



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

Simulación numérica de la probabilidad de  
transmisión por aerosoles de la COVID-19 en  
espacios cerrados

Numerical simulation of the probability of  
COVID-19 aerosol transmission in enclosed  
spaces

Autor/es

Alejandro Jesús Morales Cabodevilla

Director/es

Norberto Fueyo Díaz

Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
2021



# AGRADECIMIENTOS

---

Estas líneas servirán para agradecer tanto a aquellas personas que han colaborado conmigo en este proyecto, como a aquellas que han sido importantes para mí en estos últimos años en los que he cursado este grado.

Mi agradecimiento, en primer lugar, a Norberto Fueyo Díaz por su disposición y ayuda a lo largo de estos meses que ha durado el proyecto, así como sus enseñanzas y el hecho de haber hecho posible la realización de este proyecto.

A los miembros del Área de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Zaragoza, Ana Cubero y Guillermo Güemes por su colaboración, involucración y ayuda en todo momento durante la realización de este proyecto.

Por último, me gustaría agradecer a mis padres, Tomás y Pilar, por su acompañamiento y apoyo incondicional durante toda esta etapa de mi vida, así como demás familia, amigos y compañeros de grado.



## RESUMEN

---

Durante el mes de febrero del año 2020, la Organización Mundial de la Salud identifica como COVID-19 una enfermedad respiratoria aguda que rápidamente se propaga por todo el mundo generando una profunda crisis social y económica.

Este proyecto nace de las restricciones impuestas tras la pandemia para el control y la regulación de aforos, tanto interiores como exteriores, en comercios de hostelería o restauración, basándose en un caso real de uno de los muchos locales hosteleros del municipio de Zaragoza, España.

En el trabajo se investigará un procedimiento para el cálculo de la transmisión de COVID-19 en espacios interiores mediante la simulación del transporte de aerosoles y el cálculo de la probabilidad de transmisión como función de las condiciones de ventilación.

Para la realización de este proyecto se ha procedido al desarrollo la geometría en tres dimensiones del local “Sala Chocolat” de Zaragoza mediante el programa SolidWorks y a continuación, mediante CFD se ejecutará el análisis para la solución de las ecuaciones de transporte relevantes, así como el estudio de la probabilidad de contagio cuando existe un individuo contagioso.

## ABSTRACT

---

During February 2020, the World Health Organization identifies as COVID-19 an acute respiratory disease that rapidly spreads throughout the world, generating a deep social and economic crisis.

This project was born from the restrictions imposed after the pandemic for the control and regulation of capacity, both indoors and outdoors, in hotel and catering businesses, based on a real case of one of the many locations in the municipality of Zaragoza, Spain.

The work will investigate a procedure for the calculation of COVID-19 transmission in indoor spaces by simulating the transport of aerosols and calculating the probability of transmission as a function of ventilation conditions.

To carry out this project, the three-dimensional geometry of the “Sala Chocolat” store in Zaragoza has been developed using the SolidWorks program and then, using CFD, the analysis will be carried out to solve the relevant transport equations as well as the study of the probability of contagion when there is a contagious individual.



# INDICE GENERAL

---

1 INTRODUCCION .....	12
1.1 OBJETIVO .....	13
1.2 CAMPO DE ESTUDIO .....	13
2 TEORIA .....	16
2.1 AEROSOLES .....	16
2.2 QUANTA .....	18
2.3 PROBABILIDAD CONTAGIO .....	18
2.4 MECANICA COMPUTACIONAL .....	19
3 PROBLEMA .....	23
3.1 DESCRIPCION DEL PROBLEMA .....	23
3.2 MODELO GEOMETRICO .....	25
3.2.1 MODELADO SALA .....	26
3.2.2 MODELADO DE PERSONAS .....	28
3.2.3 OBTENCION DEL VOLUMEN FLUIDO .....	29
3.3 MALLADO .....	31
3.4 CONDICIONES DE CONTORNO .....	33
3.5 METODO DE RESOLUCION CFD .....	36
3.5.1 RESOLUCION DEL MODELO ESTACIONARIO .....	37
3.5.2 RESOLUCION DEL MODELO TRANSITORIO .....	38
4 ANALISIS DE RESULTADOS .....	42
5 CONCLUSIONES .....	57
6 BIBLIOGRAFIA .....	60
7 ANEXOS .....	62
ANEXO 1 .....	62
ANEXO 2 .....	68

ANEXO 3 .....	74
ANEXO 4 .....	76
ANEXO 5 .....	79
ANEXO 6 .....	94



## INDICE DE IMAGENES

---

*Imagen 1. Gráfica temporal de ppm de CO<sub>2</sub> con personas en el interior. Fuente: “Medidas de ventilación y CO<sub>2</sub> en establecimientos de hostelería” LIFTEC.*

*Imagen 2. Plano de la sala Chocolat, donde se ha añadido en trazo azul el circuito de extracción (con la posición de las 8 rejillas marcadas con rectángulos). La superficie estudiada en estas pruebas se ha delimitado con trazo rojo, comprendiendo un total de 129 m<sup>2</sup>. Fuente: LIFTEC.*

*Imagen 3. Diseño final de cuerpos. Fuente: elaboración propia.*

*Imagen 4. Vista de planta con la posición de los sensores de medición de CO<sub>2</sub>. Fuente: LIFTEC.*

*Imagen 5. Vista isométrica de líneas de flujo estilo “semáforo” para el caso en estado transitorio con puerta CERRADA. Fuente: elaboración propia.*

*Imagen 6. Vista en planta de líneas de flujo estilo “semáforo” para el caso en estado transitorio con puerta CERRADA. Fuente: elaboración propia.*

*Imagen 7. Vista isométrica de líneas de flujo estilo “semáforo” para el caso en estado transitorio con puerta ABIERTA. Fuente: elaboración propia.*

*Imagen 8. Vista en planta de líneas de flujo estilo “semáforo” para el caso en estado transitorio con puerta ABIERTA. Fuente: elaboración propia.*

*Imagen 9. Temperatura del techo para el caso en estado transitorio con la puerta ABIERTA. Fuente: elaboración propia.*

*Imagen 10. Temperatura del techo para el caso en estado transitorio con la puerta CERRADA. Fuente: elaboración propia.*

*Imagen 11. Temperatura del suelo para el caso en estado transitorio con la puerta ABIERTA. Fuente: elaboración propia.*

*Imagen 12. Temperatura del suelo para el caso en estado transitorio con la puerta ABIERTA. Fuente: elaboración propia.*

*Imagen 13. Distribución de los sensores de medición de CO<sub>2</sub> en la sala divididos por zonas. Fuente: “Medidas de ventilación y CO<sub>2</sub> en establecimientos de hostelería” LIFTEC.*

*Imagen 14. Gráfica temporal de ppm de CO<sub>2</sub> con personas en el interior por sensores. Fuente: “Medidas de ventilación y CO<sub>2</sub> en establecimientos de hostelería” LIFTEC.*

*Imagen 15. Gráfica temporal de ppm de CO<sub>2</sub> con personas en el interior por zonas. Fuente: “Medidas de ventilación y CO<sub>2</sub> en establecimientos de hostelería” LIFTEC.*

*Imagen 16. Gráfica temporal de ppm de CO<sub>2</sub> con personas en el interior por zonas. Fuente: Elaboración propia.*

*Imagen 17. Gráfica temporal de ppm de CO<sub>2</sub> con personas en el interior por zonas. Fuente: Elaboración propia.*

*Imagen 18. Comparación temporal entre experimental y computacional de ppm de CO<sub>2</sub> con personas en el interior por zonas. Fuente: Elaboración propia.*

*Imagen 19. Distribución de la concentración de CO<sub>2</sub> en el instante t = 0 minutos. Fuente: elaboración propia.*

*Imagen 20. Distribución de la concentración de CO<sub>2</sub> en el instante t = 8 minutos. Fuente: elaboración propia.*

*Imagen 21. Distribución de la concentración de CO<sub>2</sub> en el instante t = 15 minutos. Fuente: elaboración propia.*

*Imagen 22. Distribución de la concentración de CO<sub>2</sub> en el instante t = 26 minutos. Fuente: elaboración propia.*

*Imagen 23. Distribución de la concentración de CO<sub>2</sub> en el instante t = 38 minutos. Fuente: elaboración propia.*

*Imagen 24. Distribución de la concentración de CO<sub>2</sub> en el instante t = 49 minutos. Fuente: elaboración propia.*

*Imagen 25. Distribución de la concentración de CO<sub>2</sub> en el instante t = 58 minutos. Fuente: elaboración propia.*

*Imagen 26. Distribución de la concentración de CO<sub>2</sub> en el instante t = 70 minutos. Fuente: elaboración propia.*

*Imagen 27. Distribución de la concentración de CO<sub>2</sub> en el instante t = 88 minutos. Fuente: elaboración propia.*

*Imagen 28. Distribución de los cuerpos en la sala. La flecha amarilla indica el individuo contagioso. Fuente: elaboración propia.*

*Imagen 29. Distribución de la probabilidad de contagio, en porcentaje, en el instante t = 0 minutos. Fuente: elaboración propia.*

*Imagen 30. Distribución de la probabilidad de contagio, en porcentaje, en el instante t = 30 minutos. Fuente: elaboración propia.*

*Imagen 31. Distribución de la probabilidad de contagio, en porcentaje, en el instante t = 57 minutos. Fuente: elaboración propia.*

*Imagen 32. Distribución de la probabilidad de contagio, en porcentaje, en el instante t = 88 minutos, inicializado a los 58 minutos. Fuente: elaboración propia.*

## INDICE DE TABLAS

---

*Tabla 1. Resumen de los caudales de extracción en distintas unidades a partir de los datos de LIFTEC. Fuente: elaboración propia.*

*Tabla 2. Errores por zonas entre los estudios experimentales y computacionales. Fuente: elaboración propia.*



# 1 INTRODUCCION

---

Durante el mes de diciembre de 2019 es identificada por primera vez una enfermedad respiratoria aguda causada por un nuevo coronavirus (SARS-CoV-2) en Wuhan, provincia de Hubei, China y rápidamente se propaga por todo el mundo. En febrero del año 2020, la Organización Mundial de la Salud designa esta enfermedad como COVID-19, que significa enfermedad por coronavirus 2019.

El día 14 de marzo del año 2020 se declara el Estado de Alarma en el territorio español para afrontar esta situación de emergencia sanitaria. Durante este periodo se decretó, con objetivo de proteger la salud de los ciudadanos y de contener la progresión de la enfermedad, la restricción de la circulación de los ciudadanos y la regulación de la apertura de la hostelería, restauración y locales de actividades culturales, deportivas y similares.

El día 21 de junio de 2020 termina el confinamiento, que imponía la última prórroga de estado de alarma, que decretaba una cuarentena nacional y comienza así el periodo conocido como nueva normalidad.

Este periodo de nueva normalidad trajo consigo una serie de medidas para controlar la pandemia que afectaban, entre otros muchos sectores, a la hostelería. Estas medidas, o mejor, estas restricciones, obligaron tanto a respetar un horario establecido como a la reducción de los aforos, interiores y exteriores, que es la restricción principal en la que se va a basar este trabajo.

Esta situación ha invitado a la elaboración de numerosos estudios sobre la propagación y transmisión del virus y que demuestran que los aerosoles exhalados por personas infectadas son un importante vector de contagio. Por ello, se ha procedido a evaluaciones de la calidad del aire existente en todos los espacios sociales, sobre todo cerrados, donde se pueden juntar las personas, ya que se ha demostrado que un ambiente saludable y bien ventilado es fundamental para la prevención de infecciones por vía aérea.

La elaboración de este proyecto se ha basado en uno de los estudios mencionados anteriormente, elaborado por el Laboratorio de Investigación en Fluidodinámica y Tecnologías de la Combustión (LIFTEC), un centro mixto en el que participan la Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas CSIC y la Universidad de Zaragoza, y que consiste en un estudio de la calidad del aire de un local del municipio de Zaragoza.

El presente proyecto tratará de contrastar los resultados, obtenidos de manera experimental por LIFTEC, mediante el análisis de manera computacional del mismo local de hostelería. La herramienta de utilización para este análisis será el software de simulación CFD, ANSYS Fluent.

