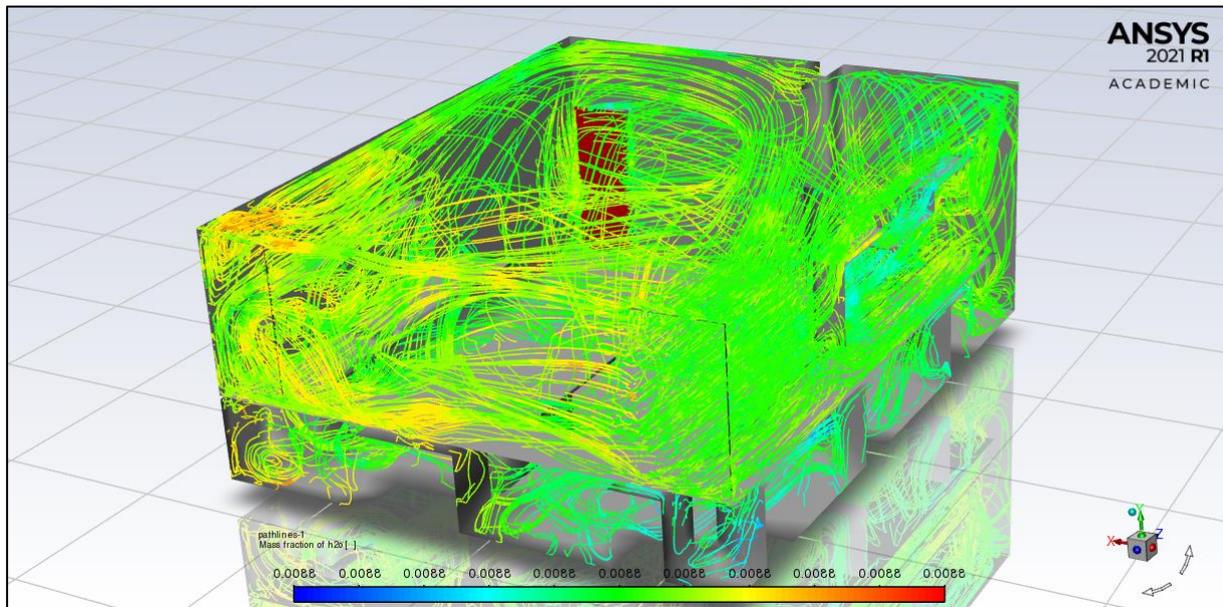


Figura 37. Movimiento de las partículas de vapor de agua [kg/kg].

La temperatura de la estancia y cómo afecta al movimiento del aire es otro de los datos a observar. En la Fig. 38. se muestra la temperatura de la estancia lo que da una imagen gráfica de cómo analizar el confort ambiental en su componente temperatura. Esto permite hacerse una idea de la temperatura media de la estancia que es un valor que da ANSYS-FLUENT en forma numérica mediante *volume integral*. También se puede observar cómo el aire enfría las superficies y cómo el suelo es lo que menos se enfría, debido a que la entrada del aire está en altura.

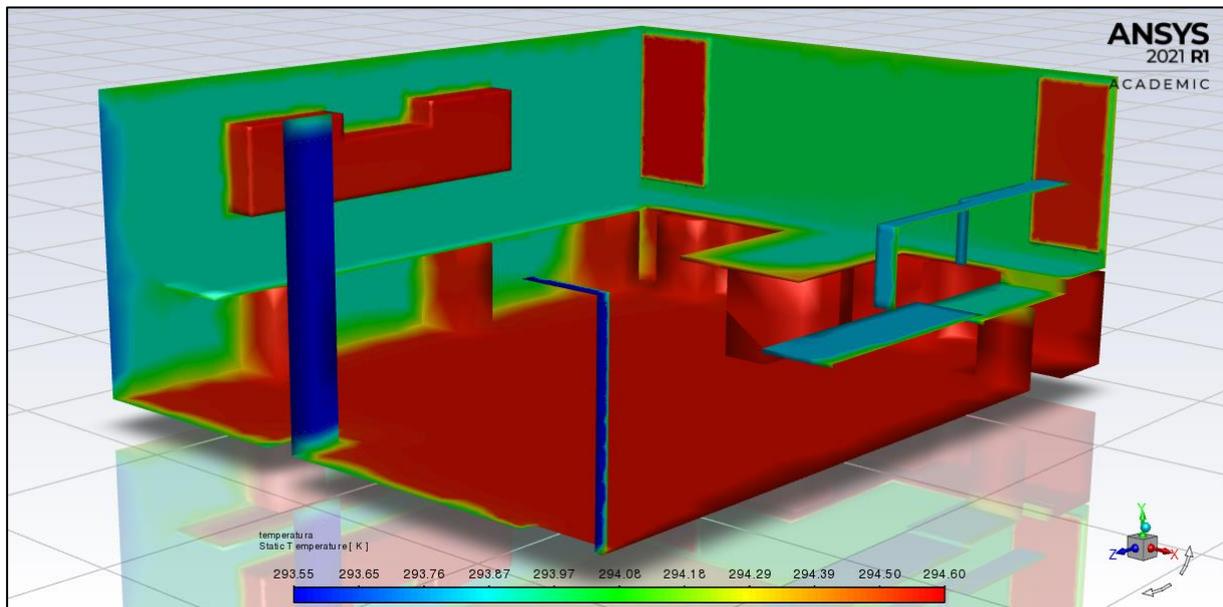


Figura 38. Temperatura de las distintas superficies de la estancia representada en el modelo [K].

En la Fig. 39. se puede observar cómo se mueve el aire en función de la velocidad. En este ensayo en el que solo había una ventana abierta, se puede ver cómo la estantería de la pared sur afecta a su movimiento y la temperatura de las superficies hace que el movimiento del aire sea de forma natural (de abajo a arriba debido a la convección). También se pueden ver las zonas donde la velocidad del aire es más baja y definir qué lugares de la estancia disponen de una peor ventilación.

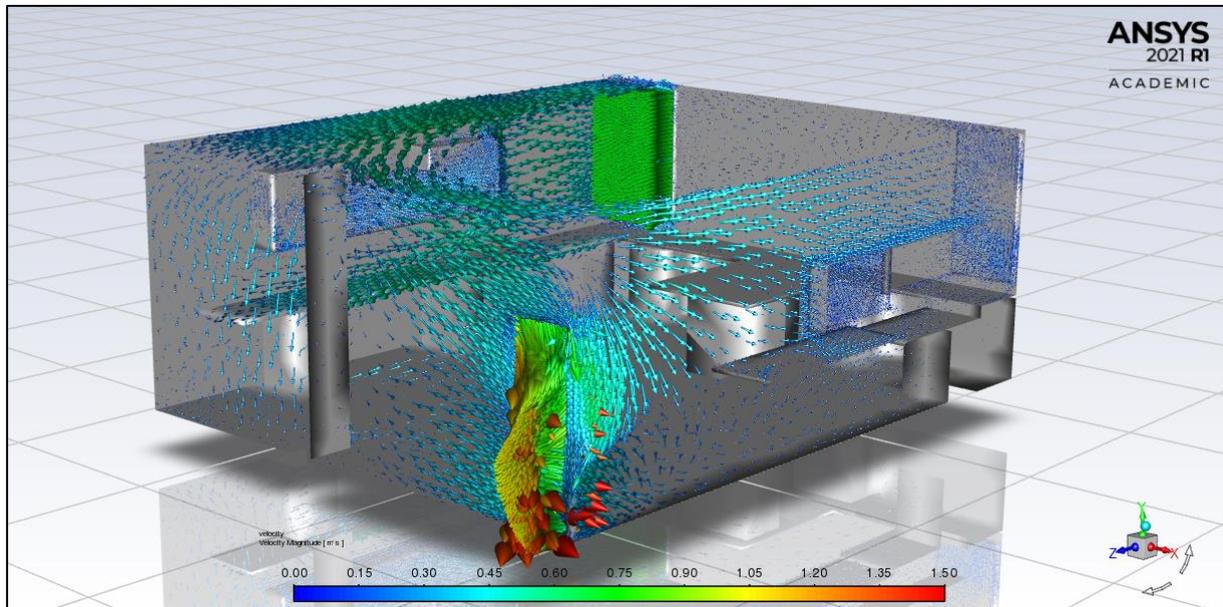


Figura 39. Velocidad del aire en el modelo [m/s].

Esta figura da la idea más aproximada y visual de lo que se quiere alcanzar, localizándose con una sola entrada de aire al sur de la habitación. Las zonas de menos ventilación se sitúan en la zona noreste y en la zona este. Esto hace suponer que se debería introducir una nueva entrada de aire en esa zona para que la ventilación de la estancia sea completa.

Como se puede observar en la Fig. 39, la velocidad aumenta en la salida. Esto se debe a que la superficie de salida es menor que la de la entrada. El caudal al ser una simulación se mantiene constante desde la entrada a la salida, por lo que las zonas de mayor velocidad se encuentran en la salida.

### 5.2.2. Modelo Ensayo 2:

En el modelo dos se verifica el segundo ensayo, realizado el día 07/04/2021. Las condiciones de entrada vienen dadas por los datos obtenidos experimentalmente y las salidas se obtienen a partir de la opción *Surface integrals* que da los datos medios de la superficie elegida, en este caso la puerta.

En el gráfico de la Fig. 40, se puede observar la distribución de la humedad absoluta en la puerta y los nodos en los que están medidos. En la parte inferior la humedad es casi constante y conforme se va ascendiendo varía. Hay que tener en cuenta que la humedad está en kg/kg y que la variación es muy pequeña, ya que se mantiene cerca del dato de entrada que es 0,0088. En esta gráfica se puede observar que, aunque la variación es pequeña, la hay. En g/kg estaría siempre en torno a 8,8 [g/kg].

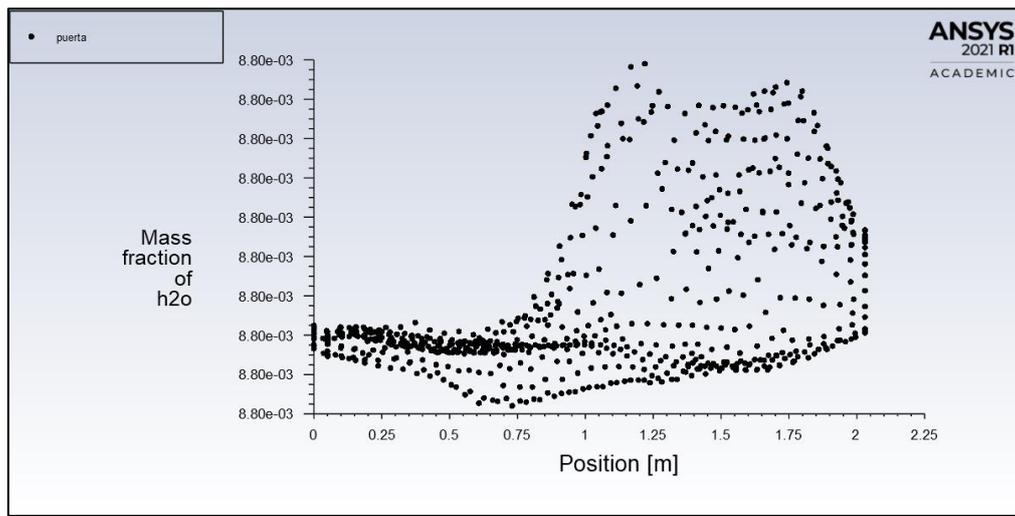


Figura 40. Humedad absoluta. [kg/kg] en la puerta, distribución en función de la altura.

La distribución de temperaturas de la estancia es igual que en el primer ensayo. Aunque el aire interfiere al abrir la segunda ventana, no hay un cambio significativo en cuanto a la temperatura (Fig. 41).

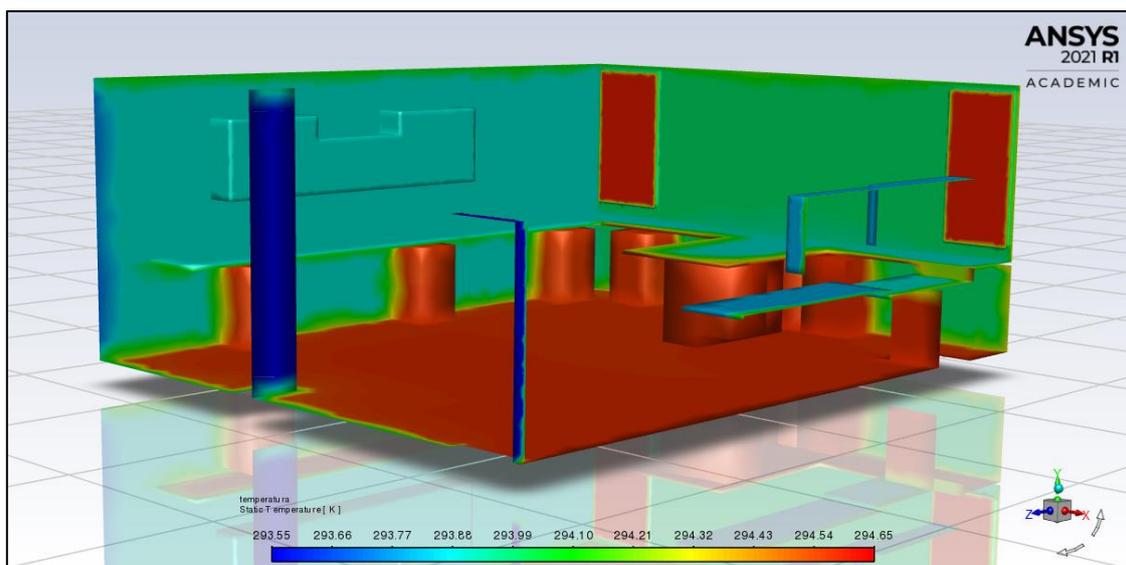


Figura 41. Temperatura del interior de la estancia [K].

Con respecto a velocidad del aire, en este ensayo se puede ver como la cercanía de la estantería situada en la pared norte afecta mucho al movimiento del aire. Se puede ver con más detalle en la Fig. 42.

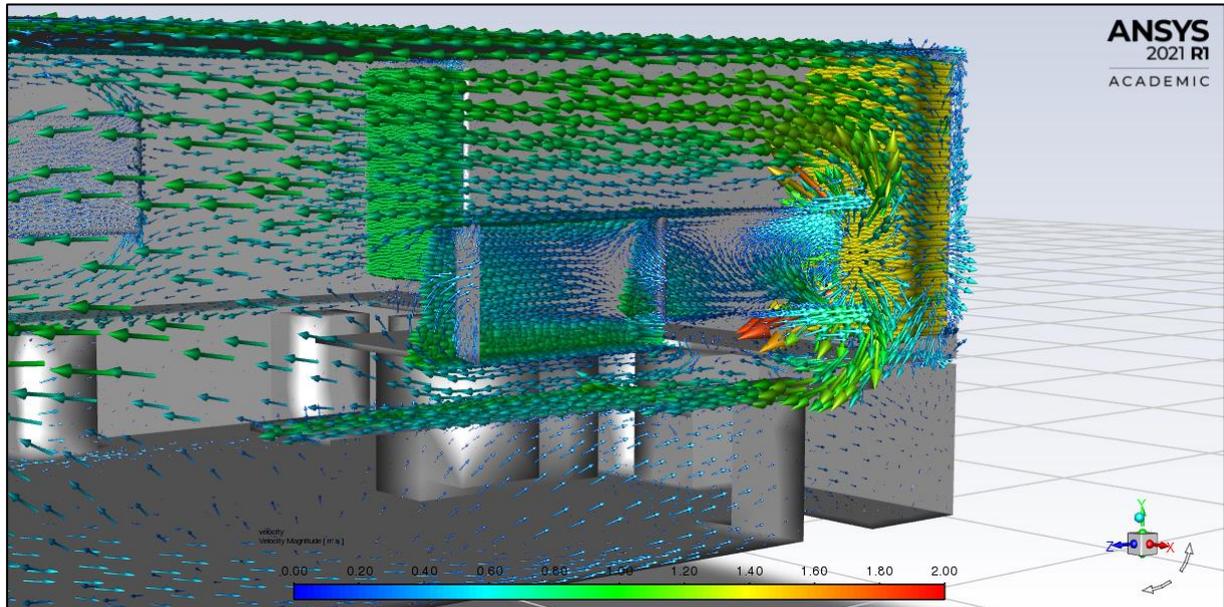


Figura 42. Detalle de velocidad del aire en las proximidades de la estantería [m/s].