El objetivo de este trabajo es mostrar cómo la Ecuación de transporte para la concentración de quanta del virus puede ser resuelta por la dinámica de fluidos computacional (CFD), proporcionando así la medición de la distribución del virus en una habitación y su interacción con los patrones de ventilación de la habitación. Se va a aplicar esta metodología al análisis del flujo de aire en un local de hostelería del municipio de Zaragoza, España, con presencia de algún individuo contagioso. Para finalizar, se ampliará la metodología para calcular la probabilidad de contagio en cada lugar del local.

## 1.1 OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto será la elaboración de un modelo de simulación del aire del local escogido que permita conocer el comportamiento de este teniendo en cuenta la capacidad del sistema de extracción del local. De esta forma se podrá conocer la calidad del aire y determinar la probabilidad de contagio de las personas que se encuentren en dicho local cuando alguna de ellas se encuentre infectada por el virus.

Para su realización se diseñará la geometría del local a estudiar mediante el software de diseño asistido por ordenador SolidWorks. A continuación, se obtendrá el volumen fluido que se mallará mediante ANSYS Workbench Mesh y se finalizará con el análisis del fluido y estudio de la probabilidad de contagio mediante CFD. El trabajo quedará dividido en las siguientes partes:

- Breve resumen de la teoría de los aerosoles y transmisión de quanta.
- Nociones teóricas sobre la probabilidad de contagio y las variables que influyen.
- Descripción detallada del problema.
- Preparación del modelo del estudio experimental mediante modelado geométrico, su respectivo mallado, las condiciones de contorno impuestas y el método de resolución CFD.
- Análisis de los resultados obtenidos para los casos analizados.

## 1.2 CAMPO DE ESTUDIO

Con la llegada de las restricciones, el estudio sobre la calidad del aire de los locales de ocio preocupa al sector hostelero debido a que sus ingresos dependen de la cantidad de clientes que tengan. El objeto de estudio de este proyecto será el local de hostelería conocido como "Sala Chocolat" del municipio de Zaragoza, España.

En este proyecto se ha trabajado sobre el volumen fluido del interior del local, pues el objetivo es conocer la calidad del aire en función de sus capacidades de ventilación mediante la medición de la concentración del CO<sub>2</sub>. Además, se procederá al análisis de la probabilidad de contagio de los individuos que se encuentren en su interior, siempre que haya un individuo contagioso. El desarrollo del estudio se dividirá en:

- Diseño de la geometría, en tres dimensiones, del local a estudiar mediante el software de diseño por ordenador SolidWorks. En este software también se han diseñado los maniqués que simularán a los individuos del interior del local.
- Posicionamiento de los maniqués en el interior del local y obtención del volumen fluido. Dicho volumen fluido se ha mallado y se han nombrado sus partes más significantes para su posterior estudio.
- Solución del flujo, imponiendo condiciones de contorno, para la obtención de la calidad del aire, así como la probabilidad de contagio de los individuos haciendo uso de la dinámica de flujos computacional (CFD) mediante el software ANSYS Fluent.

Por último, se han contrastado los resultados obtenidos computacionalmente de calidad del aire en este trabajo, con los hallados de forma experimental, mediante sensores de CO<sub>2</sub>, por los laboratorios LIFTEC en diciembre del año 2020.



## 2 TEORIA

---

En este apartado se hace referencia a la teoría y los conceptos sobre los que se basan las diferentes técnicas aplicadas para comprender el porqué de la obtención de resultados de este proyecto. Se incluye una presentación de los aerosoles en los que se basa el fluido, una breve explicación sobre el quanta, la metodología de cálculo de la probabilidad de contagio, así como sus factores influyentes, y conceptos básicos sobre mecánica de fluidos computacional.

### 2.1 AEROSOLES

La aportación de conocimiento acerca de la generación y dinámica de los aerosoles originados a partir de las vías respiratorias humanas obliga a revisar los conceptos utilizados de forma tradicional en la Salud Pública, así como su implicación en la transmisión de SARS-CoV-2.

Se consideran aerosoles a aquellas partículas menores de 100  $\mu\text{m}$ , típicamente con diámetros menores de 5 o 10  $\mu\text{m}$ , (Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA), 2020). Estas partículas son capaces de permanecer en el aire suspendidas por un tiempo variable (segundos las mayores y horas las más pequeñas) debido a su gran relación superficie-volumen. En función de su tamaño, estos aerosoles pueden ser inhalados y alcanzar las células de las vías respiratorias desde la nasofaringe hasta los alveolos. Del mismo modo, estos aerosoles pueden depositarse en las conjuntivas o las vías respiratorias superiores. A pesar de su pequeño tamaño, los aerosoles pueden llevar una carga viral considerable. Por lo tanto, es muy probable que los patrones de transmisión por aerosoles estén acoplados a la circulación del aire y a la dinámica de flujo del local. La transmisión por aerosoles se denomina a menudo como "la vía aérea".

En el documento "Evaluación del riesgo de a transmisión de SARS-CoV-2 mediante aerosoles. Medidas de prevención y recomendaciones" (Vargas Marcos et al., 2020), se recoge el trabajo de un grupo de expertos en aerosoles y en transmisión y prevención de las enfermedades infecciosas, que ha revisado las evidencias científicas y realizado una evaluación del riesgo de la transmisión de SARS-CoV-2 por aerosoles y de la eficacia de las medidas de protección. Se ha dado un mayor peso a los estudios con un mayor grado de evidencia: (1) meta-análisis o estudios comparativos, (2) estudios epidemiológicos descriptivos, (3) estudios basados en modelos experimentales y modelos matemáticos, así como experimentación previa basada en principios físicos.

Dicho grupo de expertos considera que el SARS-CoV-2 se transmite mediante aerosoles, que contienen virus viables generados por la persona infectada, especialmente en espacios cerrados y mal ventilados. Este modo de transmisión amplía el conocimiento anterior basado en el contacto directo, con las secreciones respiratorias de una persona infectada, o indirecto a través de fómites.

Se denomina fómite a todo material carente de vida que puede ser el vehículo de un patógeno que puede penetrar en nuestro organismo y causar una enfermedad. Entre los fómites más comunes se pueden encontrar los plásticos, los metales, las monedas y los billetes o los envases de cartón y papel.



La evidencia actual y las publicaciones más recientes, en las que participan epidemiólogos e ingenieros expertos en aerosoles, indican que el paradigma clásico para los profesionales de la Salud Pública y el control de las enfermedades transmisibles, que clasifica las emisiones respiratorias en gotas (desde 5 micras ( $\mu\text{m}$ ) y aerosoles (menores o iguales de 5  $\mu\text{m}$ )), ha de ser revisado.

Todas las personas, al hablar y respirar emiten aerosoles, a partir de sus vías respiratorias, de diferentes tamaños que oscilan desde nanómetros hasta cientos de micras, y las personas con una infección activa en las vías respiratorias pueden emitir aerosoles que contengan patógenos. Según los tamaños y densidad de estos aerosoles, el comportamiento aerodinámico es diferente. Se considera que tan sólo las partículas superiores a 100  $\mu\text{m}$  tienen comportamiento “balístico”. Estas partículas de gran tamaño se pueden depositar en el suelo y otras superficies en pocos segundos por efectos de la gravedad pudiendo recorrer en algunos casos una distancia de 2 metros desde la persona que los emite. Por lo tanto, podrían alcanzar a una persona susceptible que estuviera cerca impactando en algún lugar (ojos, boca, nariz) desde el cual podría causar la infección. Cualquier otra partícula menor de 100  $\mu\text{m}$  se considera un aerosol, puesto que queda suspendido en el aire por un tiempo elevado, que va de segundos hasta horas y que puede ser inhalado a una distancia superior a dos metros del emisor o incluso en ausencia de un emisor, si aún persisten suspendidas en el aire. En función de su tamaño o comportamiento aerodinámico, los aerosoles desde 15  $\mu\text{m}$  hasta 100  $\mu\text{m}$  alcanzan las vías respiratorias superiores, los aerosoles desde 5  $\mu\text{m}$  hasta 15  $\mu\text{m}$  pueden alcanzar la tráquea y bronquios principales y los aerosoles menores o iguales a 5  $\mu\text{m}$ , tienen capacidad para llegar hasta los alveolos.

El depósito de las partículas inhaladas en los pulmones ocurre principalmente por los siguientes mecanismos: impacto por inercia, sedimentación por gravedad y movimiento browniano (movimiento aleatorio que se observa en las partículas que se hallan en un medio fluido, como resultado de choques contra las moléculas de dicho fluido). El impacto por inercia constituye el mecanismo por el que se depositan las partículas mayores a 5  $\mu\text{m}$ . La sedimentación gravitacional procede de la interacción de las partículas bajo el efecto de la gravedad y afecta sobre todo a las partículas con un diámetro entre 1-8  $\mu\text{m}$ . Finalmente, el movimiento browniano es el mecanismo dominante para el depósito en los pulmones de partículas menores de 0,5  $\mu\text{m}$  de diámetro.

La participación de los aerosoles inhalados para distancias mayores de 2 metros, en situaciones reales de transmisión interhumana, es compleja. Esto se debe a que a menudo no se puede descartar el contacto directo, y sin medidas de protección, entre los individuos, por lo que podrían ocurrir diversos mecanismos de transmisión. Del mismo modo, la dificultad en la demostración de las vías de transmisión en casos reales existe también para la vía de contacto y de gotas respiratorias, que no dispone de más evidencias de las que hay para la vía de aerosoles. No obstante, se han descrito una serie de brotes en los que el contacto indirecto por vía inhalatoria parece el modo más plausible de contagio. Estos brotes han sido detallados en el *ANEXO 1* de este proyecto.

## 2.2 QUANTA

El concepto de quanta, según el documento (Fueyo et al., 2021), debido a Wells, se utiliza a menudo en epidemiología como las unidades de carga de un agente infeccioso. En la aplicación al COVID-19, un quanta es la cantidad de virus SARS-CoV-2 que, si es inhalado por un individuo susceptible, resulta en una probabilidad de infección del 63,21%.

Los individuos infecciosos son, por tanto, las fuentes (emisores) de quanta cuando exhalan, hablan, cantan, tosen o estornudan. La cantidad de quanta liberado por un individuo infeccioso depende de la carga viral de virus (es decir, las copias de ARN por unidad de volumen), su actividad espiratoria (por ejemplo, respirar, hablar, cantar) y su nivel de actividad (por ejemplo, descansar, estar de pie, hacer ejercicio ligero).

Se supone que los quanta transmitidos por aerosoles son transportados por el aire sin velocidad relativa; la Ecuación de transporte instantáneo para la cantidad de quanta por unidad de volumen  $q$  en una ubicación en el espacio es:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}q) + \nabla \cdot (D_q \nabla q) = -k_c q \quad (1)$$

donde  $D_q$  es un coeficiente de difusión turbulenta (cuando se promedia la Ecuación), y  $k_c$  es la tasa de inactivación del virus, tomada como  $k_c = 0,62 \text{ h}^{-1}$  para SARS-CoV-2 (este valor tiene unidades que no son del SI, ya que es así como se representa comúnmente).

No se incluye en la *Ecuación 1* el efecto de la deposición del virus en las superficies, que se considera de forma simplificada en modelos cero dimensionales (ver *ANEXO 1*). Esta simplificación expresa la deposición por unidad de volumen, y por lo tanto no es una representación adecuada de la tasa de deposición en un modelo CFD, ya que el sumidero de deposición solo es aplicable a aquellas celdas que están delimitadas por paredes horizontales. Si la deposición debe retenerse en el modelo CFD, entonces la velocidad relativa del aerosol con respecto al aire se puede acomodar utilizando, por ejemplo, modelos de deslizamiento algebraicos para el movimiento del aerosol, junto con una condición de contorno para eliminar las partículas que alcanzan una pared horizontal. La exclusión de este efecto de deposición de la *Ecuación 1* da como resultado una estimación más conservadora del riesgo de transmisión.

Las fuentes de quanta se representan en nuestro modelo como fuentes puntuales en la *Ecuación 1*, colocadas dentro del dominio, en la ubicación de la cabeza del individuo contagioso.