Como se puede observar en la Fig. 43 el aire se distribuye por difusión por desplazamiento, este hace que el aire que entra en el interior por convección ascienda ya que el aire que se encuentra en la parte inferior se encuentra más frío. La velocidad del aire dentro del laboratorio con respecto al primer ensayo ha aumentado al abrir la ventana norte. Optimizando la ventilación de la estancia.

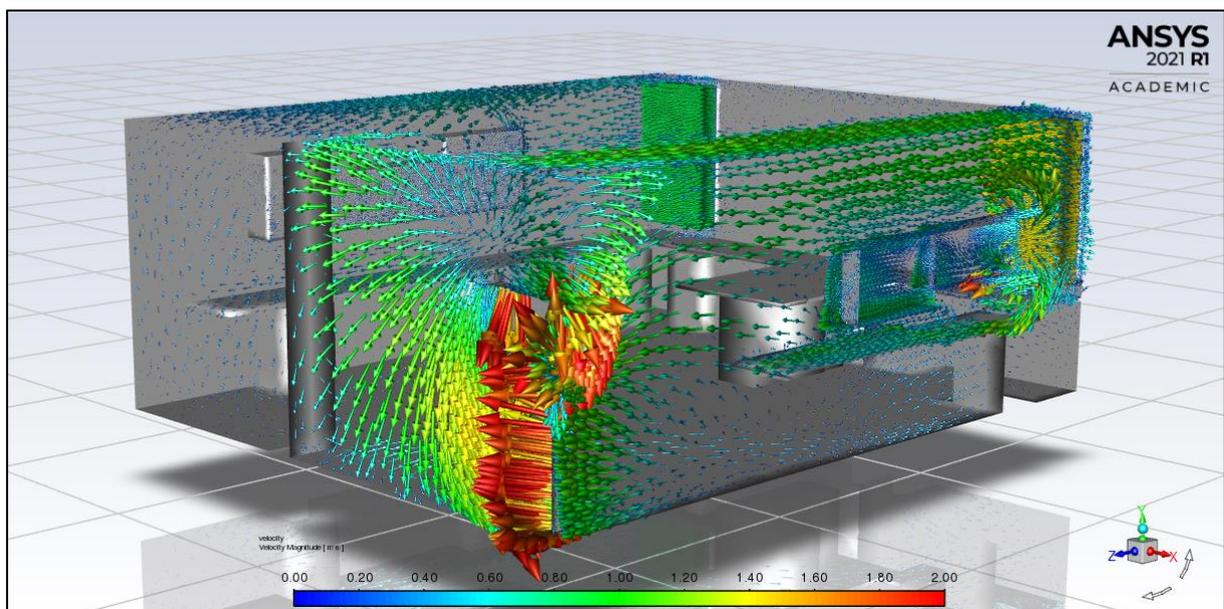


Figura 43. Distribución de la velocidad del aire dentro del laboratorio [m/s].

### 5.2.3. Modelo Ensayo 3:

En el ensayo realizado el día 13/10/2021 se introdujeron los 3 emisores dentro del laboratorio y se convierten en los principales emisores de vapor de agua y de CO<sub>2</sub>.

La concentración de humedad absoluta en las entradas de aire al laboratorio y los emisores situados en el interior del mismo se puede ver en la Fig. 44.

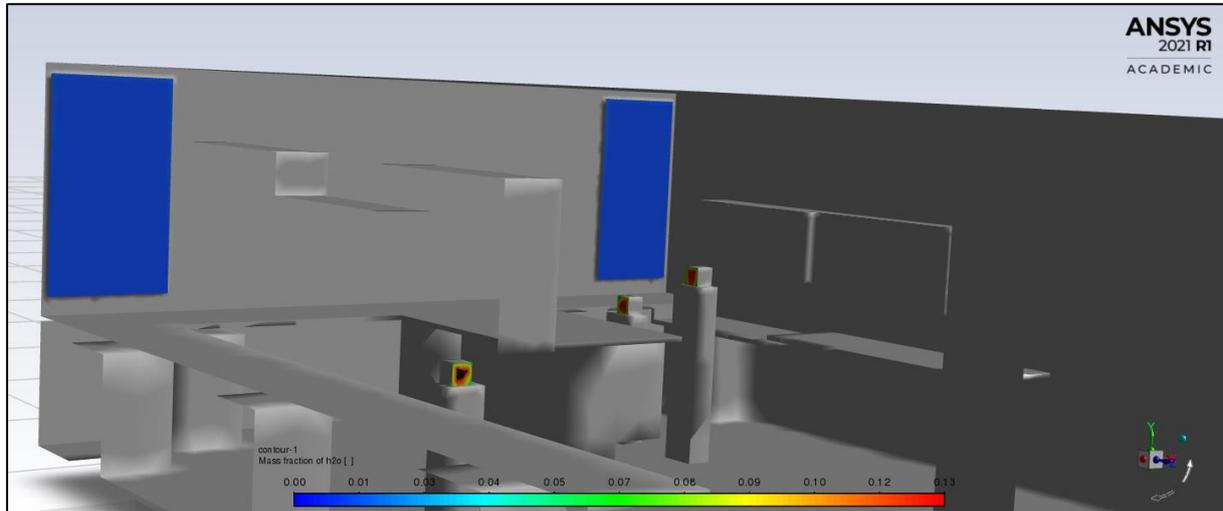


Figura 44. Cantidad de humedad absoluta [kg/kg]. En las entradas y los emisores.

La dirección tomada por la humedad absoluta como se puede ver de forma gráfica en la Fig. 45 nos muestra cómo los emisores intervienen en el modelo aumentando la cantidad de humedad en el interior. Se puede observar la dirección en las entradas de aire que son perpendiculares a la superficie de entrada.

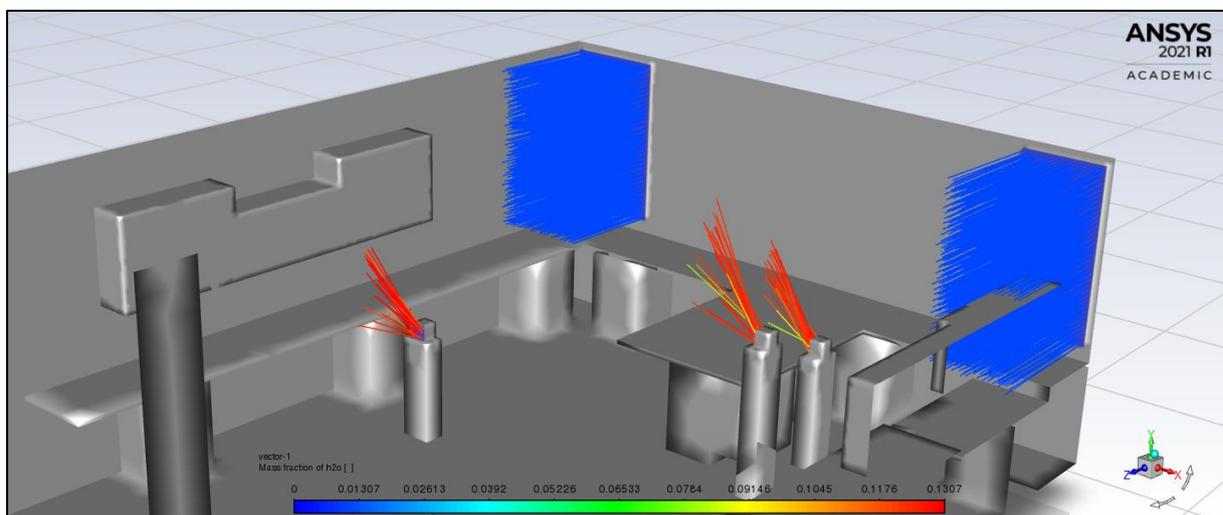


Figura 45. Dirección de humedad absoluta y cantidad expulsada [kg/kg].

En la Fig.46 se puede ver como al introducir el parámetro de temperatura corporal en los emisores, en el resto de superficies apenas se pueden apreciar las variaciones, por lo que, en adelante, evitaremos mostrar la temperatura de estos.

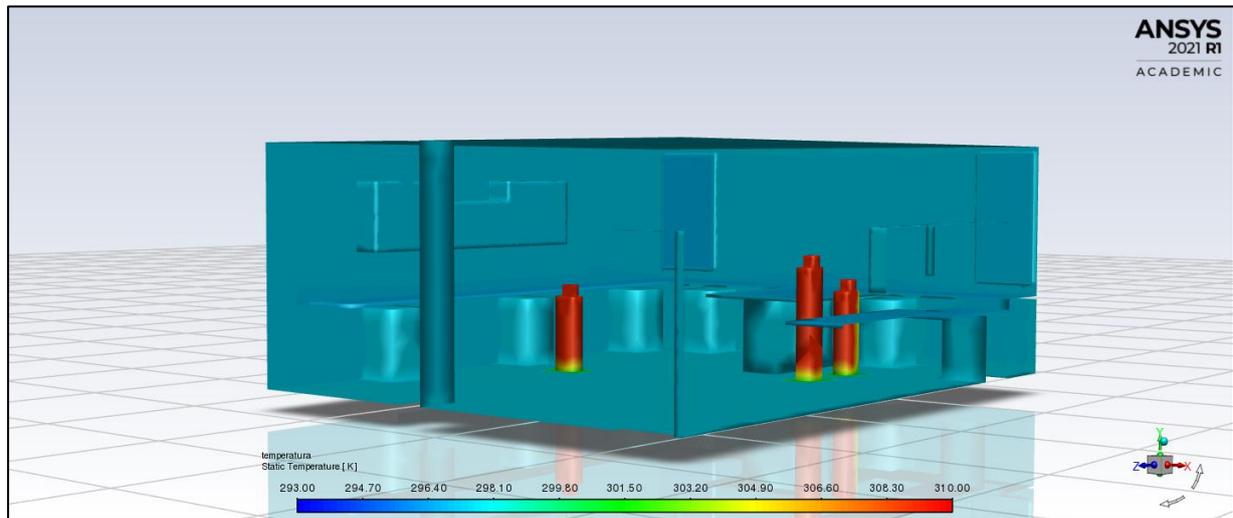


Figura 46. Distribución de temperaturas [K] de las superficies en el ensayo 3.

En la Fig. 47 y 48 se muestra el movimiento del aire y su velocidad. Se puede ver que los emisores están colocados en lugares donde se favorece la ventilación, en especial el que está a la izquierda, situado en el flujo de aire que va desde la entrada de aire en la ventana sur hacia la puerta. También se pueden observar las zonas de estancamiento que se encuentran en los lugares en que los vectores son menos abundantes y tienen una menor velocidad.

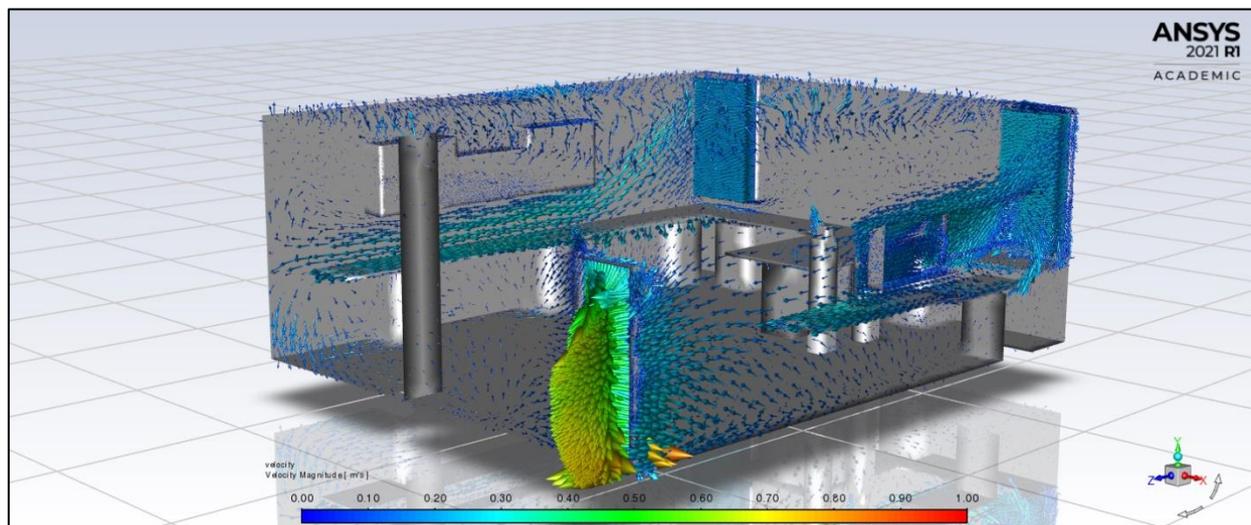
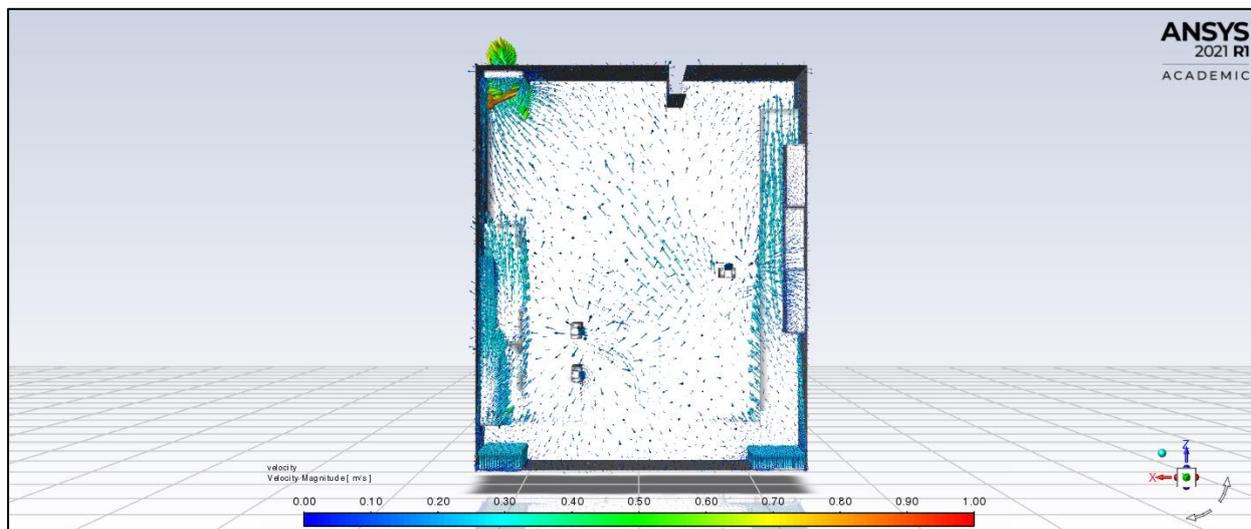


Figura 47. Velocidad del aire en el ensayo 3 [m/s]. Vista isométrica.