## 2.3 PROBABILIDAD DE CONTAGIO

En este proyecto se va a realizar un estudio sobre la probabilidad que tiene un individuo de la sala de contagiarse cuando en el interior de esta se encuentra un individuo infectado. La probabilidad de contagio es una función de la cantidad de quanta que expulsa el individuo contagioso y que se expande por el local, por lo tanto, se puede afirmar que varía en función de la posición del individuo contagioso y de la posición en el interior de la sala donde se quiere obtener dicha probabilidad, obteniendo una mayor probabilidad de contagio conforme la distancia al individuo contagioso es menor.

Así, como se refleja en el documento (Fueyo et al., 2021), la probabilidad de infección  $R(x, t)$  de un individuo ubicado en el punto  $x$ , quien está expuesto durante un período de tiempo  $t$  a una concentración variable de quanta  $q(x, t)$  viene dado por:

$$R(x, t) = 1 - e^{-(1-\eta_{in})I \int_0^t q(\tau) d\tau} \quad (2)$$

Donde  $\eta_{in}$  es la eficiencia de la mascarilla para atrapar las gotas/aerosoles en la inhalación. Podemos encontrar valores de  $\eta_{in}$  de hasta un 95% para las mascarillas N95 según (Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA), 2020), aunque en este caso este valor será nulo debido a que se ha considerado que los individuos del interior no llevan mascarillas.  $I$  será la tasa de inhalación y depende de la actividad que esté realizando el individuo y se mide en  $m^3/s$ .

En el ANEXO 1 de este trabajo se encuentra la deducción de esta ecuación para un flujo estacionario que quedaría de la siguiente manera:

$$R(x, t) = 1 - e^{-(1-\eta_{in})Iq_{est}(\vec{x})t} \quad (3)$$

Donde  $q_{est}$  es el valor, en la dirección  $x$ , de quanta estacionario.

## 2.4 MECANICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

La Mecánica de Fluidos Computacional, en inglés: Computational Fluid Dynamics cuya abreviación es CFD, consiste en un conjunto de métodos que permiten la resolución de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido. Estas ecuaciones gobiernan la atmósfera terrestre, las corrientes oceánicas y el flujo alrededor de vehículos o proyectiles y, en general, cualquier fenómeno en el que se involucren fluidos newtonianos. Normalmente, no se dispone de una solución general para este conjunto de ecuaciones, y salvo ciertos tipos de flujo y situaciones muy concretas no es posible hallar una solución analítica; por lo que en muchas ocasiones es preciso recurrir al análisis numérico para determinar una solución aproximada. A la rama de la mecánica de fluidos que se ocupa de la obtención de estas soluciones mediante métodos numéricos se conoce como CFD.

Dentro de los códigos CFD se encuentran los usados para el cálculo de flujo transónico, llamados full-potential, los que resuelven las ecuaciones de Euler (sin viscosidad), llamados de Euler; y, por último, los más completos que resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes incluyendo la viscosidad y la turbulencia (Mora, 2017).

El objetivo de un código CFD, según se recoge en el documento (Lozano Durán, 2019) es la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes. Dado que estas ecuaciones constituyen un sistema de ecuaciones en derivadas parciales no lineal, se procede a la transformación de estas ecuaciones en ecuaciones algebraicas, en determinados puntos del dominio a estudiar (nodos del mallado), mediante lo que se conoce como discretización espacial. Existen numerosas técnicas para tratar esta discretización, las más extendidas son:

- **Método de las diferencias finitas:** se aplica directamente sobre la forma diferencial de las ecuaciones de Navier-Stokes desarrollando las derivadas en series de Taylor. Así, para una función  $U(x)$  su desarrollo en el punto  $x_0$  es:

$$U(x_0 + \Delta x) = U(x_0) + \Delta x \cdot \left. \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x_0} + \frac{\Delta x^2}{2} \cdot \left. \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right|_{x_0} + \dots \quad (4)$$

Por ejemplo, la derivada de una función  $U(x)$  en un punto  $x_0$  con una precisión de segundo orden se calculará como:

$$\left. \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x_0} = \frac{U(x_0 + \Delta x) - U(x_0)}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (5)$$

Como se puede observar, la derivada queda transformada en una expresión algebraica. Este método requiere un mallado estructurado.

- **Método de los volúmenes finitos:** realiza una división del espacio físico en volúmenes de control para la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes en forma integral. Existen dos métodos para la creación de estos volúmenes de control:

- Método del centro de la celda: el punto en el cual se resuelven las ecuaciones es el centro de la celda. El volumen de control coincide con la celda.

- Método de los vértices de la celda: los puntos en los que se resuelven las ecuaciones son los vértices de la celda. El volumen de control puede ser, o bien la unión de todas las celdas que comparten un nodo o bien el volumen cuyo centro es el nodo.

- **Método de los elementos finitos:** resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes en forma integral de la misma manera que resuelve los problemas de deformaciones elásticas de estructuras. No obstante, la complejidad de las técnicas numéricas necesarias para aplicar dicho método a los fluidos hace que no se encuentre tan extendido como las anteriores.

Actualmente, la mayor parte de los códigos numéricos resuelven los flujos mediante el método de los volúmenes finitos. Una vez el dominio físico de interés ha sido mallado y las ecuaciones han sido discretizadas, se construirá un sistema de ecuaciones algebraicas en cada volumen de control que queda cerrado a partir de las condiciones de contorno y de las condiciones iniciales. Se irán resolviendo dichos sistemas de ecuaciones en todos los volúmenes de control de la geometría mallada.

Existen varios programas de CFD en el mercado dentro del software que resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes como por ejemplo ANSYS Fluent que es el más conocido y el que se ha usado para la elaboración de este proyecto, aun así, hay otros grandes softwares de CFD como pueden ser, OpenFOAM o STAR-CCM+ entre otros.

Para la finalizar este punto, se quiere destacar la implementación en este trabajo de una "User-Defined Function" (UDF). Las UDF permiten mejorar la tecnología CFD mediante la implementación de modelos personalizados. Por ejemplo, se puede utilizar una UDF para definir condiciones de contorno personalizadas, como en este proyecto, inicializar una solución o mejorar el postprocesamiento.

En este proyecto se ha utilizado una UDF compilada. Dicha UDF ha permitido la incorporación de condiciones de contorno para su resolución, permitiendo añadir: una condición de quanta para el individuo contagioso (scalar 1), esta condición de quanta es

añadida debido a que esta variable no tiene propiedad de densidad, como ANSYS Fluent utiliza esta propiedad es necesario implementar una UDF para reescribir esta variable. Otra variable reescritas mediante la UDF es la condición de concentraciones de CO<sub>2</sub>, tanto para las entradas y salidas del local (puerta principal y extractores) como para las caras de los individuos del interior (generación de CO<sub>2</sub> de los individuos al respirar), en el denominado scalar 2. Finalmente, la última variable implementada es la edad del aire, medido en el scalar 0. Además, esta UDF implementada permite el cálculo de la probabilidad de contagio por parte de los individuos durante el cálculo que se realice en estado transitorio, en función del tiempo.



## 3 PROBLEMA Y RESULTADOS

---

Una vez se han explicado los conceptos teóricos básicos que se han considerado para este proyecto, en el presente apartado se procederá a la explicación del problema abordado y su resolución. Este apartado estará dividido en: descripción del problema, elaboración de la geometría a estudiar y su respectivo mallado, condiciones de contorno impuestas y, al final, resolución mediante CFD.

### 3.1 DESCRIPCION DEL PROBLEMA

Como ya se ha comentado con anterioridad, este proyecto tratará del análisis de la calidad del aire de un local de hostelería del municipio de Zaragoza, España. Dicho local está situado en la calle María Lostal número 25 y se dedica al ocio nocturno.

La elección de este local como objeto de estudio de este proyecto no ha sido arbitraria, ya que para su elección se ha tenido en cuenta que el Laboratorio de Investigación en Fluidodinámica y Tecnologías de la Combustión (LIFTEC), un centro mixto en el que participan la Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y la Universidad de Zaragoza, ya había realizado un estudio de la calidad del aire de este local para el Ayuntamiento de Zaragoza. Se trató de un estudio experimental, durante los días 23 y 29 de diciembre del año 2020, tras diez meses de pandemia. Dicho estudio se conoce como “Medidas de ventilación y CO<sub>2</sub> en establecimientos de hostelería”. (Laboratorio de Combustión Industrial LIFTEC (CSIC/Univ. Zaragoza), 2021).

El estudio realizado por LIFTEC del local estaba dividido en dos fases diferentes. En la primera de ellas, elaborada el día 23 de diciembre de 2020, se llevaba a cabo una prueba sin público en la que se trató de evaluar cómo de efectiva era la ventilación del local. Para ello se realizaron cuatro ensayos diferentes en los que se sembró en repetidas ocasiones con CO<sub>2</sub> el local hasta alcanzar una concentración superior a la existente en la atmósfera. Seguidamente, se activaron en distintas condiciones los sistemas de ventilación con los que cuenta el local. A través de la evolución temporal de la concentración de CO<sub>2</sub> se puede saber cómo de efectiva es la ventilación del local. En este caso, esto se cuantifica calculando el caudal de aire que mueve dicha ventilación.

Para lograr este objetivo, la prueba se basa en disponer de un ambiente de elevada concentración en CO<sub>2</sub>. La activación de los sistemas de extracción de aire en esta situación debería conseguir la progresiva renovación del aire del local mediante la salida de aire interior (rico en CO<sub>2</sub>) y la entrada de aire. La monitorización del nivel de CO<sub>2</sub> del interior del local por medio de los analizadores de CO<sub>2</sub> Aranet 4 Pro, los cuales basan su funcionamiento en la tecnología NDIR (infrarrojo no dispersivo), permitiría, por tanto, la estimación de la tasa de renovación de aire real del local.

Este tipo de pruebas requieren de una concentración inicial de CO<sub>2</sub> relativamente elevada (p.ej., en el entorno de 2000-2500 partes por millón (ppm)), de forma que pueda apreciarse con claridad el efecto de la ventilación a la hora de reducir estos niveles mediante la entrada de aire exterior. Para conseguir este nivel, la mejor opción es el sembrado con CO<sub>2</sub> artificial. En concreto, se utilizó CO<sub>2</sub> en estado sólido, comúnmente llamado hielo seco. Tras

distribuir los pellets de hielo seco en distintos puntos del local, estos pasan rápidamente a estado gaseoso debido a la baja temperatura de sublimación del CO<sub>2</sub> (-78 °C a presión atmosférica). Una vez ha sublimada la cantidad necesaria de CO<sub>2</sub>, éste se distribuye por toda la estancia mediante el uso de ventiladores. Finalmente, cuando se consigue un ambiente homogéneo y rico en CO<sub>2</sub>, se conecta el sistema de ventilación forzada del local, con el objetivo de registrar cómo de rápido es capaz de sustituir el aire de la estancia por aire externo.

Esta primera fase será de gran ayuda para el apartado 3.4 de este trabajo, condiciones de contorno, ya que, al ser datos obtenidos de forma experimental, son datos fiables de tasa de renovación del aire del local y por tanto se incorporarán en CFD como la capacidad de los extractores de la sala.

Sin embargo, aunque esta primera fase del estudio resuelta muy útil para la obtención de algunas de las condiciones de contorno necesarias para la resolución de este proyecto, respecto al estudio que desarrolló LIFTEC sobre la calidad del aire de la sala, la segunda fase elaborada será la que ayudará a cotejar los resultados computacionales. Esta segunda fase trata sobre el estudio de la calidad del aire del local cuando se encuentran personas en el interior, lo que se considera una situación real.

Idealmente, la ocupación en estas pruebas debería ser elevada, aunque, en este caso, será inferior al aforo máximo permitido debido a las restricciones impuestas. La presencia de personas en el interior de la estancia cambia la situación respecto a la primera fase del estudio ya que en este caso cada persona actúa también como una fuente de CO<sub>2</sub>. Puesto que esta es la situación de funcionamiento real de estos establecimientos, las medidas con ocupantes resultan de indudable interés a la hora de evaluar la calidad del aire existente en el local bajo una serie de condiciones aplicadas en cada caso. Al igual que en las medidas con hielo seco, la calidad del aire de la sala se caracterizará detalladamente mediante medidas de concentraciones CO<sub>2</sub> en el aire de la sala.

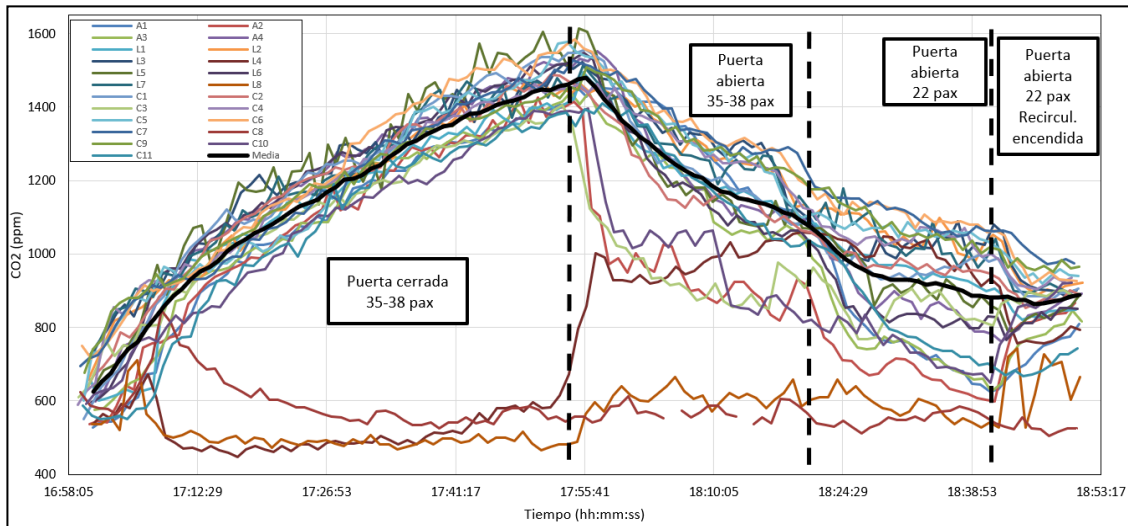
Esta segunda fase del estudio con personas en el interior del local se dividía a su vez en dos situaciones distintas respecto a la ventilación del local. Antes de las 17:00 del día 29 de diciembre del 2020 fueron llegando al local las personas que participaron en la prueba, de manera que entre las 17:00 y las 18:20 se mantuvo una ocupación prácticamente constante, de entre 35 y 38 personas. Esto permitió realizar la prueba en condiciones controladas, puesto que la generación de CO<sub>2</sub> durante todo ese periodo permaneció casi invariable, lo cual facilita comparar distintas condiciones de ventilación.

A las 17:00 se activó el circuito de extracción, manteniendo la puerta cerrada (primera situación de esta fase con personas en el interior). La *imagen 1* muestra claramente que es insuficiente para evacuar todo el CO<sub>2</sub> emitido por las personas, puesto que la concentración aumenta continuamente hasta las 17:55, y hubiera seguido aumentando de no cambiar las condiciones de la prueba. En este punto comienza la segunda situación del estudio con personas en el interior, ya que a las 17:55 se procede a abrir la puerta del local por lo que la capacidad de extracción aumenta aproximadamente al doble, como se había comprobado en el primer estudio sin personas, y la concentración de CO<sub>2</sub> deja de aumentar y empieza a decrecer en todo el local.

Cabe destacar que el estudio elaborado por LIFTEC también añade otras dos situaciones más a esta segunda fase. A las 18:20 salieron parte de los ocupantes, quedando 22 personas en el interior. La consecuencia es una bajada más rápida del CO<sub>2</sub>, puesto que aumenta la proporción entre renovación de aire (que no ha cambiado) respecto a la emisión



de CO<sub>2</sub>. Finalmente, a las 18:40 se puso en marcha la recirculación de aire a través del sistema de climatización, manteniendo invariable la extracción y la cantidad de personas. La única consecuencia es una homogenización gradual de la concentración de CO<sub>2</sub>, sin variación apreciable de su valor promedio. Estas dos situaciones no se han tenido en cuenta para este proyecto ya que se ha considerado el estudio de la primera hora y media de experimentación, aproximadamente una primera hora con la puerta cerrada y la siguiente media hora con la puerta abierta.



**Imagen 1. Gráfica temporal de ppm de CO<sub>2</sub> con personas en el interior. Fuente: “Medidas de ventilación y CO<sub>2</sub> en establecimientos de hostelería” LIFTEC.**

Además de contrastar los resultados de esta primera hora y media de estudio realizado por LIFTEC sobre la calidad del aire, en este proyecto se ha añadido el estudio de la probabilidad de contagio de COVID-19 por parte de los individuos del interior del local, cuando uno de ellos es contagioso. Se ha optado por realizar el estudio transitorio de esta primera hora y media para el mismo individuo contagiado (un individuo situado en la entrada de la sala), a este caso se le ha llamado caso base. Además, se mostrarán resultados de casos que se han elaborado, en estado estacionario, para individuos contagiosos situados en zonas distintas del local, así como situaciones con el local mejor ventilado que el caso base para poder contrastar los resultados entre ellos.

### 3.2 MODELO GEOMETRICO

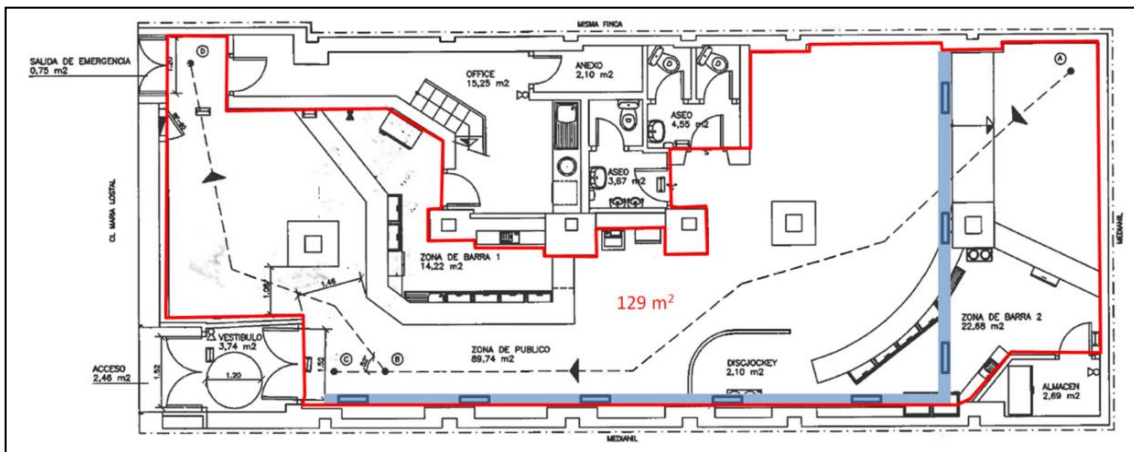
El local elegido para el estudio dispone, según planos recibidos en el informe (Laboratorio de Combustión Industrial LIFTEC (CSIC/Univ. Zaragoza), 2021), de una superficie útil total de 164 m<sup>2</sup>. Sin embargo, parte de esta superficie corresponde a zonas de oficina, almacén, etc. Para realizar el estudio de la ventilación del local, interesa fundamentalmente el espacio compartido por los ocupantes del establecimiento. Por tanto, durante las pruebas, todas las puertas de estos espacios se cerraron para aislarlos del recinto principal. El campo de estudio puede observarse claramente en la *imagen 2*, donde se ha delimitado con trazo rojo la superficie correspondiente a este área principal, consistente en la zona de público, las dos

zonas de barras y el espacio del discjockey, dando una superficie total de 129 m<sup>2</sup>. En cuanto a la altura del recinto, ésta varía en sus distintas zonas, estimándose una altura promedio de unos 4 metros. Todo esto proporcionaría un volumen aproximado de 516 m<sup>3</sup> para la zona de realización de las pruebas. Respecto a la instalación de ventilación y climatización, la sala dispone de dos circuitos independientes:

**-Circuito de extracción:** marcado en la *imagen 2* con trazo azul. Este sistema tiene una capacidad teórica de 4000 m<sup>3</sup>/h, y aspira el aire del local a través de 8 rejillas situadas a lo largo del conducto indicado en la *imagen 2*. Este aire aspirado es conducido a una pequeña cabina situada en la planta superior, que actúa como plenum y dispone de aberturas que conectan con la calle.

**-Circuito de climatización:** este sistema trabaja con recirculación por lo que, en principio, no aporta aire exterior. Por este motivo no ha sido incluido en la *imagen 2*, ya que no afecta a la ventilación del local. Sin embargo, se ha comprobado la existencia de cierta conexión en el plenum con la instalación de extracción, por lo que la puesta en marcha de la climatización podría aportar una cierta cantidad desconocida de aire exterior. Se procederá a la puesta en marcha de este circuito en el cuarto ensayo del estudio, a partir de la primera hora y media de estudio experimental, por lo tanto, para este proyecto no será relevante y permanecerá cerrado.

No se han localizado otras aberturas que permitan el intercambio de aire con el exterior, más allá de aquellas descritas para el plenum. Por lo tanto, el sistema de extracción se dispondrá únicamente de rejillas para expulsar aire al exterior, pero no cuenta con ninguna entrada de aire externo que reemplace el aire expulsado.



**Imagen 2. Plano de la sala Chocolat, donde se ha añadido en trazo azul el circuito de extracción (con la posición de las 8 rejillas marcadas con rectángulos). La superficie estudiada en estas pruebas se ha delimitado con trazo rojo, comprendiendo un total de 129 m<sup>2</sup>. Fuente: LIFTEC**

### 3.2.1 MODELADO DE LA SALA

A partir de los datos mencionados en el apartado anterior, y que han sido facilitados por LIFTEC, se comienza a diseñar en tres dimensiones la Sala Chocolat mediante el software de diseño asistido por ordenador SolidWorks.

SolidWorks es un software de diseño CAD 3D (diseño asistido por ordenador) para modelar piezas y ensamblajes en 3D y planos en 2D. Este software ofrece un abanico de soluciones para cubrir los aspectos implicados en el proceso de desarrollo del producto. Sus productos ofrecen la posibilidad de crear, diseñar, simular, fabricar, publicar y gestionar los datos del proceso de diseño.

El proceso de diseño de la Sala Chocolat fue un proceso en el que hubo que tener en cuenta a la hora de elaborarlo que, posteriormente, había que obtener de su interior el volumen fluido, es decir, todo el aire que se encuentra en su interior y que será el objeto de estudio de este proyecto. Una vez obtenido este volumen fluido, se procederá a su mallado para poder trabajar en CFD y poder calcular y obtener distintos resultados. Es por esto por lo que no se podía elaborar una geometría muy compleja ya que, si ya de por sí el volumen fluido va a poseer unas dimensiones muy grandes, lo que significa que vamos a tener una malla con muchos elementos, cuanto más compleja sea esta geometría de estudio (volumen fluido) mayor número de elementos tendrá la malla (debido a que en las zonas de difícil geometría se añadirán más elementos para ajustarla de mejor forma y obtener unos resultados que se aproximen a la realidad).

En cuanto a la obtención de la geometría de la sala, se ha tenido en cuenta que las juntas de techos, paredes, columnas o elementos del interior de la sala como pueden ser las barras o muebles estén perfectamente unidas para facilitar la obtención del volumen fluido. Mención aparte para la puerta principal o los extractores del local, que se diseñarán abiertos para conseguir una mayor facilidad de, una vez obtenido el volumen fluido, incorporar las condiciones de contorno en esas caras y para evitar que haya reflujo en estas zonas, que alteraría nuestros resultados.

El procedimiento para el diseño de la geometría se inicia mediante el cálculo de la escala en la que se facilitaba el plano de la *imagen 2*. Esto se obtiene gracias a las medidas que hay señaladas de referencia de área en m<sup>2</sup> de algunas habitaciones como, por ejemplo, los baños o algún almacén. Una vez obtenida la escala se comienza el diseño escogiendo el plano XY y, ya con las medidas reales, se dibuja el boceto o croquis de la planta. En el *ANEXO 2 imagen 1* de este trabajo se puede visualizar este boceto que solamente representará el trazo rojo de la *imagen 1*.