**Figura 48. Velocidad del aire en el ensayo 3 [m/s]. Vista en planta.**

#### 5.2.4. Modelo Ensayo 4:

El ensayo realizado el día 22/10/2021 se desarrolla conforme al modelo mostrado en la Fig. 49 en este se puede ver como los emisores dentro de la estancia exhalan  $\text{CO}_2$  en concentración mucho más alta que la que entra del exterior, pero a velocidad mucho más lenta que como lo hace desde las entradas del exterior.

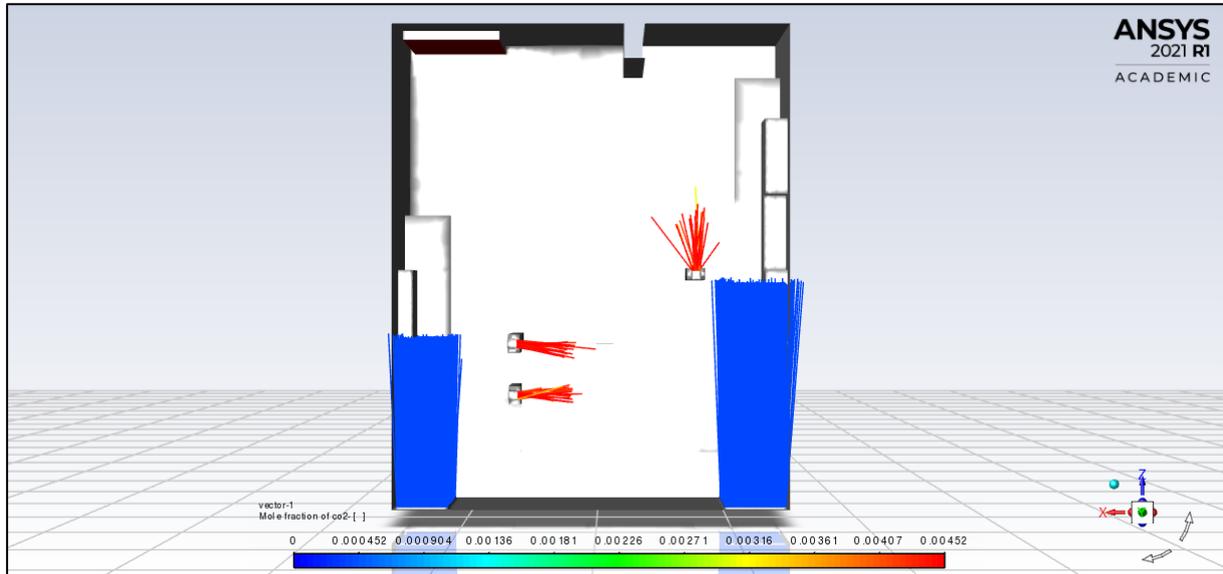


Figura 49. Emisores de  $\text{CO}_2$  y dirección del flujo en el ensayo 4. Vista en planta.

En la Fig. 50, se puede observar el flujo del aire que exhalan los emisores dentro de la estancia. El flujo del emisor que se sitúa en la trayectoria del flujo entrante por la ventana toma la dirección del este y se dirige hacia la puerta. En cambio, para los emisores que se sitúan cerca de la zona de depresión de flujo entre las dos entradas, el flujo toma la trayectoria normal, que es hacia arriba. Al exhalar aire caliente sube por convección.

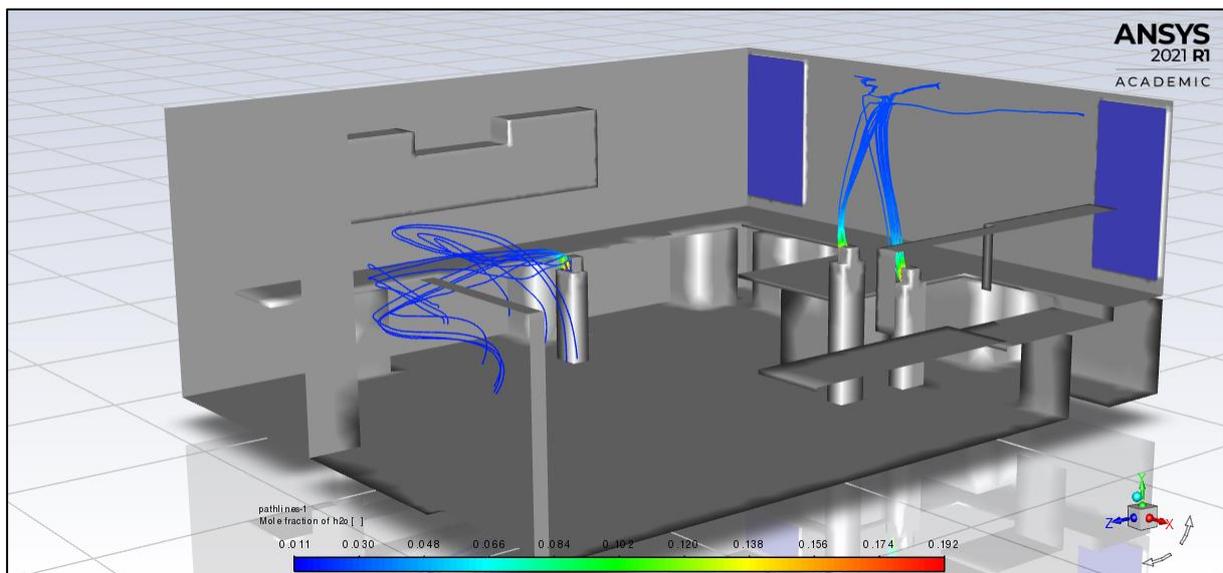


Figura 50. Flujo del aire expulsado por los emisores. Expresado en humedad absoluta [kg/kg].

Como se comentó en el modelo anterior, el mostrar la temperatura de los cuerpos de los emisores hace que se pierda la apreciación de la variación de las temperaturas en las superficies. En la Fig. 51, se representa de forma visual como la incidencia del aire exterior calienta algunas zonas de las superficies.

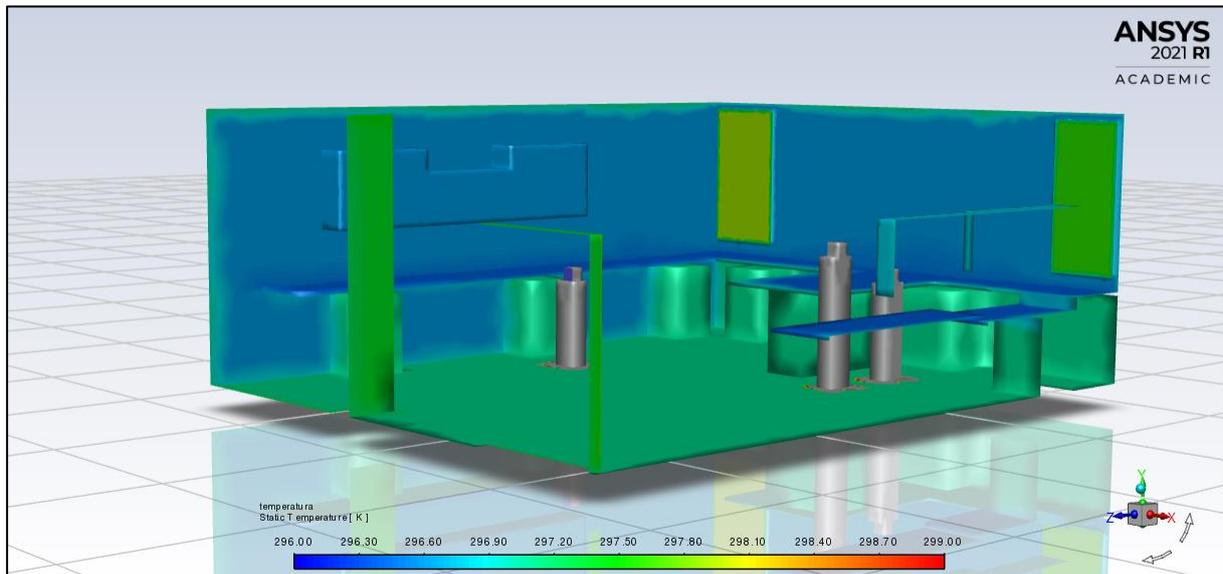


Figura 51. Distribución de temperaturas [K] de las superficies.

Con la representación de las tres figuras siguientes (Fig. 52, Fig. 53 y Fig. 54) Se quiere mostrar en más detalle la velocidad y con ella el movimiento del aire dentro de la estancia. En la Fig. 52 se puede observar desde la esquina suroeste del laboratorio como afecta el mobiliario al movimiento del aire t donde se crean remolinos que hacen que la velocidad del aire incremente.

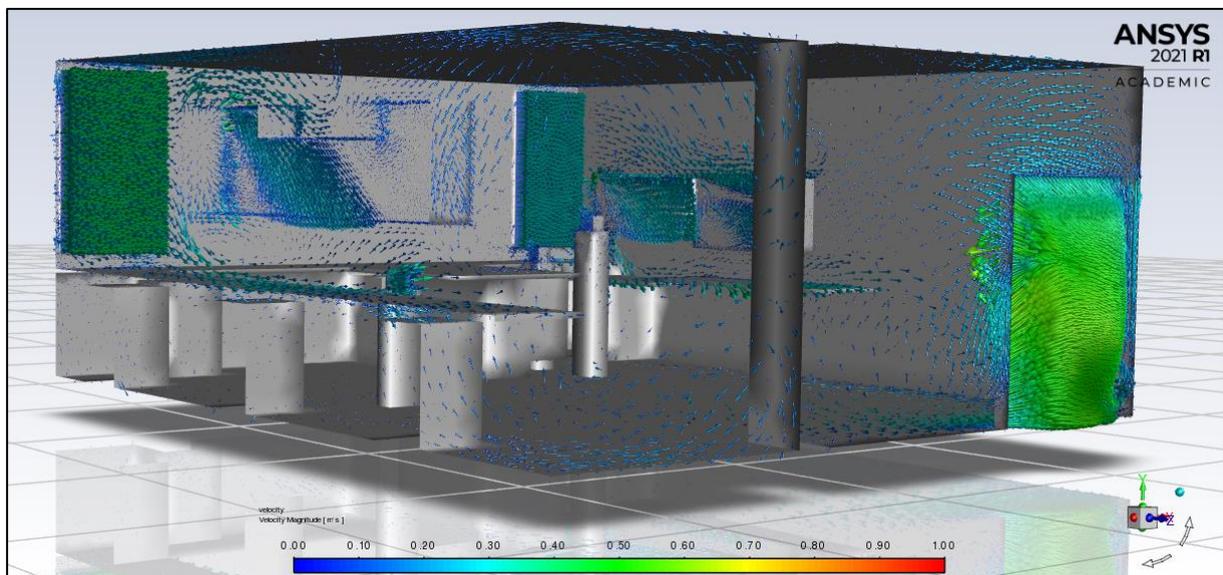


Figura 52. Velocidad del aire en el interior del laboratorio [m/s]. Vista desde el lado suroeste.

La depresión de aire que se genera entre las dos ventanas se puede ver en las Fig. 53 y 54 desde ángulos diferentes, esto hace que se genere una zona de estancamiento. Esto es común en las zonas próximas a las entradas de aire ya que el aire suele entrar mayor medida en su componente perpendicular por lo que estas zonas se quedan sin esa ventilación y más en estos ensayos donde las entradas y la salida están opuestas y forman una especie de forma de túnel. En la Fig. 53 se puede ver con detalle cómo se ha aumentado la superficie de salida y que esto se traduce en que la velocidad no es tan alta ya que las superficies de entrada y salida son más similares.

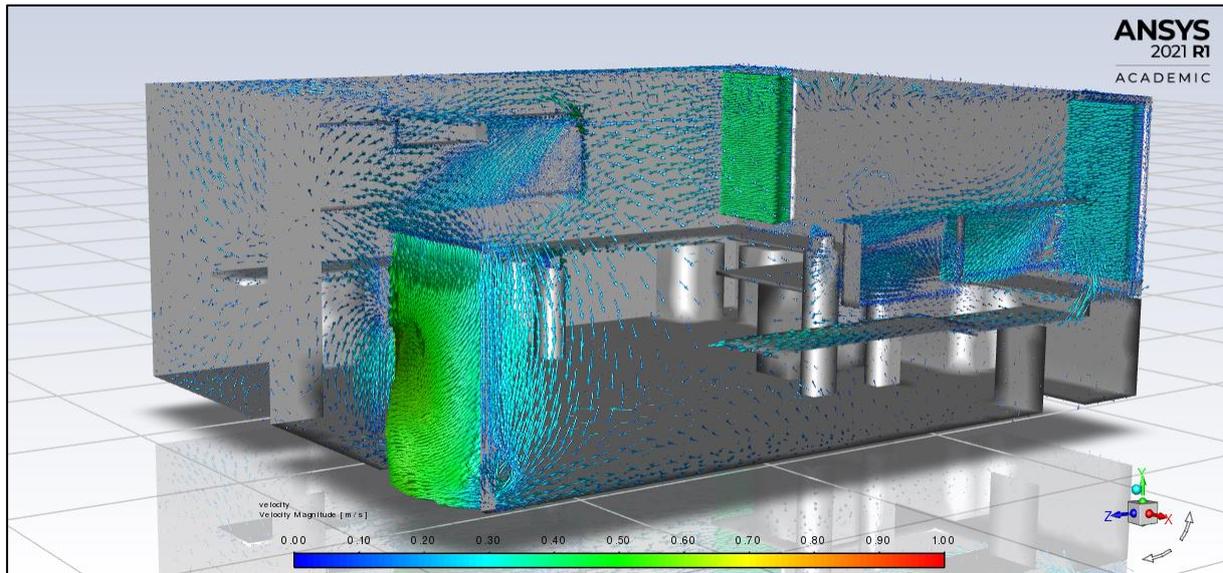


Figura 53. Velocidad del aire en el interior del laboratorio [m/s]. Vista isométrica.

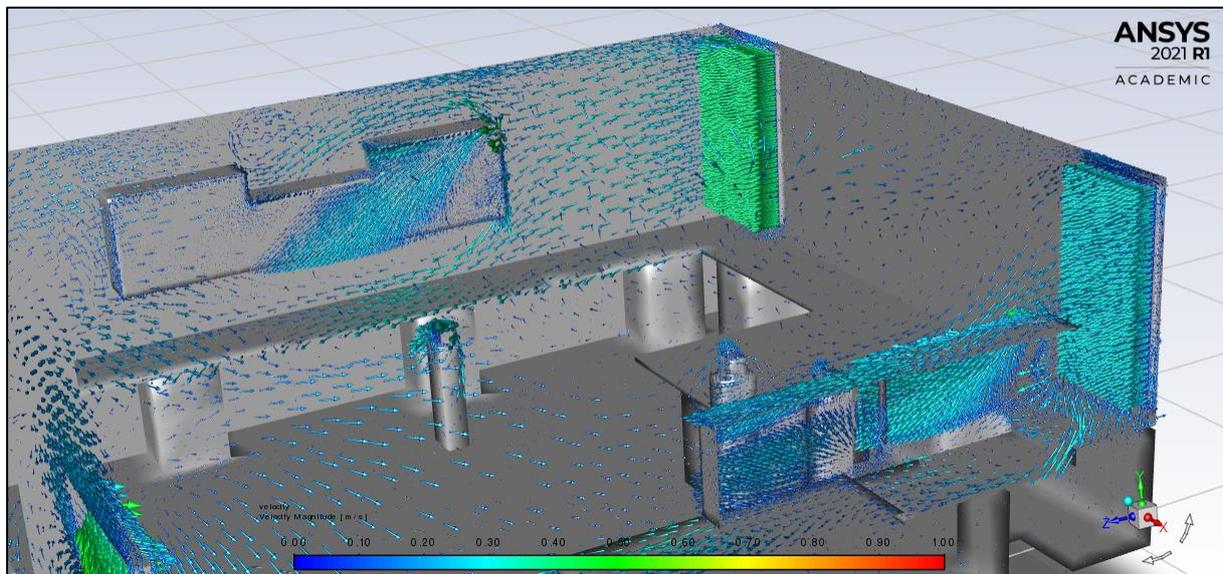


Figura 54. Velocidad del aire en el interior del laboratorio [m/s]. Vista en detalle de la zona de depresión.

### 5.2.5. Modelo Ensayo 5:

El ensayo 5 es análogo al ensayo 4, se realizó el mismo día y aunque salen resultados diferentes el procedimiento y lo que se puede observar en el modelo con respecto a los parámetros estudiados es parecido.

Con el parámetro de velocidad del aire, mostrado en la Fig.55, se puede observar cómo fluye el aire dentro de la estancia. La velocidad en este modelo alcanza un máximo de 0,6 [m/s] por lo que el aire se mueve a muy poca velocidad. Este ajuste de escala se ha realizado para poder observar las zonas donde se alcanzaba una mayor velocidad. Como era de esperar, las zonas donde se forman remolinos y la salida son donde se alcanza la mayor velocidad. Esta imagen también corrobora que el caso 5 fue el más desfavorable ya que apenas había movimiento y da como resultado una humedad relativa alta.

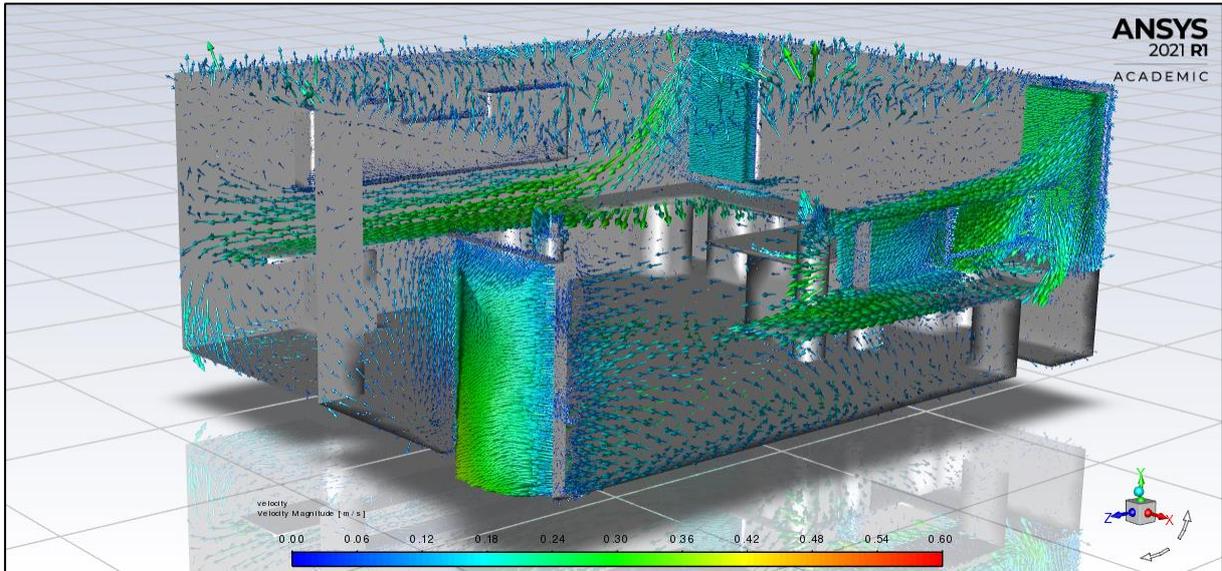


Figura 55. Velocidad del aire en el interior del laboratorio [m/s].

En la Figura 56 se muestra la dirección en la que las personas dentro del laboratorio exhalan el aire y la cantidad en la que lo hacen.

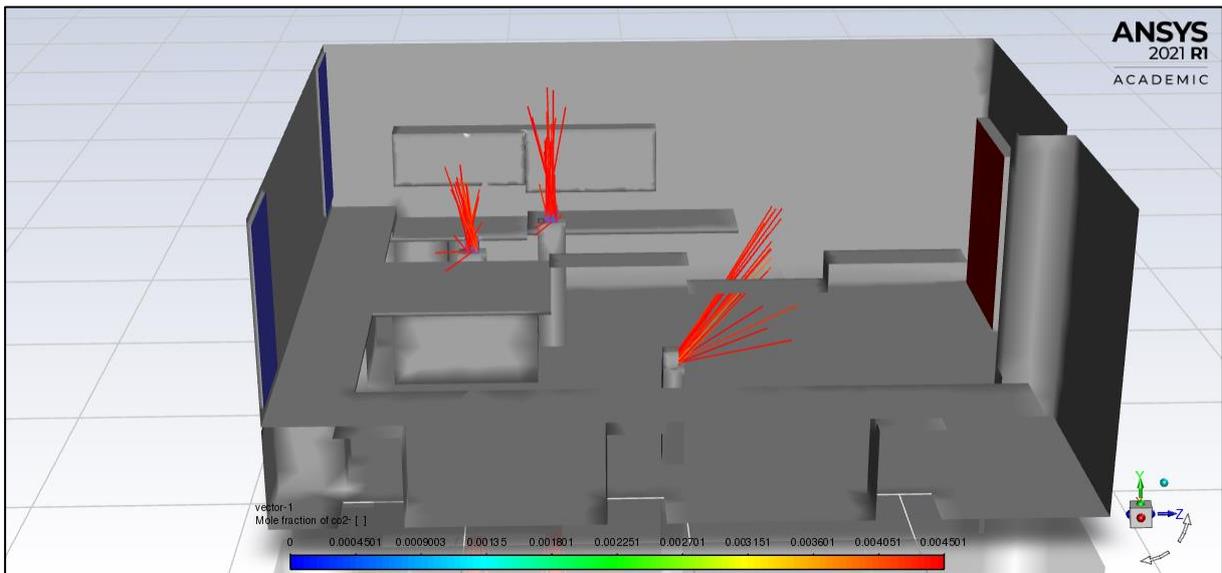


Figura 56. Dirección de CO<sub>2</sub> en la que exhalan los emisores en el ensayo 5.

En la Fig. 57, se puede observar la trayectoria solo de la humedad entrante en el laboratorio, lo que nos da una idea de qué trayectoria toma el aire dentro del laboratorio.

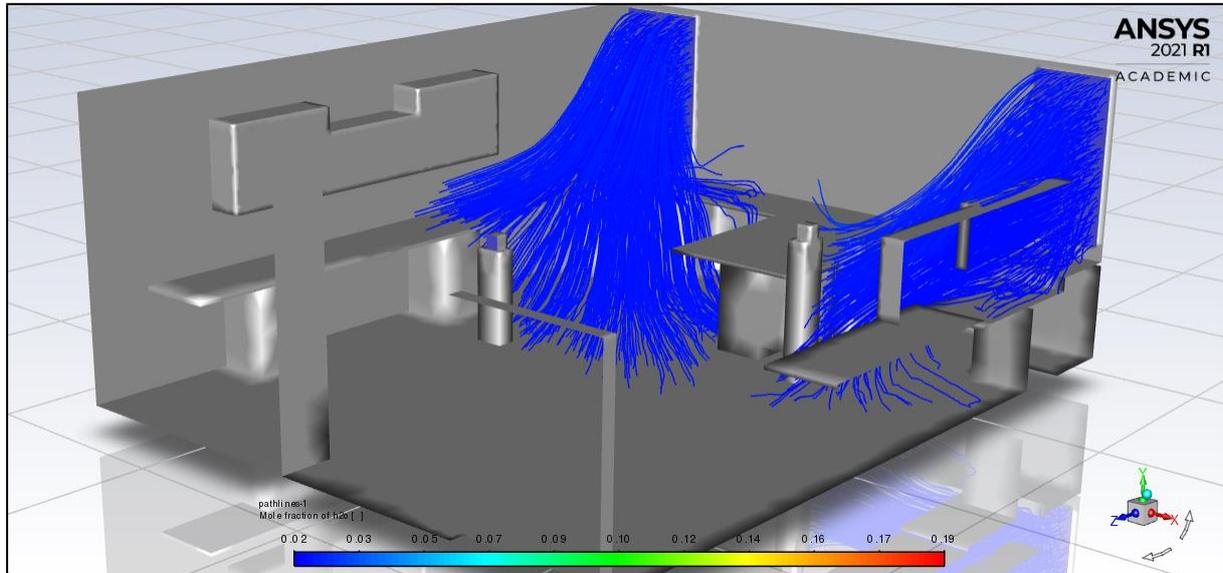


Figura 57. Humedad absoluta entrante al laboratorio [kg/kg].

En la Fig. 58 se muestra la distribución de las temperaturas en todas las superficies exceptuando los cuerpos de los emisores. En esta imagen también se puede ver la parte norte y como está distribuida la temperatura.

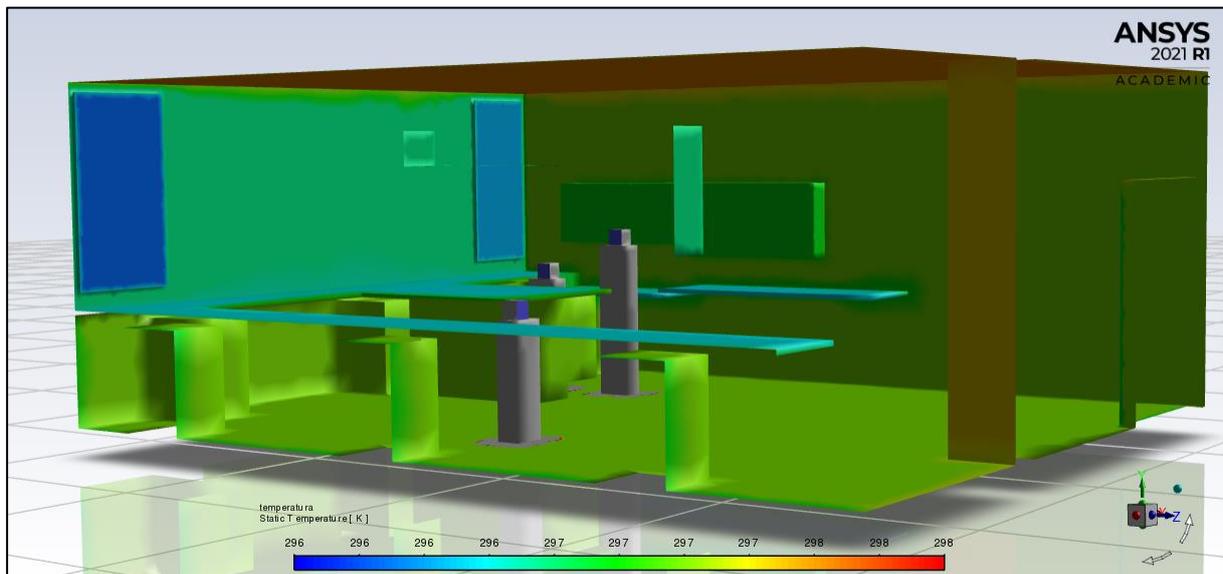


Figura 58. Temperatura de las superficies del laboratorio [K].

### 5.2.6. Modelo Climatización

Este modelo se ha añadido posteriormente ya que no se han podido realizar los ensayos con la climatización central porque no funciona. Cuando se propuso esta investigación, la intención era poder medir los mismos parámetros que en los demás casos en las entradas y salidas de la climatización del laboratorio, pero al no ser posible se ha optado por hacer el modelo solo en CFD con las condiciones de temperatura y emisores del caso más desfavorable que ha sido el ensayo 5.

Se ha puesto como entrada de aire solo el surtidor de aire, con las condiciones de la tabla 6. Y las salidas han sido las rejillas y el lado norte de la puerta. Obteniendo unos resultados óptimos para el confort ambiental de la estancia.

Con esto se pretende dar un caso válido a partir de lo realizado anteriormente y configurar solo en forma CFD y sin mediciones la configuración óptima para el confort ambiental.

La Figura 59 es una vista superior del laboratorio donde se puede observar que el aire va hacia las salidas, que son las rejillas de ventilación y la puerta. Se ve cómo la estancia está debidamente ventilada y no queda ninguna zona en la que el movimiento de aire sea nulo, aunque la zona de depresión en los casos anteriores sigue estando poco ventilada. Esto se debe a que el aire al ir hacia las salidas situadas todas lejos no da lugar a que llegue el aire a esa zona.

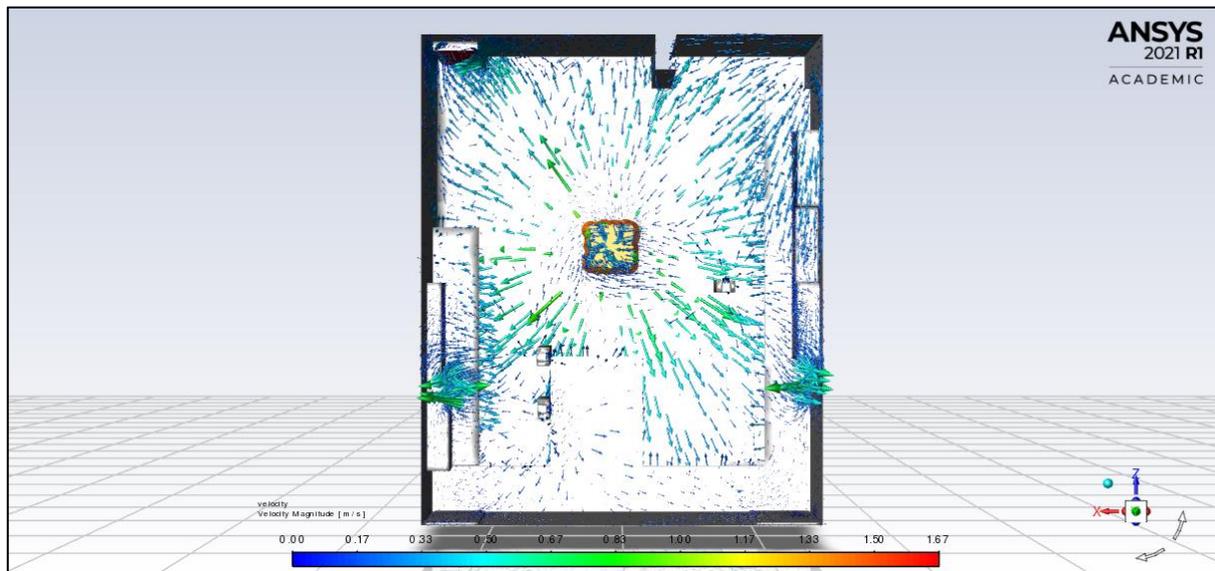


Figura 59. Velocidad del aire en el interior del laboratorio [m/s]. Vista planta.