A continuación, mediante distintas protrusiones, se elevan estas caras hasta la altura de 4 m, altura que se indicaba en el informe de LIFTEC como altura media de la sala. Obtenidas ya las paredes de la sala, se cierra por debajo con una superficie que sería el suelo. Para ello se vuelve a elaborar un boceto de la parte exterior de la planta y a continuación se realiza, de nuevo, una protrusión una distancia negativa de aproximadamente 10 centímetros. Este mismo paso será realizado para cerrar el techo de la sala, con la diferencia de que en el boceto del techo se diseñarán también los extractores y tras realizar la protrusión correspondiente del techo serán vaciados, mediante un corte, dejando los extractores como ocho huecos en el techo (las ocho rendijas).

Para la realización de los huecos de la puerta, se opta por realizar el mismo método que los extractores, es decir, elaborando un boceto en la propia pared donde se sitúa la puerta y a continuación un corte con la profundidad de la pared.

Una vez se dispone de la sala, se van a incluir en ella algunos elementos que se encuentran en el interior del local. Se han considerado únicamente los elementos que tienen un tamaño considerable y que pueden influir en el flujo del fluido. Con estos elementos se hace referencia a las dos barras del bar, a los muebles situados detrás de las barras, como

pueden ser neveras o frigoríficos, y la cabina del discjockey, que tiene una pared de separación de aproximadamente 135 cm de altura y una mesa. El proceso de elaboración de estos elementos es similar al de las paredes de la sala, es decir, el diseño en planta del objeto y su posterior protrusión hasta la altura que tiene cada elemento.

Una vez han sido diseñadas todo el local (paredes, techo, suelo, elementos varios) se procese a la unión de todos sus elementos para formar un único sólido. En el *ANEXO 2 imágenes 3 y 4* se puede visualizar el diseño final de la geometría de la sala.

### **3.2.2 MODELADO DE LAS PERSONAS**

Debido a que este proyecto se basa en el estudio (Laboratorio de Combustión Industrial LIFTEC (CSIC/Univ. Zaragoza), 2021), concretamente en la fase del estudio de la calidad del aire con personas en el interior del local, se han tenido que diseñar unos cuerpos para simular a los individuos del interior del local durante dicho estudio.

La realización de un cuerpo humano fue una tarea complicada por su diseño y posterior mallado. Esto fue debido a que la geometría del cuerpo humano no es regular y tiene infinidad de zonas complejas de mallar. Por lo tanto, al haber diseñado el local con geometrías simples (no requieren una malla muy fina al no tener detalles complejos), gran parte de los elementos de la malla utilizada para este proyecto se encontrarían en las zonas de geometría más compleja de los cuerpos.

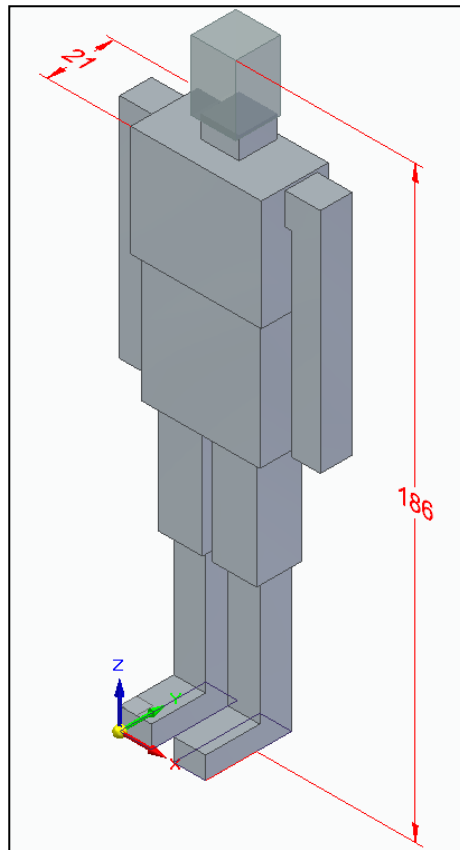
En el *ANEXO 2 imagen 5* de este trabajo, se puede observar la primera geometría que se elaboró del cuerpo humano. Esta geometría presentaba un contorno muy complejo para mallar debido al alto número de superficies curvas que lo formaban. Al realizar las primeras pruebas con este cuerpo, tras introducirlo en la sala, obtener el volumen fluido y realizar el mallado, se podía observar lo esperado, la malla resultaba muy pesada debido a que había muchos elementos destinados a ajustar la geometría en la zona de los cuerpos y, aun aumentando el número de elementos, generaba errores en algunas celdas de la malla que no terminaban de ajustar correctamente a estos cuerpos.

Tras esta primera prueba, se optó por realizar el camino inverso. Se diseñó un cuerpo muy simplificado (ver *ANEXO 2 imagen 6*). Este cuerpo se mallaba por separado (no se incluía en la geometría de la sala) y se verificaba si el diseño del cuerpo era óptimo. Con este paso se ganaba tiempo de diseño ya que al mallar solamente el cuerpo se podían visualizar el lugar de los fallos de diseño y modificarlo de forma que no se tuviera que realizar todo el proceso de obtención del volumen fluido para comprobar el mallado de los cuerpos.

Finalmente, tras otros diseños de cuerpos, se diseñó un cuerpo algo más complejo que el segundo, que era considerado demasiado simplificado, obteniendo el diseño final que se puede observar a continuación en la *imagen 3*.

El proceso de elaboración de este cuerpo tiene bastante similitud al proceso de fabricación de la sala, ya que se ha diseñado un cuerpo con caras rectas, lo que favorece el ajuste casi perfecto de una malla. Se comienza desde los pies y se finaliza por la cabeza.

Primero se bocetan los pies y se realiza su respectiva protrusión. A continuación, en la parte de arriba del pie donde se situaría el tobillo, se desarrolla el boceto de la pierna y su correspondiente protrusión. El mismo proceso se realizará para el pecho y la cabeza. Para los brazos, se bocetan los hombros en cada uno de los dos costados, en el plano YZ, y se procede a su protrusión en dirección X. Una vez obtenida dicha protrusión se realiza el último boceto en la parte inferior de los hombros para, a continuación, realizar la protrusión de los brazos en dirección Z negativa. Finalmente, cuando se dispone de todas las partes del cuerpo, se unen formando un único sólido. Las medidas del cuerpo vienen acotadas en centímetros a continuación en la *imagen 3*.



**Imagen 3. Diseño final de cuerpos. Fuente: elaboración propia**

### **3.2.3 OBTENCION DEL VOLUMEN FLUIDO**

Como se ha comentado anteriormente, el objeto de estudio de este proyecto no será la geometría como tal de la sala, sino todo el fluido que se encuentra en su interior, lo que se denomina volumen fluido.

El primer paso para su obtención ha sido la generación de la geometría de la sala, apartado 3.2.1 de este trabajo. Es muy importante disponer esta geometría, que está compuesta de varios cuerpos, como un solo cuerpo y cuyas juntas estén perfectamente cerradas. Esto se debe a que el proceso que se va a realizar es un símil a, por ejemplo, disponer de una caja, rellenar su interior con plastilina sin dejar hueco alguno, retirar la caja y obtener la plastilina del interior. Dicha plastilina tendría la forma del interior de la caja y es lo

que se denominaría volumen fluido de la caja. Por ello las juntas deben estar perfectamente cerradas, ya que sino la plastilina se saldría por ellas y el volumen fluido sería imperfecto.

Además, también hay que tener en cuenta que hay personas en el interior de sala. Por ello, previo a la obtención del volumen fluido, se deben situar los cuerpos que han sido diseñados en su interior. La disposición de estos cuerpos en el interior de la sala ha sido creada arbitrariamente, procurando una distribución casi homogénea por todas las zonas del local (entrada, centro y fondo) y atendiendo a las restricciones impuestas durante el periodo de estudio, grupos reducidos de máximo cuatro personas. Así pues, se obtiene una distribución de treinta y una personas en el interior, colocadas de forma que haya seis camareros, un discjockey y veinticinco clientes. Esta disposición se puede apreciar en la *imagen 7 del ANEXO 2*.

Al igual que sucedía con las juntas entre las distintas paredes de la geometría, estos cuerpos se van a incorporar a la geometría de la sala de forma que la unión entre los pies de las personas y el suelo de la sala sea tal que no haya espacios ni problemas de juntas entre ellos a la hora de obtener el volumen fluido. Una vez posicionados los cuerpos de forma correcta se procede a unir los treinta y dos cuerpos (una sala y treinta y una personas) obteniendo un solo cuerpo que se ha denominado en este proyecto “Sala Chocolat con personas” y que se considerará el cuerpo final del cual se obtenga el volumen fluido.

Para la obtención del volumen fluido, se va a trabajar con la herramienta denominada como Workbench 2020. Una vez en ella, se añade desde toolbox una geometría y se importa la geometría “Sala Chocolat con personas”. Desde el Workbench se trabajará esta geometría mediante la herramienta de diseño DesingModeler. El primer paso que se realiza es un “enclosure”. El enclosure permite cubrir toda la geometría importada de material sólido. Este paso sería lo equivalente a, en el ejemplo que se ha comentado anteriormente, cubrir toda la caja de plastilina. Se ha optado por realizar un enclosure que sobresalga de la geometría original un metro por cada uno de sus lados.

El proceso de obtención del volumen fluido pasa por recortar este enclosure por los planos que formarían las paredes interiores de la sala y así disponer únicamente del interior de la sala. Este paso se efectúa mediante un “Slice by Surface” escogiendo como superficie de corte (surface) esas paredes interiores. Mencionar en este punto la importancia de escoger como surface las paredes exteriores a la hora de obtener el volumen fluido en las zonas de los extractores (techo) o de las puertas (paredes laterales) ya que esto permitirá disponer del hueco de la puerta y extractores, de forma saliente. Con ello se evita el reflujo y además resultará más fácil nombrar estas caras, paso importante que facilita la incorporación de las condiciones de contorno.

Debido a que se había realizado de forma correcta la unión de juntas y la unión de personas con la sala en un solo sólido, se puede observar en el *ANEXO 2 imagen 10* que, como era de esperar, en el volumen fluido a estudiar se han formado huecos en el interior. Estos huecos son los elementos del interior de la sala que no son fluido, es decir, los sólidos del interior. Con estos sólidos se hace referencia a las barras, los muebles o las personas.

Una vez obtenido el volumen fluido, se va a proceder a su división en tres zonas, entrada, centro y fondo. Esta división facilitará la incorporación de la condición de contorno que supone la concentración de CO<sub>2</sub> inicial en el aire de la sala en cada una de sus zonas. Este paso se ha ejecutado debido a que, según los datos experimentales aportados por LIFTEC, la concentración inicial de CO<sub>2</sub> no es constante en toda la sala en el instante inicial. Para la realización de esta división se realizará, de nuevo, un Slice by Surface obteniendo así el volumen fluido final que se puede visualizar en el *ANEXO 2 imagen 11*.

El último paso que se debe realizar para terminar de obtener el volumen fluido es el de nombrar las partes más importantes de este. Por partes importantes se quiere hacer referencia a las zonas del volumen fluido donde se impondrán condiciones de contorno necesarias para la realización de este proyecto.

Este volumen fluido obtenido, se inserta de nuevo en un toolbox de geometría, en el mismo archivo de Workbench 2020 en el que se estaba trabajando y esta vez se editará mediante la herramienta de diseño Spaceclaim.

Llegados a este punto se debe tener en cuenta cuales son los puntos, o superficies, en las que se van a incorporar las condiciones de contorno del problema. Las zonas elegidas, como se explicará en el apartado 3.4 de este trabajo, serán las caras y los cuerpos de las personas del interior de la sala, los extractores y la puerta principal.

El principal problema que se encontró a la hora de nombrar el volumen fluido fue el acceso a las caras y cuerpos de las personas del interior. Para ello se optó por realizar un corte a la altura de estas superficies y suprimir una de las dos partes dejando más accesible la selección de las caras. Este proceso se puede apreciar en el *ANEXO 2 imagen 13*.

Para finalizar este apartado, hay que añadir que las caras de las personas se han nombrado por separado, obteniendo así treinta y una caras nombradas. Sin embargo, los cuerpos de las personas han sido nombrados a la vez como “cuerpos” ya que se ha considerado que en todos los cuerpos de las personas se impondrá la misma condición de contorno. Para nombrar estos cuerpos se ha procedido a suprimir las paredes del volumen fluido, obteniendo así un acceso limpio a la selección de estos cuerpos. Una vez son fácilmente accesibles se procede a la selección de todos ellos a la vez, mediante una selección en caja y, uno a uno, se va suprimiendo la selección de la cara ya que no es posible nombrar una misma superficie dos veces. Dicha selección de cuerpos se puede visualizar en el *ANEXO 2 imagen 14* de este trabajo.