En la Fig. 60 se ve de forma más clara la distribución del aire en el laboratorio.

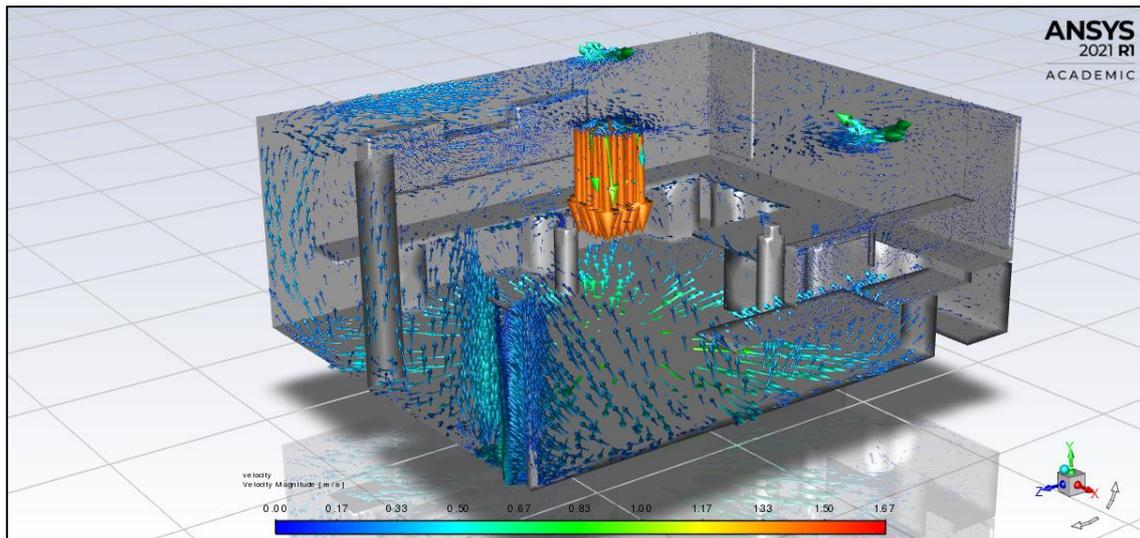


Figura 60. Velocidad del aire en el interior del laboratorio [m/s]. Vista isométrica.

En este caso pasa algo similar a los casos simulados anteriormente. La temperatura de entrada del aire es de 22 grados por lo que se pierde la apreciación de cómo enfría las superficies. En la Fig. 61, se observa como las temperaturas de la entrada de aire y de las salidas en las rejillas y la puerta (Fig. 62) es menor que en el resto del laboratorio.

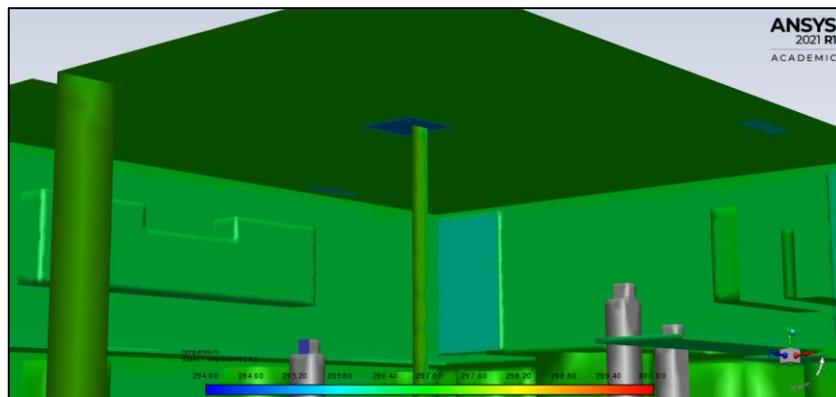


Figura 61. Temperatura [K] de las superficies. Detalle del techo.

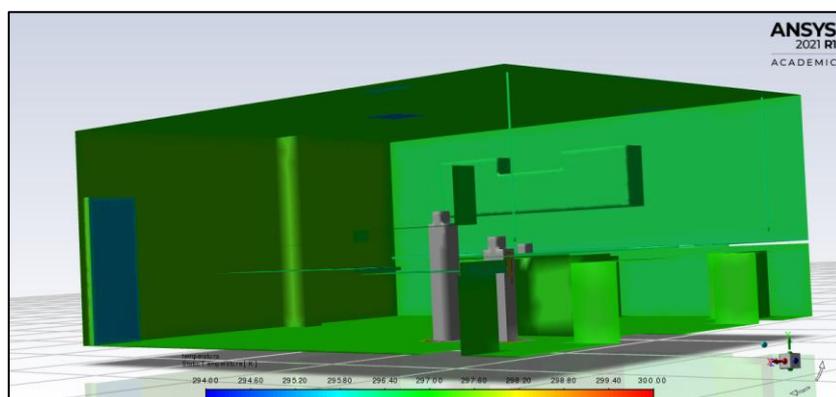


Figura 62. Temperatura [K] de las superficies. Detalle de la puerta.

En la Fig. 63 se puede observar el flujo de CO<sub>2</sub> en la estancia. Como los emisores ya no están dentro del flujo de aire que hacía cambiar la trayectoria, el aire exhalado sale de forma natural hacia arriba. Se puede verificar que en el caso del CO<sub>2</sub> que entra, al ser aire recirculado, no disminuyen las concentraciones del mismo.

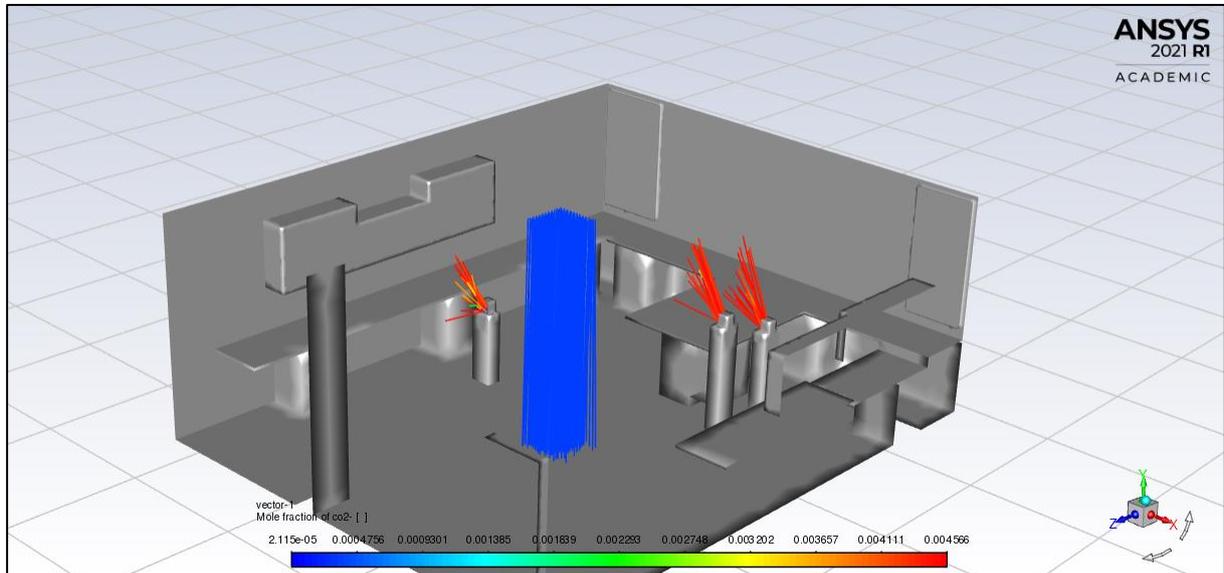


Figura 63. Dirección del flujo de CO<sub>2</sub> en los emisores del interior.

En la Fig. 64 se muestra como el movimiento vertical el horizontal mientras que cuando se abrían las ventanas predominaba el horizontal, también se puede ver la trayectoria seguida por el aire exhalado por los emisores que como se ha comentado antes, al no interponerse en ninguna trayectoria, asciende.

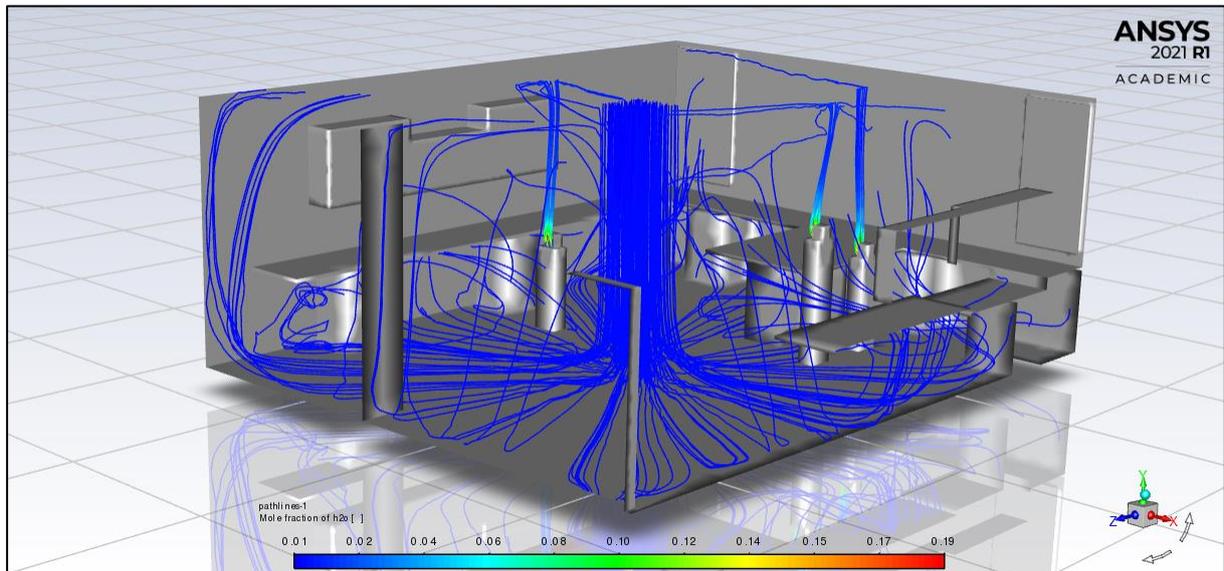


Figura 64. Humedad absoluta [kg/kg]. Trayectoria del aire que entra en el laboratorio.

### 5.3. Validación

Para la validación de estos ensayos, se muestran a continuación en forma de tabla (Tabla 18) los datos obtenidos por ambos métodos y la diferencia entre ambos. Esta diferencia se podría interpretar en función de la precisión de los equipos y de los datos obtenidos en la simulación CFD. Realmente para hacer un ensayo tan preciso como el simulado se necesitarían muchos más datos, que las rejillas de ventilación estuvieran tapadas al igual que la entrada de aire del aire acondicionado, que, a pesar de no estar en funcionamiento, puede permitir la entrada o salida de aire. En la simulación no ocurre tal cosa, las salidas y las entradas son únicas. Todo esto da una idea de lo que se puede modificar, que es la idea principal de este trabajo.

Los datos de la simulación han sido obtenidos a través de los comandos *Surface Integrals* y los datos de los ensayos son la media de los datos obtenidos en el laboratorio.

**Tabla 18. Validación de las medidas tomadas en los ensayos con los valores obtenidos en CFD. caudal del aire  $q$ , temperatura del aire  $T$ , humedad absoluta  $x$  y concentración de  $CO_2$ .**

Ensayo	Tipo	Entrada				Salida			
		$q$ [m <sup>3</sup> /s]	$T$ [°C]	$x$ [kg/kg]	$CO_2$ [ppm]	$q$ [m <sup>3</sup> /s]	$T$ [°C]	HR [kg/kg]	$CO_2$ [ppm]
1	Real	1,188	21,6	0,0088	418	1,338	21,5	0,0088	426
	Simulado	1,194	21,6	0,0088	418	1,194	21,7	0,0089	435
	<b>Error [%]</b>	<b>0,5</b>	<b>Condiciones de contorno</b>			<b>10,8</b>	<b>0,9</b>	<b>1,1</b>	<b>2,1</b>
2	Real	3,937	21,6	0,0088	411	3,21	21,8	0,0088	411
	Simulado	3,947	21,6	0,0088	411	3,95	21,6	0,0088	414
	<b>Error</b>	<b>0,3</b>	<b>Condiciones de contorno</b>			<b>23,0</b>	<b>0,9</b>	<b>0</b>	<b>0,9</b>
3	Real	0,691	24,1	0,0111	365	0,64	24,8	0,011	398
	Simulado	0,692	24,1	0,0111	365	0,70	24,2	0,012	412
	<b>Error</b>	<b>0,1</b>	<b>Condiciones de contorno</b>			<b>9,7</b>	<b>2,4</b>	<b>10,9</b>	<b>3,5</b>
4	Real	1,11	24,8	0,0107	367	0,69	24,4	0,0120	403
	Simulado	1,08	24,8	0,107	367	1,1	24,8	0,0115	396
	<b>Error</b>	<b>3,1</b>	<b>Condiciones de contorno</b>			<b>56,3</b>	<b>1,7</b>	<b>4,2</b>	<b>1,5</b>
5	Real	0,64	23,0	0,0119	369	0,56	24,5	0,0121	403
	Simulado	0,63	23,1	0,0120	369	0,63	23,4	0,0134	419
	<b>Error</b>	<b>2,0</b>	<b>Condiciones de contorno</b>			<b>13,0</b>	<b>4,5</b>	<b>10,7</b>	<b>4,0</b>

#### Ensayo 1

En el primer ensayo realizado el 07/04/2021 al ser el más sencillo, con una entrada y una salida, el error en las medidas es pequeño.

Se puede observar que en los casos más sencillos en los que no interviene casi ningún factor el CFD y el simulado dan los mismos resultados, por lo que se optaría por realizar un modelo CFD solo tomando medidas en la entrada de aire, para configurarlo y se obtendrían los valores de salida sin necesidad de tomar medidas.

#### Ensayo 2

El segundo ensayo, realizado el 07/04/2021, da valores muy similares entre los parámetros reales y simulados, el error no supone más del 3 %, exceptuando el caudal, que mientras en la simulación se mantiene constante, en el real disminuye. Esta pérdida de caudal se debe a que en el caso real hay más salidas (rejillas de ventilación) aunque no intervengan en tanta medida como la puerta.

### **Ensayo 3**

Este ensayo es bastante certero ya que se dieron unas condiciones estables, aparte de que las medidas fueron tomadas por el ordenador por lo que mejora la aproximación.

El caudal se mantiene constante y el error se mantiene dentro de un rango aceptable.