### **3.3 MALLADO DEL VOLUMEN FLUIDO**

Como se ha explicado en el apartado 2.4 de este trabajo, la simulación computacional mediante herramientas CFD se utiliza para realizar el análisis y mejorar la calidad de proyectos. La mayoría de estos análisis se llevan a cabo mediante uso de softwares que utilizan el Método de Elementos Finitos, lo cual permite obtener respuestas para numerosos problemas de ingeniería. En este proyecto se ha utilizado el software ANSYS Fluent basado en el método de volúmenes finitos.

La obtención de la malla del volumen fluido se realiza mediante la subdivisión de este en partes más pequeñas, conocidas como “elementos”, que representan el dominio continuo. La división de la geometría en pequeños elementos resuelve un problema complejo, al subdividirlo en problemas más simples, lo que permite al ordenador hacer las tareas con mayor eficiencia.

El método propone que un número infinito de variables desconocidas, sean sustituidas por un número limitado de elementos de comportamiento bien definido. Esas divisiones pueden tener diferentes formas, tales como triangular, cuadrangular, entre otros, dependiendo del tipo y tamaño del problema. Debido a que el tamaño de estos elementos es finito este método se denomina “método de los volúmenes finitos”.

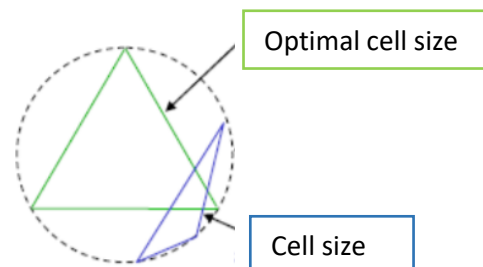
Los elementos finitos están conectados entre sí por sus caras y por puntos, que se llaman nodos o puntos nodales. Al conjunto de todos los elementos y nodos se lo denomina malla. Debido a las subdivisiones de la geometría, las ecuaciones matemáticas que rigen el comportamiento físico no se resolverán de una manera exacta, sino aproximada por este método numérico. La precisión de los Métodos dos Elementos Finitos depende de la cantidad de nodos y elementos, del tamaño y de los tipos de elementos de la malla. Por lo tanto, cuanto menor sea el tamaño de los elementos, mayor será el número de elementos en una malla lo que conlleva a unos resultados del análisis más precisos.

Esta subdivisión del volumen fluido ha sido realizada añadiendo un nuevo toolbox en el Workbench en el que se había trabajado anteriormente para la obtención del volumen fluido. Este nuevo toolbox ahora pasa a ser de tipo mallado.

El mallado es una parte muy importante de este proyecto ya que el objetivo era el de conseguir una malla de buena calidad, lo que se traduce en conseguir unos resultados precisos y más ajustados a la realidad. Por tanto, fue necesario realizar varias pruebas y varios mallados hasta que se obtuvo un malla de buena calidad.

Tras la inserción de la geometría del volumen fluido en el apartado de geometría de la malla, se procesa desde el Workbench el mallado. Una vez se inicia, se puede apreciar la infinidad de opciones que existen para mallar la geometría. Para las primeras mallas se alternaba el tamaño de la malla, con valores que iban desde 10 centímetros hasta aproximadamente 5 centímetros. Se cambiaba el orden de aproximación de los elementos, entre lineal y cuadrático. Una vez se generaba cada malla se comprobaba su calidad. Para comprobarla se visualizaba en el apartado de calidad de la malla, en la sección "mesh metric", la opción skewness. El cálculo skewness proporciona uno de los muchos índices de calidad de una malla, que tratan de la determinación del límite a partir del cual un elemento debe ser rechazado. El método skewness se basa en lo equilátero que puede ser un triángulo de nuestra malla. Y se calcula de la siguiente forma:

$$Skewness = \frac{optimal\ cell\ size - cell\ size}{optimal\ cell\ size} \quad (6)$$



Un triángulo equilátero que presenta skewness igual a 0, es el mejor elemento que se puede obtener, y 1 el peor elemento. El valor a partir de cual deben ser rechazados los elementos es de aproximadamente entre 0.90 y 0.95 para un número de elementos de aproximadamente del 0,1% del total de la malla.

En el mallado obtenido tras varias pruebas realizadas combinando el tamaño de elementos y orden de aproximación, el skewness era de entre 0.92 y 0.96 en 1780 de los elementos (el total eran aproximadamente un millón y medio), la mayoría de estos situados en la geometría de los cuerpos de las personas. Con estos datos no se podía esperar obtener unos resultados muy exactos y por lo tanto se procedió a solucionar este problema para obtener una malla de mayor calidad.



Una de las opciones que se presentaba para solucionar este problema era la de reducir todavía más el tamaño de la malla. En este punto hay que recordar que el local tiene grandes dimensiones ya que al ser una sala de 126 m<sup>2</sup> las longitudes de paredes son de varios metros. Por lo tanto, una reducción del tamaño de malla del orden de unos pocos centímetros aumenta mucho el número de elementos. Por ejemplo, para una malla con un tamaño de elemento 3 centímetros, el número de elementos era mayor de 25 millones. Este aumento hace que la malla sea más pesada y se procese mucho más lenta a la hora de realizar los cálculos. Por lo tanto, se optó por descartar este método de solución del problema presentado.

La opción por la que finalmente se optó, fue la de editar de nuevo la geometría añadiendo cuerpos de influencia. Para ello se trabaja de nuevo la geometría del fluido con el software de diseño SolidWorks. La solución consistía en añadir cuerpos que cubrieran las zonas donde había problemas de skewness del mallado. En el volumen fluido estos problemas se daban en la zona de los cuerpos, que hay que recordar que tenían un altura de un metro con ochenta y seis centímetros. Por lo tanto, estos cuerpos humanos se envuelven con nuevo cuerpo con forma de prisma rectangular y de altura 2 metros. En el *ANEXO 3 imagen 1* se aprecian estos cuerpos que, por poner un símil, sería como introducir un cuerpo humano en una caja, y sería el interior de esta caja la que se malle de una forma más fina consiguiendo así un mallado más preciso en las zonas problemáticas de su interior.

Una vez creados estos cuerpos auxiliares, se vuelve a insertar la nueva geometría (volumen fluido más los cuerpos auxiliares) en el apartado de geometría de la malla del Workbench previo. Al proceder al mallado, se inserta un nuevo "body sizing" (tamaño de cuerpo). En este body sizing se va a seleccionar como tipo "body of influence", que serán los cuerpos auxiliares que se acaban de diseñar y, como tamaño de malla, se va a seleccionar 4 centímetros. Esto hace que el propio programa malle con un tamaño de malla de 4 centímetros todo el espacio existente dentro de los cuerpos auxiliares, ajustando mejor la malla en las zonas más problemáticas que hay en el interior de estos, los cuerpos humanos. Para el resto del espacio se continua con el tamaño de malla de 10 centímetros y será el propio programa el que ajuste la malla general de forma que la intersección entre el espacio mallado con tamaño de 10 centímetros y el interior de los cuerpos auxiliares, de tamaño 4 centímetros, no presente problemas de generación.

Tras realizar esta solución, aunque el número de elementos de la malla aumenta considerablemente a un total de más de nueve millones, se puede comprobar que la calidad es mucho mejor que las mallas elaboradas anteriormente. Esta nueva malla solamente dispone de 71 elementos con un skewness de entre 0.85 y 0.89. Estos 71 elementos no llegan a ser el 0.001% del total de los elementos de la malla. Esta malla final se puede observar en el *ANEXO 3 imágenes 3 y 4* y es la que finalmente se ha utilizado para la elaboración de este proyecto.

### **3.4 CONDICIONES DE CONTORNO**

La descripción matemática de un flujo requiere no sólo establecer las ecuaciones de conservación adecuadas, sino también fijar unas condiciones iniciales (si el flujo es no estacionario) y de contorno (en inglés: Boundary Conditions) que deben satisfacerse, respectivamente, en el instante inicial del periodo de tiempo objeto de estudio y en los límites del dominio considerado. Al imponer estas condiciones se consigue obtener soluciones particulares de entre las múltiples soluciones posibles de las ecuaciones de conservación.

La determinación de las condiciones de contorno adecuadas para cada tipo de flujo constituye un problema que puede llegar a ser complejo en algunos casos. La especificación de insuficientes condiciones de contorno puede impedir obtener una solución única, mientras que la especificación de excesivas condiciones de contorno puede dar lugar a soluciones con falta de sentido físico, particularmente en las proximidades del contorno correspondiente.

Una de las condiciones de contorno más típicas es la correspondiente a un contorno en el que existe una pared impermeable. La experiencia demuestra que los fluidos no deslizan sobre una pared, sino que satisfacen la condición de adherencia:

$$\vec{v} = \vec{v}_s$$

es decir, la velocidad del fluido en contacto con la pared coincide con la de ésta. En particular, si la pared permanece inmóvil, el fluido en contacto con ella debe tener velocidad nula. Por ello la primera de las condiciones que se impone a la hora de realizar este proyecto es que la velocidad en las paredes de la sala (wall) será nula.

Como se explicará en el apartado 3.5, para la resolución de este proyecto se tendrá en cuenta tanto el estado estacionario como el transitorio. Además, como se ha comentado en el apartado 3.1, las condiciones de renovación de aire de la sala varían en función del estudio. Para el estudio con la puerta cerrada, es decir, la primera hora de ensayo, la tasa de renovación de aire es inferior a la tasa de renovación para el estudio con la puerta abierta, durante la media hora posterior a la apertura de la puerta.

Centrando ahora este punto en la tasa de renovaciones de la sala hay que recordar que, como se ha explicado en el apartado 3.1 de este trabajo, previo al estudio elaborado con personas en el interior, LIFTEC realiza un primer estudio sin personas en el interior del local para verificar que los extractores tienen una capacidad de extracción de 4000 m<sup>3</sup>/h a través de sus ocho rendijas. Tras este ensayo se determina que esta capacidad de extracción teórica de los extractores está muy lejos de la realidad. Según esta primera parte del informe (Laboratorio de Combustión Industrial LIFTEC (CSIC/Univ. Zaragoza), 2021), tras los estudios experimentales realizados, la capacidad de extracción de aire real de los extractores es la que queda reflejada en la siguiente tabla:

EXPERIMENTO	VOLUMEN SALA [m <sup>3</sup> ]	CAUDAL MEDIDO [m <sup>3</sup> /h]	CAUDAL ANSYS [kg/s]	TASA RENOVACION [1/h]
PUERTA CERRADA	516	909	0.2989	1.761
PUERTA ABIERTA		2005	0.6600	3.885

**Tabla 1. Resumen de los caudales de extracción en distintas unidades a partir de los datos de LIFTEC. Fuente: elaboración propia**

En la *Tabla 1* se puede apreciar que en CFD la condición de contorno se impondrá como “mass flow outlet” en los extractores y vendrá en kilogramos de aire extraído por segundo, que es lo que solicita el software. Para la elaboración de este trabajo, los cálculos transitorios se han realizado en dos casos, el primero con la puerta cerrada, por lo tanto, con capacidad de extracción de extractores de 0.2989 kg/s, y el segundo caso, idéntico al primero, pero con la capacidad de extracción de 0.6600 kg/s. Además, para el estudio en estado transitorio se impondrán las condiciones con las que finaliza la primera hora, caso con la puerta cerrada, como condiciones iniciales del segundo transitorio, caso con la puerta abierta.

Debido a la división en zonas que se ha establecido durante el proceso de diseño de la geometría, el software ANSYS Fluent detecta los extractores en dos zonas distintas, en el medio y en el fondo. Para que las capacidades de extracción total sean las mencionadas anteriormente, cada una de esas dos zonas deberá disponer de un caudal de 0.1494 kg/s para el caso de puerta cerrada y 0.33 kg/s para el caso de puerta abierta.