### **Ensayo 4**

En el ensayo 4 realizado el día 22/10/2021 el valor más significativo es el error entre el caudal simulado y real, que supone un 56,3 %, esto se debe a que el día realizado hacía mucho calor y el caudal que se perdía por las rejillas de ventilación era más grande que en los demás casos debido a la convección.

### **Ensayo 5**

En el ensayo que se realizó el mismo día que el caso anterior, al disminuir la velocidad del viento, disminuyó el caudal por lo que no hubo tantas pérdidas. Lo que hace que los valores se mantengan más estables y el error entre valores reales y simulados se encuentre en un rango aceptable.

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

El análisis del nivel de confort ambiental del laboratorio se centra en el estudio de cuatro parámetros diferentes: velocidad del aire, temperatura, humedad relativa y concentración de CO<sub>2</sub>. La velocidad del aire viene predeterminada por una fórmula. La temperatura, que según la época del año tiene un rango diferente, durante los ensayos es de 23-25 grados centígrados. La humedad relativa, a la que le sucede igual que a la temperatura, se encuentra entre 45-60 %. La concentración de CO<sub>2</sub> para la calidad del aire IDA 2 debe estar por debajo de las quinientas partes por millón.

Los datos de los límites de confort se han extraído del Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios (RITE). Los datos obtenidos, proceden del programa ANSYS-FLUENT mediante el comando *Volume Integrals*. La comparación entre ambos se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19. Análisis del nivel de confort de las condiciones climáticas simuladas con CFD. Q Caudal de aire exterior por unidad de superficie, velocidad del aire *v*, temperatura del aire *T*, humedad relativa *HR* y concentración de CO<sub>2</sub> *C*.

	Datos obtenidos				Límites de confort			
	<i>v</i> [m/s]	<i>T</i> [°C]	<i>HR</i> [%]	<i>C</i> [ppm]	<i>v</i> [m/s]	<i>T</i> [°C]	<i>HR</i> [%]	<i>C</i> [ppm]
Fuente					A	B	B	c
1 (07/04/2021)	0,19	21,8	55,88	432	0,118	23-25	45-60	500
2 (07/04/2021)	0,39	21,6	55,85	414	0,116			
3 (13/10/2021)	0,81	24,3	71,3	453	0,143			
4 (22/10/2021)	0,13	24,8	62,7	409	0,148			
5 (22/10/2021)	0,78	23,5	81,4	464	0,135			
Sistema de climatización	0,06	22,3	41,1	432	0,153			

**Fuentes:**

<sup>a</sup> Velocidad media del aire en la zona 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).

<sup>b</sup> Condiciones interiores de diseño, Tabla 1.4.1.1 del RITE (BOE, 2007).

<sup>c</sup> Concentración de CO<sub>2</sub> en los locales ocupados por personas, Tabla 1.4.2.3 (RITE, 2007).

La comparación de los datos muestra el caso cinco como el más desfavorable. La humedad relativa estaba fuera de los límites de confort, esto es debido a que la temperatura y la concentración de vapor de agua eran bastantes altas. Ese día se pudo comprobar en el laboratorio, que a pesar de que la velocidad media en la estancia era la segunda más alta, no fue suficiente para alcanzar los valores necesarios en el interior. La concentración de CO<sub>2</sub> también resultó ser alta debido a que se localizaban tres personas en el interior del laboratorio. Durante la mayor parte de la mañana, la velocidad del aire era bastante baja como se puede observar en el caso 4 favoreciendo la estanqueidad del CO<sub>2</sub>.

Tras a realización de los cinco modelos y viendo cómo se distribuye el flujo, se concluye que el flujo de aire se mueve por difusión de desplazamiento en nuestros casos, facilitando movimiento del aire por convección favoreciendo la ventilación natural y su eficiencia. Tomando el aire la trayectoria de forma que propicie que los contaminantes asciendan o salgan directamente a la salida. No hay una gran agitación del aire evitando así las turbulencias o remolinos creados dentro del laboratorio. Por lo que la calidad del aire en el interior es óptima. En cuanto al ahorro energético es lo óptimo ya que el gasto de energía es cero. Gracias al movimiento del aire y la distribución de las entradas y salidas no hace falta usar mezcladores de aire el inconveniente es que se depende de las condiciones del exterior.

Una vez obtenido el caso más desfavorable, se optó por usarlo para la configuración del sistema de climatización. Se dieron unos valores bastante óptimos en cuanto a humedad, temperatura. La concentración de CO<sub>2</sub> disminuyó debido a la configuración (puerta abierta).

En el caso de la climatización, el flujo se distribuye por difusión por mezcla haciendo que la diferencia de temperatura entre la entrada y el interior se mezcle y se unifiquen las temperaturas.



## 6. Conclusiones

En el presente trabajo se ha medido la capacidad de ventilación del laboratorio de Termotecnia de la Universidad de Almería (1.04 del Edificio Científico Técnico II-A con una superficie de 46,9 m<sup>2</sup>) mediante mediciones experimentales y modelos numéricos. Para visualizar el movimiento de aire en el laboratorio se ha desarrollado un modelo numérico de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), validado mediante mediciones experimentales en cinco casos, con tres configuraciones diferentes de entradas y salidas de aire a través de las ventanas y puerta del laboratorio, respectivamente. Mediante anemómetros y sensores de infrarrojos se han medido los valores de velocidad, temperatura, humedad relativa y concentración de CO<sub>2</sub> en las ventanas por las que entraba el aire y en la puerta de salida. El nivel de confort generado mediante ventilación natural y con el sistema de climatización centralizado existente en el laboratorio se determinó comparando los valores medidos en el laboratorio con los valores recomendados para centros educativos.

De los resultados obtenidos se han podido extraer las siguientes conclusiones:

1º. El nivel de ventilación se mantuvo entre 14,6 y 83,4 renovaciones de aire por hora, muy por encima de los valores recomendados de 5-6 renovaciones de aire por hora para la reducción de la transmisión del SARS-CoV-2 en aulas de enseñanza.

2º. Las concentraciones máximas de CO<sub>2</sub> medidas con tres ocupantes en el laboratorio (15,6 m<sup>2</sup>/persona) variaron entre 414 y 464 ppm, inferiores al límite de 500 ppm establecido en la reglamentación y al valor de 700 ppm considerado como nivel de riesgo en centros educativos.

3º. Las condiciones del aire interior generadas por ventilación natural estuvieron en todos los casos en el rango de confort entre 21 y 26 °C de temperatura y entre 45 y 60% para la humedad relativa.

4º. Los patrones de aire simulados mediante CFD permitieron detectar la existencia de zonas de estancamiento de aire a baja velocidad, principalmente en la zona entre las dos ventanas de entrada del aire y en la esquina sureste del laboratorio.

5º. Los puestos de trabajo de los 3 ocupantes del laboratorio están situados en las zonas de máxima ventilación, reduciendo el riesgo sanitario frente al SARS-CoV-2.

6º. Las simulaciones de CFD mostraron cómo mediante ventilación natural se produjo un movimiento horizontal del aire desde las ventanas hacia la puerta generando una difusión por desplazamiento.

7º. Mediante el sistema de climatización centralizada con una entrada de aire en el centro del techo y dos salidas de retorno en las esquinas, se genera un movimiento principalmente vertical del aire con ventilación por mezcla.



## 7. Integración de las diferentes competencias

Para el desarrollo del trabajo ha sido necesario realizar la medición de todos los elementos existentes dentro del laboratorio donde se han realizado los ensayos. Ha sido necesario representarlos en un modelo geométrico en 3D mediante el programa de Diseño Asistido por Ordenador (CAD) ANSYS-SpaceClaim. Adicionalmente también se han realizado los planos de situación del laboratorio mediante el programa AutoCAD Desk. Mediante estas tareas se han trabajado las competencias de **CTEM001** - *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*. Estas competencias se trabajaron en la asignatura de primer curso de **Expresión gráfica** (44101109) y de tercer curso **Diseño Asistido por Ordenador** (29103211)

Para el análisis de datos obtenidos de las mediciones, se ha usado el programa Excel para el tratamiento y estudio de los mismos. Mediante estas tareas se han trabajado la competencia específica **ECB1** *Capacidad para la resolución de problemas matemáticos que puedan plantearse en la ingeniería. Aptitud para aplicar los conocimientos básicos sobre estadística*. Correspondiente a la asignatura de primer curso: **Estadística** (44101103).

Transferencia de calor y humedad, Cálculo del balance térmico que se produce en un local como consecuencia de los intercambios energéticos que se desarrollan en su interior y con el medio ambiente, Balance térmico en edificios, ahorro y eficiencia energética.

Para el análisis y la interpretación de la transferencia de calor y humedad, el cálculo del balance térmico que se produce en un local como consecuencia de los intercambios energéticos que se desarrollan en su interior y con el medio ambiente, el balance térmico en edificios, y el ahorro y eficiencia energética. Se han desarrollado las competencias mostradas a continuación. Competencias de la rama industrial: **CRI001** - *Conocimientos de termodinámica aplicada y transmisión de calor. Principios básicos y su aplicación a la resolución de problemas de ingeniería*. **CRI010** - *Conocimientos básicos y aplicación de tecnologías medioambientales y sostenibilidad, a través del análisis de los requisitos reglamentarios de los tres primeros apartados del Documento Básico HE-Ahorro de energía del Código Técnico de la Edificación*. Competencias específicas del título: **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*. **CT7** - *Capacidad de analizar y valorar el impacto social y medioambiental de las soluciones técnicas*. Competencias trabajadas en el segundo curso en la asignatura **Termotecnia** (44102202)

Leyes que rigen el comportamiento de los fluidos, flujos permanentes en conducciones forzadas y libres. Se han desarrollado las siguientes competencias: **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*. Competencia desarrollada en la asignatura de segundo curso **Ingeniería Fluido-mecánica** (44102201)

Medida de magnitudes en Ingeniería mecánica, instrumentación y normativa. Se ha aplicado la siguiente competencia específica. **CTEM8**: *Conocimientos aplicados de sistemas y procesos de fabricación, metrología y control de calidad*. Desarrollada en la asignatura de tercer curso **Metrología y Calidad Industrial** (29103223)

Obtención de datos del Código técnico de la Edificación, Documento básico de Salubridad, Documento Básico de Ahorro de Energía. Desarrollando la competencia específica: *Conocimientos y capacidad para el cálculo y diseño de estructuras y construcciones industriales*. Puesta en práctica en la asignatura de cuarto curso **Instalaciones Industriales** (29104221)



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

Las fases del presente trabajo han sido (Tabla 20):

- 1.- Búsqueda de información bibliográfica (enero-marzo 2021).
- 2.- Realización de las medidas geométricas en el laboratorio para generar el modelo geométrico y de las medidas de las variables climáticas para su validación (febrero-abril 2021).
- 3.- Desarrollo del modelo tridimensional del laboratorio mediante ANSYS FLUENT (marzo-abril 2021)
- 4.- Validación del modelo de CFD mediante la comparación de los valores simulados con los medidos en el laboratorio usando ANSYS FLUENT (abril-mayo, septiembre y octubre 2021).
- 5.- Análisis mediante simulaciones de CFD del nivel de confort ambiental generado en el laboratorio (abril-mayo septiembre y octubre 2021).
- 6.- Redacción del trabajo fin de grado (marzo-octubre 2021).

Tabla 20. Cronograma de la realización de actividades.

Año	2021									
Tareas a realizar	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT
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 del confort ambiental con CFD										
6. Redacción del documento										

## 9. Bibliografía

### 9.1. Referencias Bibliográficas

AEP, 2020. Invierno, ventilación y confort térmico en los tiempos de la covid-67: optamos por la sostenibilidad y la resiliencia. Comité de Salud Medioambiental, Asociación Española de Pediatría (AEP).

[https://www.aeped.es/sites/default/files/salud\\_medioambiental\\_escolar\\_confort\\_termico\\_ventilacionv2.pdf](https://www.aeped.es/sites/default/files/salud_medioambiental_escolar_confort_termico_ventilacionv2.pdf).

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](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)

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*. <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/25187>.

Aryal P. y Leephakpreeda T., 2015. CFD Analysis on thermal comfort and energy consumption effected by partitions in air-conditioned building. *Energy Procedia*, **79**: 183-188. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.459>.

Aviv D., Chen K. W., Teitelbaum E., Sheppard D., Pantelic J., Rysanek A, Meggers F., 2021. A fresh (air) look at ventilation for COVID-19: Estimating the global energy savings potential of coupling natural ventilation with novel radiant cooling strategies. *Applied Energy*, **292**, 116848. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116848>.

Calautit J.K., O'Connor D., Tien P.W., Wei S., Pantua C.A.J., Hughes B., 2020. Development of a natural ventilation windcatcher with passive heat recovery wheel for mild-cold climates: CFD and experimental analysis. *Renewable Energy*, **160**, 465-482. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.177>.

Chen Q., 2009. Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications. *Building and Environment*, **44** (4): 848-858. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.05.025>.

Di Gilio A., Palmisani J., Pulimeno M., Cerino F., Cacace M., Miani A., de Gennaro G., 2021. CO<sub>2</sub> 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>.

Gough H.L., Barlow J.F., Luo Z., King M.-F., Halios C.H., Grimmond C.S.B., 2020. Evaluating single-sided natural ventilation models against full-scale idealised measurements: Impact of wind direction and turbulence. *Building and Environment*, **170**, 106556. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106556>.

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>.

Khatri R., Singh A.P. y Khare V.R., 2017. Identification of ideal air temperature distribution using different location for air conditioner in a room integrated with EATHE – A CFD based approach. *Energy Procedia*, **109**: 11-17. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.036>.

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>.

Li Q., Yoshino H., Mochida A., Lei B., Meng Q., Zhao L. y Lun Y., 2009. CFD study of the thermal environment in an air-conditioned train station building. *Building and Environment*, **44** (7): 1452-1465. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.08.010>.

Li W., y Chen Q., 2021. Design-based natural ventilation cooling potential evaluation for buildings in China. *Journal of Building Engineering*, **41**, 102345. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102345>.

Liu W., Liu D., Gao N., 2017. CFD study on gaseous pollutant transmission characteristics under different ventilation strategies in a typical chemical laboratory, *Building and Environment*, **126**, 238-251. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.09.033>.

Mao N., Pan D., Li Z., Xu Y., Song M. y Deng S., 2017. A numerical study on influences of building envelope heat gain on operating performances of a bed-based task/ambient air conditioning (TAC) system in energy saving and thermal comfort. *Applied Energy*, **192**: 213-221. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.027>.

Monge-Barrio A., Bes-Rastrollo M., Dorregaray-Oyaregui S., González-Martínez P., Martín-Calvo N., López-Hernández D., Arriazu-Ramos A., Sánchez-Ostiz A., 2021. Encouraging natural ventilation to improve indoor environmental conditions at schools. Case studies in the north of Spain before and during COVID, *Energy and Buildings*, 111567. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111567>.

Omrani S., Garcia-Hansen V., Capra B. R., Drogemuller R., 2017. Effect of natural ventilation mode on thermal comfort and ventilation performance: Full-scale measurement, *Energy and Buildings*, **156**, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.061>.

Shan X., Luo N., Sun K., Hong T., Lee Y.-K. y Lu W.-Z., 2020. Coupling CFD and building energy modelling to optimize the operation of a large open office space for occupant comfort. *Sustainable Cities and Society*, **60**: 102257. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102257>.

Srivastava S., Zhao X., Manay A., Chen Q., 2021. Effective ventilation and air disinfection system for reducing coronavirus disease 2019 (COVID-19) infection risk in office buildings, *Sustainable Cities and Society*, **75**, 103408. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103408>.

Tsou J.Y., 2001. Strategy on applying computational fluid dynamic for building performance evaluation. *Automation in Construction*, **10** (3): 327-335. [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(00\)00049-2](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(00)00049-2).

Xu F., Xu S., Passe U., Ganapathysubramanian B., 2021. Computational study of natural ventilation in a sustainable building with complex geometry. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **45**, 101153. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101153>.

Yoon N., Norford L., Malkawi A., Samuelson H., Piette M. A., 2020. Dynamic metrics of natural ventilation cooling effectiveness for interactive modeling. *Building and Environment*, **180**, 106994. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106994>.

Zhang X., Weerasuriya A.U., Tse K.T., 2020. CFD simulation of natural ventilation of a generic building in various incident wind directions: Comparison of turbulence modelling, evaluation methods, and ventilation mechanisms, *Energy and Buildings*, **229**, 110516. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110516>.

## 9.2. Normativa

ANSYS, 2013. Theory guide ANSYS-FLUENT, **814**. <http://www.ansys.com>.

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>.

IDAEA-CSIC, 2021. Guía para ventilación en aulas. Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC). Medida. 43 pp. [https://www.ciencia.gob.es/stfls/MICINN/Ministerio/FICHEROS/guia\\_para\\_ventilacion\\_en\\_aulas\\_csi\\_c.pdf](https://www.ciencia.gob.es/stfls/MICINN/Ministerio/FICHEROS/guia_para_ventilacion_en_aulas_csi_c.pdf).

MITECO, 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. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). <https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/medidas-covid19/sistemas-climatizacion-ventilacion/default.aspx>.

## 9.3. Páginas web

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](https://www.youtube.com/watch?v=oKugWlcl18c&ab_channel=FSC-CCOO) (Visto 20/10/2021).

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 22/10/2021)

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 23/09/2021)

Segura J. A., 2021. COVID-19. Importancia de la ventilación en espacios cerrados. <https://revistamedica.com/covid-19-importancia-ventilacion/> (Visto 19/09/2021)

Ventilación contra el COVID-19. CANAL ENFERMERO – CONSEJO GENERAL ENFERMERÍA. *YouTube*. [https://www.youtube.com/watch?v=5wT5Pcg9lBw&ab\\_channel=CANALENFERMERO-ConsejoGeneralEnfermer%C3%ADa](https://www.youtube.com/watch?v=5wT5Pcg9lBw&ab_channel=CANALENFERMERO-ConsejoGeneralEnfermer%C3%ADa) (Visto 20/10/2021).



## **10. Planos**

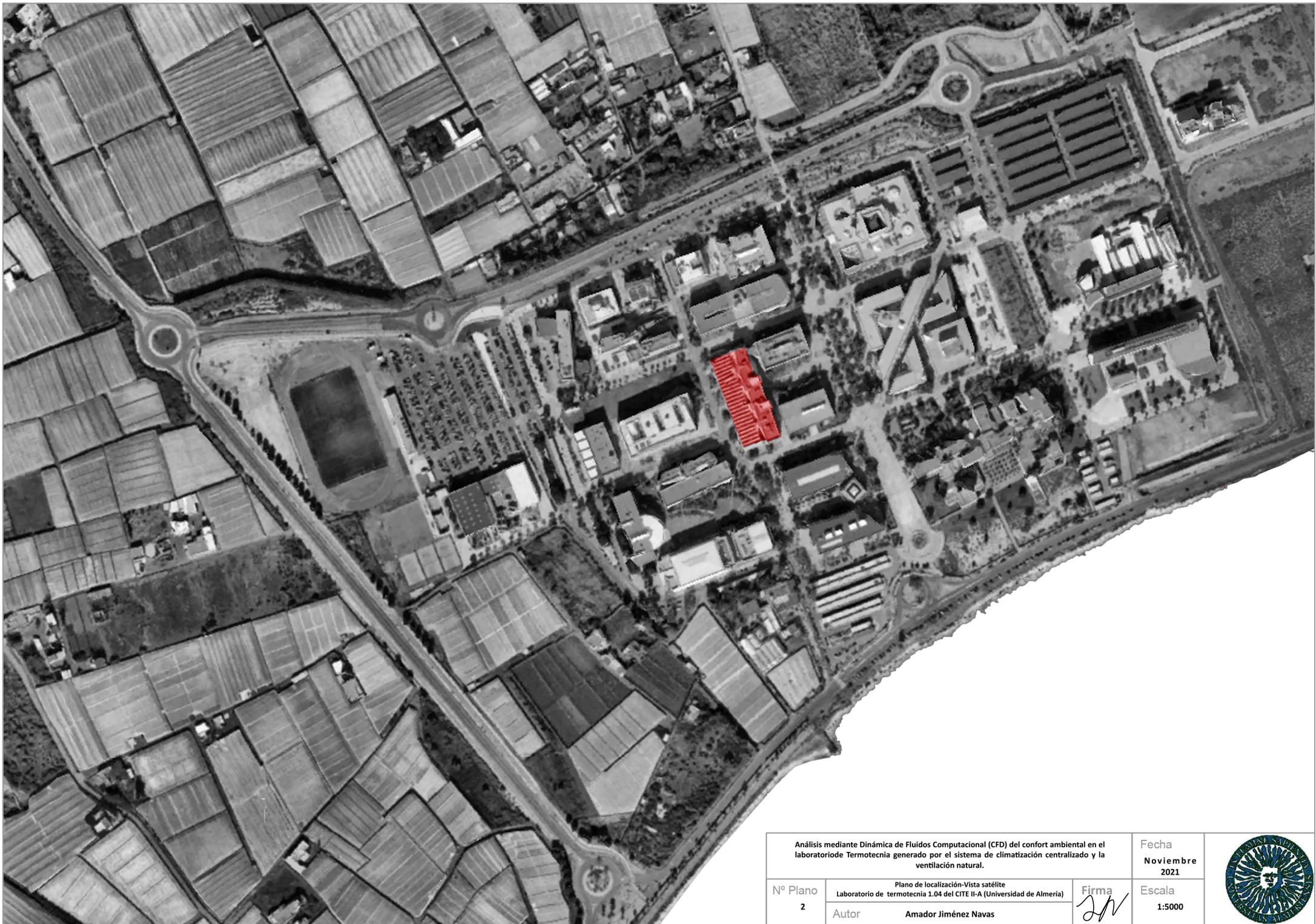
**10.1. Plano de localización-Vista satélite. E 1:25000.**

**10.2. Plano de localización-Vista satélite. Laboratorio de termotecnia 1.04 del CITE II-A (Universidad de Almería). E 1:5000.**

**10.3. Plano laboratorio de termotecnia 1.04 del CITE II-A de la Universidad de Almería E 1:50.**



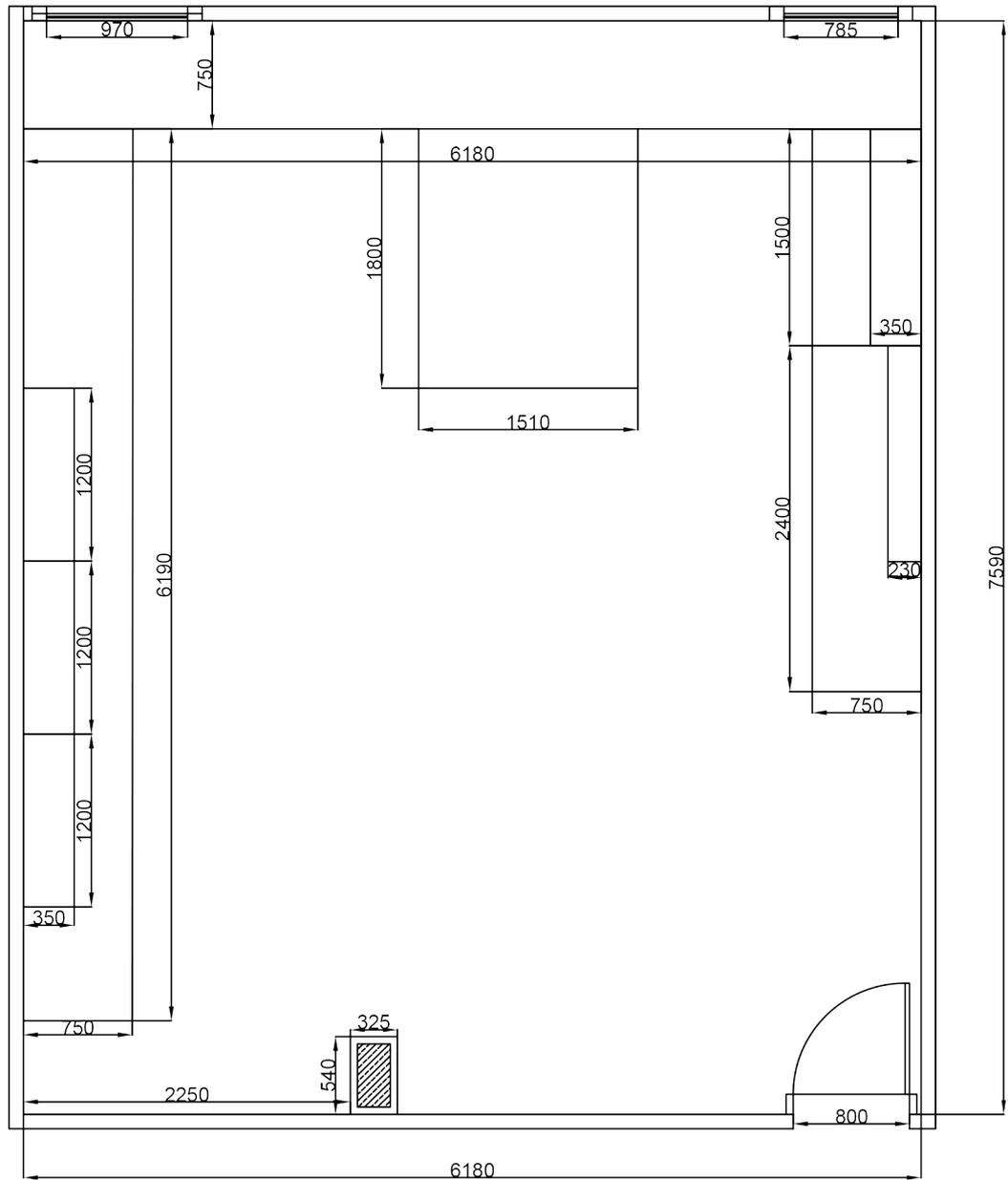
Análisis mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) del confort ambiental en el laboratorio de Termotecnia generado por el sistema de climatización centralizado y la ventilación natural.		Fecha Noviembre 2021	
Nº Plano 1	Plano de localización-Vista satélite	Escala 1:25000	
Autor Amador Jiménez Navas		Firma <i>AN</i>	



Análisis mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) del confort ambiental en el laboratorio de Termotecnia generado por el sistema de climatización centralizado y la ventilación natural.		Fecha Noviembre 2021
Nº Plano 2	Plano de localización-Vista satélite Laboratorio de termotecnia 1.04 del CITE II-A (Universidad de Almería)	Firma 
Autor Amador Jiménez Navas		Escala 1:5000







Análisis mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) del confort ambiental en el laboratorio de Termotecnia generado por el sistema de climatización centralizado y la ventilación natural.

Fecha  
 Noviembre  
 2021

Nº Plano  
 3

Plano laboratorio de termotecnia 1.04 del CITE II-A de la  
 Universidad de Almería

Firma

Escala  
 1:50 (mm)

Autor  
 Amador Jiménez Navas





## Anexo A. Tiempos de medida de los ensayos experimentales.

Tabla A1. Tiempos de medida de los diferentes puntos en el ensayo 1 del día 07/04/2021.

Punto	Hora inicio	Hora fin
1	10:57:00	10:58:59
2	10:59:00	11:00:59
3	11:02:00	11:03:59
4	11:04:00	11:06:59
5	11:08:00	11:09:59
6	11:10:00	11:11:59
7	11:12:00	11:13:59
8	11:14:00	13:15:59

Tabla A2. Tiempos de medida de los diferentes puntos en el ensayo 2 del día 07/04/2021.

Punto	Hora inicio	Punto	Hora de inicio
VS1 y P1	12:51:00	VN1 y P	13:00:00
VS2 y P2	12:52:00	VN2 y P	13:01:00
VS3 y P3	12:53:00	VN3 y P	13:02:00
VS4 y P4	12:54:00	VN4 y P	13:03:00
VS5 y P5	12:55:00	VN5 y P	13:05:00
VS6 y P6	12:56:00	VN6 y P	13:06:00
VS7 y P7	12:57:00	VN7 y P	13:07:00
VS8 y P8	12:58:00	VN8 y P	13:08:00

Tabla A3. Tiempos de medida de los diferentes puntos en el ensayo 3 del día 13/10/2021.

Punto	Hora inicio	Hora fin	Punto	Hora inicio	Hora fin
VS1 y P1	12:58:00	12:59:59	VN1 y P1	13:39:00	13:40:59
VS2 y P2	13:01:00	13:02:59	VN2 y P2	13:42:00	13:43:59
VS3 y P3	13:08:00	13:09:59	VN3 y P3	13:50:00	13:51:59
VS4 y P4	13:04:00	13:05:59	VN4 y P4	13:47:00	13:48:59
VS5 y P5	13:11:00	13:12:59	VN5 y P5	13:53:00	13:54:59
VS6 y P6	13:14:00	13:15:59	VN6 y P6	13:56:00	13:57:59
VS7 y P7	13:21:00	13:22:59	VN7 y P7	14:03:00	14:04:59
VS8 y P8	13:18:00	13:19:59	VN8 y P8	13:59:00	14:01:59

Tabla A4. Tiempos de medida de los diferentes puntos en el ensayo 4 del día 22/10/2021.