En este proyecto se va a realizar el estudio de la calidad del aire del local mediante la medición de la concentración de partículas de CO<sub>2</sub>. Esto hace que haya que investigar para incorporar las condiciones iniciales de dichas concentraciones de CO<sub>2</sub> en las distintas zonas del volumen fluido. Para imponer las condiciones de CO<sub>2</sub>, se ha optado por utilizar el scalar 2 implementado a través de la UDF. La condición de la puerta se ha impuesto desde la *imagen 1*, gráfica temporal de ppm de CO<sub>2</sub>, donde marca como valor inicial 600 ppm. Este valor ha de ser introducido según la UDF implantada en unidades de [kgCO<sub>2</sub>/kgAire]. Mediante los cálculos que se pueden observar en el ANEXO 4 se obtiene una condición de contorno referida a la concentración de CO<sub>2</sub> en la puerta principal de 0.000943 kgCO<sub>2</sub>/kgAire.

Pero este CO<sub>2</sub> mencionado anteriormente no es único que hay que tener en cuenta para este proyecto, ya que los individuos del interior también son una fuente de CO<sub>2</sub> al respirar, por lo que también se debe imponer una condición de contorno en sus caras. Esta condición de contorno también será impuesta en el scalar 2 de las caras, variable implementada en la UDF. En los casos de la cara la condición vendrá impuesta en [kg/s/m<sup>2</sup>]. La tasa de emisión de aire de una persona es según (Jimenez & Peng, 2021) de 0.52 m<sup>3</sup>/h. Teniendo en cuenta que los estudios de LIFTEC están realizados con 38 personas en el interior y en este proyecto disponemos de 31 personas, habrá que ajustar este valor para poder comparar ambos estudios en igualdad de generación de CO<sub>2</sub>. Estos cálculos se pueden comprobar en el ANEXO 4 y como resultado se impone en las caras una generación de 0.000477 kg/s/m<sup>2</sup>.

Para ajustar los resultados de este trabajo a la realidad se ha optado por imponer otra condición de contorno en los cuerpos de las personas. Esta condición aplica en los cuerpos de los individuos del interior del local un flujo de calor. Se ha impuesto, para representar este flujo, una temperatura corporal de 36°C, o lo que es lo mismo 309 K, y un coeficiente de transferencia de calor, h, de 3.3 W/m<sup>2</sup> acompañado de un factor de emisividad, ε, de 0.95. Estos datos han sido obtenidos de (de Dear et al., 1996).

Para ampliar este proyecto se va a realizar el estudio de la probabilidad de contagio cuando existe un individuo contagioso en el interior de la sala. Por ello, se ha impuesto una condición extra en la cara de uno de los individuos, la condición de quanta. Esta condición de contorno vendrá impuesta en el scalar 1 de la cara de este individuo. Para el resto de las caras de los demás individuos, que no se consideran contagiosos, esta condición es nula. Las unidades en las que se impone la condición de quanta son [quanta/s/m<sup>2</sup>]. Para la realización de este proyecto se ha considerado que los individuos del interior no disponen de mascarillas. Según el documento "Documento de recomendaciones REHVA COVID-19 17 de noviembre de 2020" (Atecyr, 2020), la tasa de emisión de un individuo es de 21 quanta/h. Este dato ha sido contrastado con el trabajo "COVID-19 Aerosol Transmission Estimator" del profesor José Luís Jiménez, Universidad de Colorado-Boulder, (Jimenez & Peng, 2021). La condición de contorno de quanta para el individuo contagioso será impuesta como 0.1894 quanta/s/m<sup>2</sup>. Los cálculos para su obtención pueden verse en el ANEXO 4 de este proyecto.

### 3.5 METODO DE RESOLUCION CFD

Tras la generación de la geometría, la obtención del volumen fluido, que será el objeto de estudio de este proyecto, la generación de la malla y la imposición de las condiciones de contorno necesarias, este apartado está destinado a explicar el método de resolución, mediante CFD, que se ha llevado a cabo para este proyecto.

Antes de comenzar la resolución, se van a incorporar a los casos ciertas superficies que resultarán de gran utilidad a la hora de proyectar los resultados durante el postprocesamiento. Las superficies que se han creado con este fin son:

- Superficie paralela al suelo del local a una altura sobre este de 50 centímetros, será denominada “altura suelo”.

- Superficie paralela al suelo del local a una altura sobre este de 180 centímetros, coincidiendo con la altura de las cabezas, será denominada “altura cabezas”.

- Superficie paralela al suelo del local a una altura sobre este de 210 centímetros, coincidiendo con la altura de los sensores, que se explicarán a continuación, será denominada “altura sensores”.

- Superficie paralela al suelo del local a una altura sobre este de 370 centímetros, será denominada “altura techo”.

- Una superficie perpendicular al suelo de la sala y que este situada en la cabeza infectada, será denominada “superficie infectado”.

Además, al querer contrastar los resultados de este trabajo con los resultados obtenidos de forma experimental por LIFTEC, se han añadido a las superficies mencionadas anteriormente, puntos de estudio distribuidos por la geometría del volumen fluido. Estos puntos simulan los sensores utilizados por LIFTEC como medidores de CO<sub>2</sub> y seguirán la distribución marcada en la *imagen 4*.

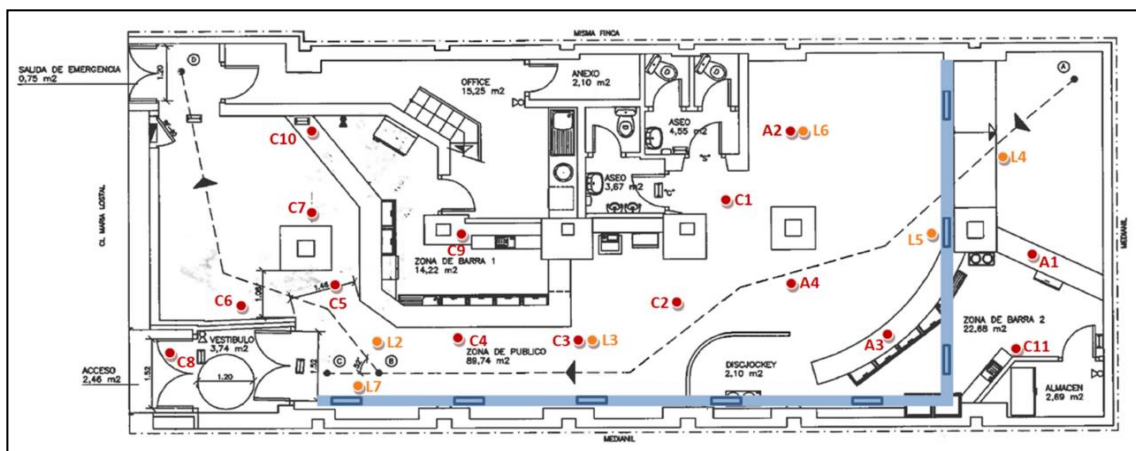


Imagen 4. Vista de planta con la posición de los sensores de medición de CO<sub>2</sub>. Fuente: LIFTEC

Como se puede observar en la *imagen 4*, existen dos posiciones distintas de los sensores. Los sensores marcados con color rojo son sensores situados sobre trípodes y que se encuentran a una distancia de 2.1 metros del suelo del local. Los sensores que aparecen de color amarillo en la imagen, son sensores que se sitúan a una altura próxima al techo, es decir, aproximadamente algo menor a 4 metros. Para este proyecto se posicionarán a una altura de 3.75 metros respecto al suelo del local.

### **3.5.1 RESOLUCION MODELO ESTACIONARIO**

Una vez se dispone de los casos base para la elaboración de este proyecto (caso base con puerta cerrada y caso base con puerta abierta), el primer método de resolución será el modelo estacionario.

Para el flujo estacionario, la velocidad en un punto dado es constante en el tiempo y la distribución de líneas de corriente del flujo no cambia con el tiempo.

La resolución del modelo estacionario permitirá obtener la solución a las ecuaciones de flujo, de turbulencia y de energía. Para ello se activa en ANSYS Fluent la opción de ecuación de energía. Una vez activada la ecuación de energía se procede a la selección de la metodología del modelo viscoso. Se ha escogido el modelo k-epsilon realizable. En cuanto al tratamiento cerca de la pared se ha escogido el Enhanced wall treatment (tratamiento de pared mejorado). El tratamiento de pared mejorado es un método de modelado cercano a la pared que combina un modelo de dos capas con las llamadas funciones de pared mejoradas.

Tras ajustar estos parámetros, imponer las condiciones de contorno que se han explicado en el apartado 3.4 de este trabajo y dejar que el software realice alrededor de 800 iteraciones para los cálculos de flujo, de turbulencia y de energía se han obtenido resultados para el estado estacionario que se pueden visualizar en el *ANEXO 5 imágenes de 1 a 4* para el caso con la puerta cerrada, y *5 a 8* para el caso con la puerta abierta. Además, también se pueden observar los resultados de probabilidad de contagio, cuando un individuo de la sala es contagioso, y de calidad del aire, con los resultados de la concentración (en partes por millón) de CO<sub>2</sub> en la sala, todos ellos en estado estacionario. Estos resultados se encuentran en el *ANEXO 5* de este trabajo.

Como se puede apreciar en estos resultados en estado estacionario, la diferencia entre los resultados de los casos de puerta cerrada y abierta es más que evidente. El aumento, al doble, de capacidad de extracción de los extractores se ve reflejado tanto en las líneas de flujo, donde se aprecia una mayor velocidad general de estas para el caso de puerta abierta, lo que repercute también en una mayor y mejor ventilación del aire del local. En cuanto a la temperatura, se aprecia una temperatura menor en el interior, para el caso con la puerta abierta y, a raíz de este aumento de renovaciones de aire, un aumento de la calidad del aire del local, como se puede observar en las imágenes de las concentraciones de CO<sub>2</sub>.

Para el caso con puerta cerrada, la concentración de CO<sub>2</sub> en la mayor parte de la sala es superior a 1600 ppm. Para una sala de estas características, el valor que presentaría una buena calidad de aire sería un valor de concentración de CO<sub>2</sub> menor a 800 ppm. Al abrir la puerta, la mejora de ventilación repercute en la calidad del aire disminuyendo la concentración de CO<sub>2</sub> y estabilizándose (para el estado estacionario) en aproximadamente

1080 ppm para la mayor parte de la sala, exceptuando la zona de la entrada donde dicha concentración se estabiliza en aproximadamente 1500 ppm. Esto podría darse debido a que, por geometría, esa zona de la sala esta peor ventilada, como se puede comprobar en las imágenes de las líneas de flujo, ya que la puerta direcciona el aire hacia el fondo de la sala que es donde se sitúan los extractores.

En cuanto a la probabilidad de contagio, como era de esperar, el aumento de renovaciones de aire (abrir la puerta) hace que sea menor con respecto al caso con la puerta cerrada. Para este proyecto se ha tomado como valor umbral una probabilidad de contagio del 2% (amarillo en las gráficas). Como se puede apreciar, la influencia del tiempo de exposición también es relevante, siendo mayor la probabilidad de contagio, para el mismo caso (puerta abierta o cerrada), durante un tiempo de exposición de 60 minutos que durante un tiempo de 30 minutos. Dado que la cabeza infectada se ha colocado en la zona de la entrada de la sala, zona que se encuentra peor ventilada, el campo de probabilidad de contagio es muy amplio. Sin embargo, como se puede observar en el *apartado 4 del ANEXO 5*, un cambio de posición del individuo contagiado (uno en el centro y otra en el fondo) permite apreciar cómo, al ser zonas mejor ventiladas, el campo de probabilidad de contagio es menor, tanto para el caso con la puerta cerrada como con el caso de puerta abierta, respecto a los casos base. El caso en el que se ha situado la cabeza contagiosa en el centro de la sala es que presenta menor campo de probabilidad de contagio. Esto es debido a que esa zona es la que dispone de una mayor y mejor ventilación por estar situada más cerca de la puerta principal.

Además, en el *apartado 5 del ANEXO 5* se pueden visualizar otros casos alternativos que se han elaborado. El primero de ellos, que se denominará caso teórico, considera correcta la capacidad de renovación de aire teórica por parte de los extractores, es decir, de 4000 m<sup>3</sup>/h, o lo que viene a ser igual, 1.31 kg/s (dato que se ha introducido como condición de contorno). Para el segundo caso alternativo, se ha considerado un cambio de extractores y se ha aumentado su capacidad de extracción en un 50% con respecto a la extracción teórica, siendo esta de 6000 m<sup>3</sup>/h (1.97 kg/s).