Punto	Hora inicio	Hora fin	Punto	Hora inicio	Hora fin
VS1 y P9	11:37:00	11:38:59	VN1 y P1	11:07:00	11:08:59
VS2 y P10	11:40:00	11:41:59	VN2 y P2	11:10:00	11:11:59
VS3 y P11	11:51:00	11:52:59	VN3 y P3	11:17:00	11:18:59
VS4 y P12	11:44:00	11:45:59	VN4 y P4	11:14:00	11:15:59
VS5 y P13	11:54:00	11:55:59	VN5 y P5	11:20:00	11:21:59
VS6 y P14	11:57:00	11:58:59	VN6 y P6	11:23:00	11:24:59
VS7 y P15	12:04:00	12:05:59	VN7 y P7	11:30:00	11:31:59
VS8 y P16	12:00:00	12:01:59	VN8 y P8	11:27:00	11:28:59

**Tabla A5. Tiempos de medida de los diferentes puntos en el ensayo 5 del día 22/10/2021.**

<b>Punto</b>	<b>Hora inicio</b>	<b>Hora fin</b>	<b>Punto</b>	<b>Hora inicio</b>	<b>Promedio</b>
<b>VS1 y P1</b>	12:23:00	12:24:59	<b>VN1 y P9</b>	12:51:00	12:52:59
<b>VS2 y P2</b>	12:28:00	12:29:59	<b>VN2 y P10</b>	12:54:00	12:55:59
<b>VS3 y P3</b>	12:34:00	12:35:59	<b>VN3 y P11</b>	13:00:00	13:01:59
<b>VS4 y P4</b>	12:31:00	12:32:59	<b>VN4 y P12</b>	12:57:00	12:58:59
<b>VS5 y P5</b>	12:37:00	12:38:59	<b>VN5 y P13</b>	13:03:00	13:04:59
<b>VS6 y P6</b>	12:40:00	12:41:59	<b>VN6 y P14</b>	13:06:00	13:07:59
<b>VS7 y P7</b>	12:46:00	12:47:59	<b>VN7 y P15</b>	13:12:00	13:13:59
<b>VS8 y P8</b>	12:43:00	12:44:59	<b>VN8 y P16</b>	13:09:00	13:10:59

## **Anexo B. Datos técnicos de los equipos de medida.**

## Instrumentos para climatización

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

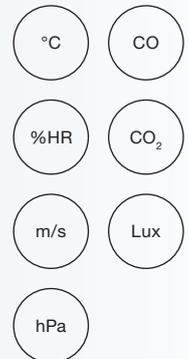
Intuitivo: menús de medición claramente estructurados para las aplicaciones más importantes

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
<b>Temperatura (NTC)</b>		
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	
<b>Temperatura (TC)</b>		
Rango de medición	-200 ... +1370 °C	
Exactitud (±1 dígito)	±(0,3 °C + 0,1 % del v.m.)	
Resolución	0,1 °C	
<b>Presión diferencial</b>		
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
<b>Entradas para sondas</b>		
TP tipo K	1x	
NTC TUC / sonda digital con cable	1x	
Sonda Bluetooth	1x sonda digital Bluetooth o una testo Smart Probe	
Presión diferencial	-	+
<b>Datos técnicos</b>		
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
<b>Sondas de velocidad digitales</b>					
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) <sup>3)</sup> ±2,0 %HR (35 ... 65 %HR) <sup>3)</sup> ±3,0 %HR (65 ... 90 %HR) <sup>3)</sup> ±5 %HR (rango restante) <sup>3)</sup> ±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
<b>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.</b>					
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.**

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

<sup>3)</sup> 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
<b>Sondas de humedad digitales</b>					
Sonda de temperatura y humedad con Bluetooth		0 ... 100 %HR -20 ... +70 °C	±2 %HR (5 ... 90 %HR) <sup>3)</sup> ±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) <sup>3)</sup> ±(1,0 %HR + 0,7 % del v.m.) (90 ... 100 %HR) <sup>3)</sup> ±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) <sup>3)</sup> ±2 %HR (2,1 ... 98 %HR) <sup>3)</sup> ±3 %HR (98,1 ... 100 %HR) <sup>3)</sup> ±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
<b>Sondas de nivel de confort digitales</b>					
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 <sub>2</sub> con Bluetooth® incl. sensor de humedad y temperatura		0 ... 10 000 ppm CO <sub>2</sub> 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) <sup>3)</sup> ±2 %HR (35 ... 65 %HR) <sup>3)</sup> ±3 %HR (65 ... 90 %HR) <sup>3)</sup> ±5 %HR (rango restante) <sup>3)</sup> ±0,5 °C ±3 hPa	1 ppm 0,1 %HR 0,1 °C	0632 1551
Sonda de CO <sub>2</sub> , con cable, incl. sensor de humedad y temperatura					0632 1552
Cabezal de la sonda de CO <sub>2</sub> , 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
<b>Empuñaduras para sonda, y adaptador</b>					
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

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

<sup>3)</sup> 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
<b>NEW</b> 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
<b>NEW</b> 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 CO<sub>2</sub>

**testo 535 - Monitorización fiable de la calidad del aire interior**

---

Medición de CO<sub>2</sub> 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  
CO<sub>2</sub>

Una mala calidad del aire dentro de los edificios debido a concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub> (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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 <sub>2</sub>
Exactitud ±1 dígito	±(75 ppm CO <sub>2</sub> +3 % del v.m.) (0 ... +5000 ppm CO <sub>2</sub> ) ±(150 ppm CO <sub>2</sub> +5 % del v.m.) (+5001 ... +9999 ppm CO <sub>2</sub> )
Resolución	1 ppm CO <sub>2</sub>

#### Datos técnicos generales

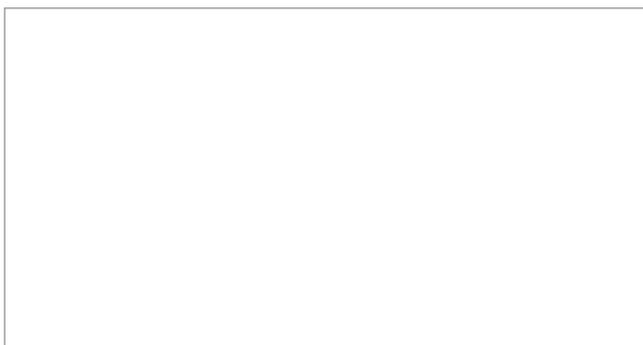
Medio de medición	Aire
Temperatura de servicio	0 ... +50 °C
Temperatura de almacenamiento	-20 ... +70 °C
Tipo de pila	Pila cuadrada de 9 V
Tiempo de operatividad	6 h
Medidas	190 × 57 × 42 mm
Peso	300 g
Pantalla	LCD de 2 líneas
Material de la carcasa	ABS
Auto-Off	10 min

#### 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 <sub>2</sub> Sondas de CO <sub>2</sub> ; 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 $\mu\text{m}$
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

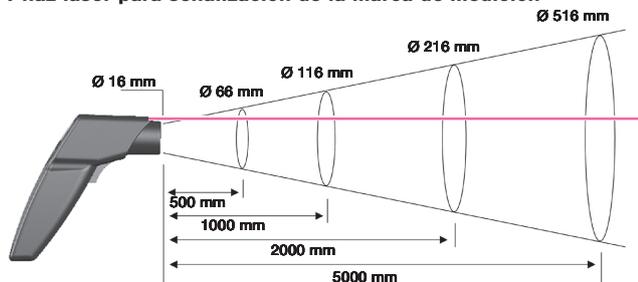
### Datos técnicos individuales

	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 $\pm 1$ dígito			
Infrarrojos	$\pm 1.5$ °C o 1.5 % del v.m. (+0.1 ... +400 °C) $\pm 2$ °C o $\pm 2$ % del v.m. (-30 ... 0 °C) se aplica el valor mayor	$\pm 1.5$ °C o $\pm 1.5$ % del v.m. (+0.1 ... +400 °C) $\pm 2$ °C o $\pm 2$ % del v.m. (-30 ... 0 °C) se aplica el valor mayor	$\pm 1.5$ °C (-20 ... 0 °C) $\pm 2$ °C (-30 ... -20,1 °C) $\pm 1$ °C o 1 % del v.m. (rango restante)
Tipo K (NiCr-Ni)	-	$\pm 0.5$ °C +0.5% del v.m.	$\pm 0.5$ °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

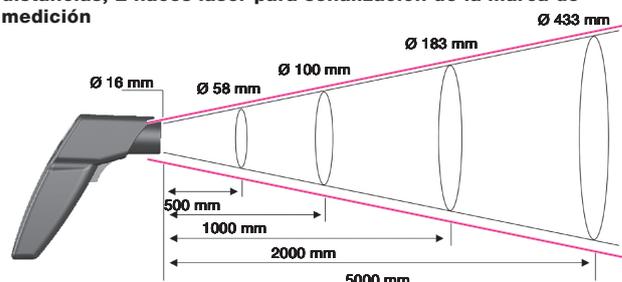
## testo 830-T1

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



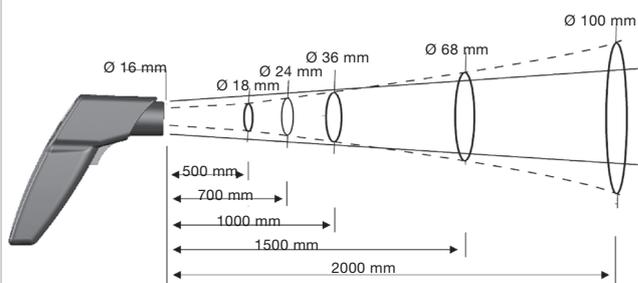
## testo 830-T2

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

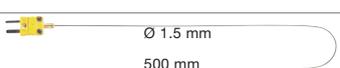
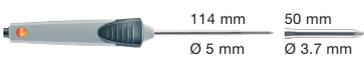


# Accesorios

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

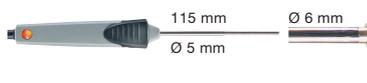
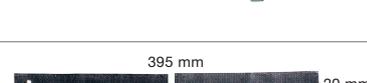
Accesorios para testo 830-T2 /-T4	Modelo
Certificado de calibración ISO de temperatura, instrumentos de medición con sondas de superficie; puntos de calibración +60 °C; +120 °C; +180 °C	0520 0071
Certificado de calibración ISO de temperatura, para sondas aire/inmersión, punto de calibración +60 °C	0520 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 <sub>99</sub>	Modelo
<b>Sondas de ambiente</b>					
Sonda de aire resistente, T/P tipo K, Cable fijo 1.2 m		-60 ... +400 °C	Clase 2*	25 s	0602 1793
<b>Sondas de inmersión/penetración</b>					
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
<b>Sondas para alimentación</b>					
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 <sub>máx</sub> 230°C, p.ej. para controlar la t <sup>a</sup> del aceite de cocinar, T/P tipo K, Cable fijo		-50 ... +230 °C	Clase 1*	15 s	0628 1292
<b>Termopares</b>					
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 <sub>99</sub>	Modelo
<b>Sondas de superficie</b>					
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](http://www.testo.es)



## Resumen/Abstract

En el presente trabajo se ha medido la capacidad de ventilación del laboratorio de Termotecnia de la Universidad de Almería (1.04 del Edificio Científico Técnico II-A con una superficie de 46,9 m<sup>2</sup>) mediante mediciones experimentales y modelos numéricos. Del mismo modo se ha analizado el nivel de confort generado mediante ventilación natural y con el sistema de climatización centralizado existente en el laboratorio. Para ello se han comparado los valores medios de velocidad, temperatura, humedad relativa y concentración de CO<sub>2</sub> del aire interior con los valores recomendados para centros educativos. Además, la medida del nivel de CO<sub>2</sub> se puede utilizar como elemento de control del riesgo para la transmisión de Sars-CoV-2 transportado por el aire.

Para visualizar el movimiento de aire en el laboratorio se ha desarrollado un modelo numérico de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), validado mediante mediciones experimentales en cinco casos, con tres configuraciones diferentes de entradas y salidas de aire a través de las ventanas y puerta del laboratorio, respectivamente. Las simulaciones se han realizado con el programa de CFD ASYNYS-FLUENT versión 2021. Los ensayos experimentales consistieron en la medida de la velocidad del aire en las ventanas y en la puerta mediante anemómetros de hilo y de esfera caliente. Simultáneamente se midieron los valores de temperatura, humedad absoluta y concentración de CO<sub>2</sub> del aire. Para establecer las condiciones de contorno del modelo de CFD se midieron las temperaturas superficiales con un sensor de infrarrojos.

Mediante las mediciones experimentales realizadas se ha podido observar como el nivel de ventilación ha variado entre 14,6 y 83,4 renovaciones de aire por hora (correspondiendo a caudales en la puerta de 0,56 y 3,21 m<sup>3</sup>/s, para un volumen del aula de 138,4 m<sup>3</sup>). Estos valores se sitúan muy por encima de los valores recomendados de 5-6 renovaciones de aire por hora para la reducción de la transmisión del SARS-CoV-2 en aulas de enseñanza. Con una ocupación de 3 personas (15,6 m<sup>2</sup>/persona) las temperaturas han estado en todos los casos en el rango adecuado entre 21 y 26 °C y la humedad relativa entre 45 y 60% y las concentraciones de CO<sub>2</sub> por debajo de 500 ppm.

Los patrones de aire simulados mediante CFD permitieron detectar la existencia de zonas de estancamiento de aire a baja velocidad, principalmente en la zona entre las dos ventanas de entrada del aire. También se pudo visualizar la interacción entre el aire respirado por las personas que expulsan CO<sub>2</sub> y humedad. De igual forma se observó como mediante ventilación natural se genera una difusión por mezcla mediante la cual el aire se mueve horizontalmente desde las ventanas por las que entra el aire en la pared oeste hasta la puerta situada e la pared este. Mediante el sistema de climatización centralizada con una entrada de aire en el centro del techo y dos salidas de retorno en las esquinas, se genera un movimiento principalmente vertical del aire. Se produce en este caso una ventilación por desplazamiento mediante la cual el aire que inicialmente desciende en el centro del laboratorio se calienta desplazándose hacia la parte superior, evacuando el calor y las sustancias contaminantes hacia el techo.

In the present work, the ventilation capacity of the laboratory of Thermotechnic of the University of Almería (1.04 of the Technical Scientific Building II-A with an area of 46.9 m<sup>2</sup>) has been measured by means of experimental measurements and numerical models. In the same way, the level of comfort generated by natural ventilation and with the centralized air conditioning system existing in the laboratory has been analysed. To this end, the average values of velocity, temperature, relative humidity and CO<sub>2</sub> concentration of indoor air have been compared with the recommended values for educational centres. In addition, the measurement of the CO<sub>2</sub> level can be used as a risk control element for the transmission of airborne Sars-CoV-2.

To visualize the movement of air in the laboratory, a numerical model of Computational Fluid Dynamics (CFD) has been developed. The model was validated by experimental measurements in five cases, with three different configurations of air inlets and outlets through the windows and door of the laboratory, respectively. The simulations have been carried out with the CFD program ASYNYS-FLUENT version 2021. Experimental tests consisted of measuring the air velocity in the windows and door using wire and hot sphere anemometers. Simultaneously, the values of temperature, absolute humidity and CO<sub>2</sub> concentration of the air were measured. To establish the boundary conditions of the CFD model, surface temperatures were measured with an infrared sensor.

Through the experimental measurements carried out, it has been possible to observe how the level of ventilation ranged between 14.6 and 83.4 air renewals per hour (corresponding to airflows at the door of 0.56 and 3.21 m<sup>3</sup>/s, for a classroom volume of 138.4 m<sup>3</sup>). These values are well above the recommended values of 5-6 air renewals per hour for the reduction of SARS-CoV-2 transmission in classrooms. With an occupancy of 3 people (15.6 m<sup>2</sup>/person) temperatures have in all cases been in the appropriate range between 21 and 26 °C and relative humidity between 45 and 60% and CO<sub>2</sub> concentrations below 500 ppm.

The air patterns simulated by CFD allowed to detect the existence of areas of air stagnation low low speed, mainly in the area between the two air intake windows. It was also possible to visualize the interaction between the air breathed by people who expel CO<sub>2</sub> and humidity. In the same way, it was observed how through natural ventilation a diffusion is generated by mixture by means of which the air moves horizontally from the windows through which the air enters on the west wall to the door located on the east wall. Through the centralized air conditioning system with an air intake in the centre of the roof and two return outlets in the corners, a vertical movement of the air is generated. In this case, a displacement ventilation occurs by means of which the air that initially descends in the centre of the laboratory is heated by moving towards the top, evacuating heat and polluting substances to the ceiling.