Como era de esperar, si al abrir la puerta (aumento de la tasa de renovación del aire) los resultados de calidad del aire y de probabilidad de contagio mejoraban con respecto al caso con la puerta cerrada, los resultados para estos últimos casos en los que se ha aumentado la capacidad de extracción mejoran todavía más los resultados. La concentración de CO<sub>2</sub> en ninguno de los dos casos sobrepasa, en valor medio, las 800 ppm, siendo para el caso teórico 770 ppm y para el teórico aumentado de 690 ppm. La distribución de la probabilidad de contagio es tal que apenas el 1% de probabilidad de contagio llega al individuo más próximo al individuo contagioso.

### **3.5.2 RESOLUCION MODELO TRANSITORIO**

Tras realizar la resolución del flujo, turbulencia y energía en estado estacionario se procede a la resolución en estado transitorio de las variables impuestas en la UDF explicada en el apartado 2.4 de este trabajo.

En dinámica de fluidos se dice que un flujo es transitorio cuando las variables que definen dicho flujo cambian localmente con el tiempo.

Para la resolución de este proyecto se ha requerido del modelo transitorio ya que se va a comprobar cómo evoluciona la calidad del aire con el tiempo para poder contrastar estos

resultados con los obtenidos de manera experimental por LIFTEC. Además, también se podrá apreciar la evolución temporal de la probabilidad de contagio en el tiempo.

Para comenzar la resolución del modelo transitorio, se comienza por el caso base con la puerta cerrada, al igual que se comenzaba con este estudio en el estudio elaborado por LIFTEC. El primer paso que se debe efectuar es el de congelar las variables calculadas previamente en el estado estacionario, es decir, el flujo, la turbulencia y la energía. A continuación, se realiza la inicialización de las variables de estudio. Para el modelo transitorio las variables de estudio serán los scalares que han sido añadidos a través de la UDF. La inicialización de estos valores será:

- **Edad del aire (scalar 0):** la edad del aire al comienzo del estudio, medida en segundos, será nula debido a que empezará a aumentar a partir del instante inicial de tiempo.
- **Quanta (scalar 1):** los quanta iniciales que hay en el interior del local son nulos ya que será a partir del instante inicial cuando entren los individuos, y por lo tanto empiece a crecer la concentración de quanta en el interior.
- **Concentración CO<sub>2</sub> (scalar 2):** la concentración de CO<sub>2</sub> inicial en el local será distinta, según los datos facilitados por LIFTEC, para cada una de las tres zonas de la sala, siendo 0,001067 kgCO<sub>2</sub>/kgAire para la zona de entrada, 0,001018 kgCO<sub>2</sub>/kgAire para la zona del medio y 0,000899 kgCO<sub>2</sub>/kgAire para la zona del fondo. Estos valores han sido calculados como se puede comprobar en el ANEXO 5, y se refieren a 679, 648 y 572 ppm de CO<sub>2</sub> respectivamente.
- **Probabilidad de contagio (UM1):** debido a que al comienzo del transitorio los quanta son nulos, y la probabilidad de contagio, como se ha explicado en el apartado 2.3 de este proyecto, depende de él, así como del tiempo, que en el instante inicial es cero, inicializaremos esta probabilidad a 0%.

Una vez inicializados los valores de las variables de estudio, el tipo de estudio pasa de “steady” (estacionario) a “transient” (transitorio) y en el apartado de “methods” se selecciona el método de segundo orden para obtener mejores resultados. Llegados a este punto, antes de inicializar el proceso de cálculo, se procede a añadir el “report” de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en los sensores que se han explicado al principio de este apartado. Este report crea un fichero de texto con todos los resultados que se van obteniendo conforme avanzan los cálculos del transitorio. Con estos datos del transitorio se elaborará una gráfica del estilo de la *imagen 1* que podrá ser utilizada para comparar los datos experimentales con los datos obtenidos mediante CFD.

Debido a que, en el estudio experimental realizado por LIFTEC, el tiempo que está cerrada la puerta es una hora aproximadamente, para este primer transitorio de una hora el cálculo tendrá un tamaño de paso de tiempo de un segundo y el número de pasos de tiempo serán 3420, lo que es equivalente a los 57 minutos iniciales.

Una vez finalizados estos cálculos del primer transitorio (puerta cerrada), se utiliza la opción “interpolate”, y en dicha opción se escoge “write data”. Esta opción permite guardar los datos con los que ha finalizado el transitorio en un archivo de texto. Una vez se dispone de estos datos finales del primer transitorio, se indicarán como datos iniciales del segundo transitorio (puerta abierta). Los datos que se ha escogido para guardar, de este primer

transitorio, son impuestos una vez abierto el caso de la puerta abierta, mediante la opción "interpolate" y en dicha opción se escoge ahora "Read and Interpolate" (leer e interpolar). Al leer e interpolar los datos del primer transitorio en el comienzo del segundo, el propio software impondrá como condiciones de entrada en cada celda de la malla la misma condición con la que finalizó el primer transitorio en dicha celda.

Cuando se dispone del segundo caso preparado para iniciar el transitorio, se añade el "report" de las concentraciones de CO<sub>2</sub>. Este report genera un fichero de texto con los resultados del transitorio que se utilizará para analizar los resultados una vez finalizado este.

Para el segundo transitorio el cálculo dispondrá de un tamaño de paso de tiempo de un segundo y el número de pasos de tiempo serán 1800, lo que es equivalente a 30 minutos, debido a que en el estudio experimental realizado por LIFTEC el tiempo que está abierta la puerta es de media hora.

Los resultados del cálculo transitorio se pueden ver en el apartado 4 de este trabajo donde se comentan y comparan con los resultados obtenidos por LIFTEC.



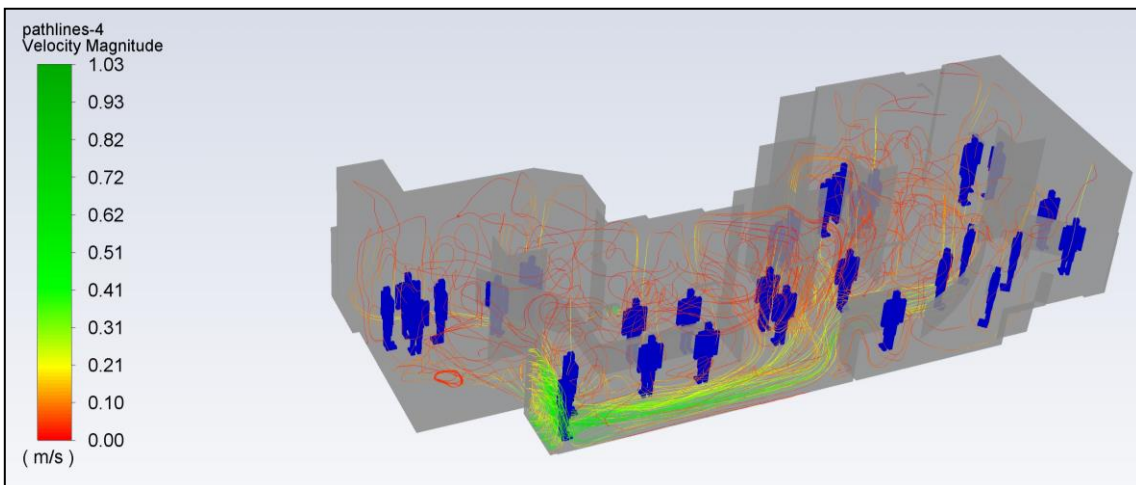


## 4 ANALISIS DE RESULTADOS

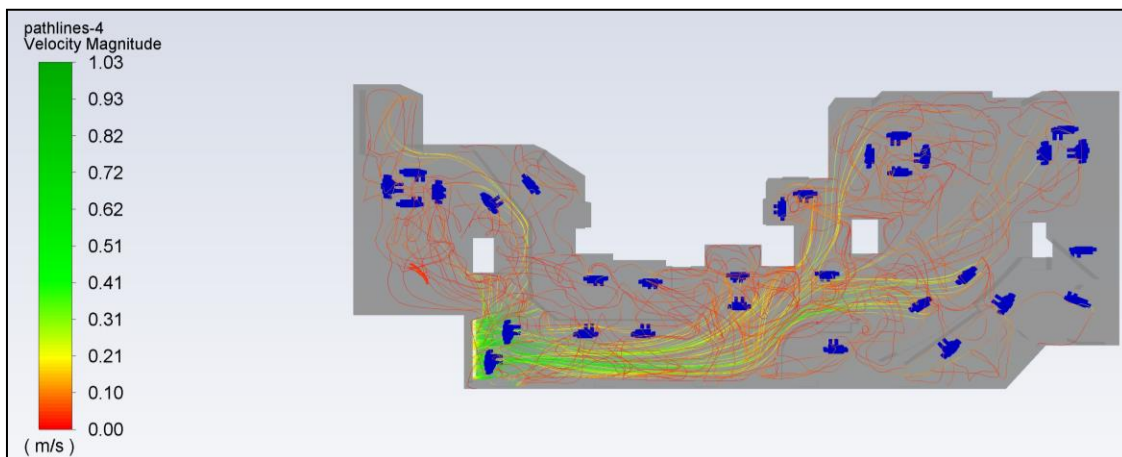
En el presente apartado se van a presentar los resultados obtenidos mediante la simulación en estado transitorio. En primer lugar, con la puerta cerrada durante un tiempo de 57 minutos y, a continuación, con la puerta abierta durante un periodo de 30 minutos, lo que equivale a un aumento de la tasa de renovación de aire de la sala. Dichos resultados se van a contrastar con los resultados proporcionados por LIFTEC de las medidas experimentales que realizaron durante el día 29 de diciembre de 2020.

En este análisis de resultados se van a presentar diferentes imágenes comparativas entre los dos casos, transcurridos los 57 y los 30 minutos respectivamente, para poder comprobar las diferencias entre ambos.

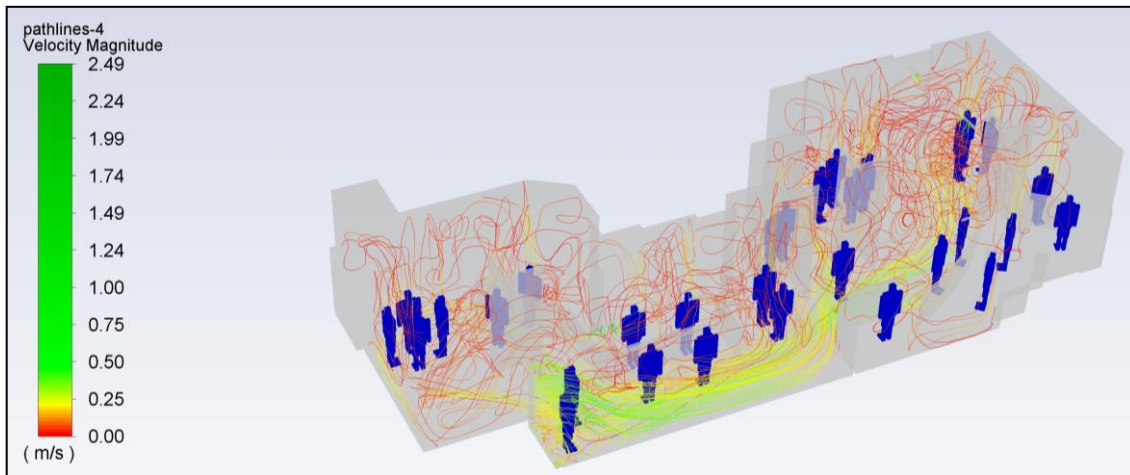
Se comienza por las líneas de flujo. El postprocesamiento de las líneas de flujo referidas a la velocidad del fluido (aire) se ha elaborado en forma de “semáforo”, donde las líneas de flujo de color rojo corresponden a velocidades lentas y las verdes a velocidades altas. Se coloca el nivel umbral, en color amarillo, en 0.2 m/s en ambos casos para poder comparar, con la misma escala, como resultan las velocidades del aire.



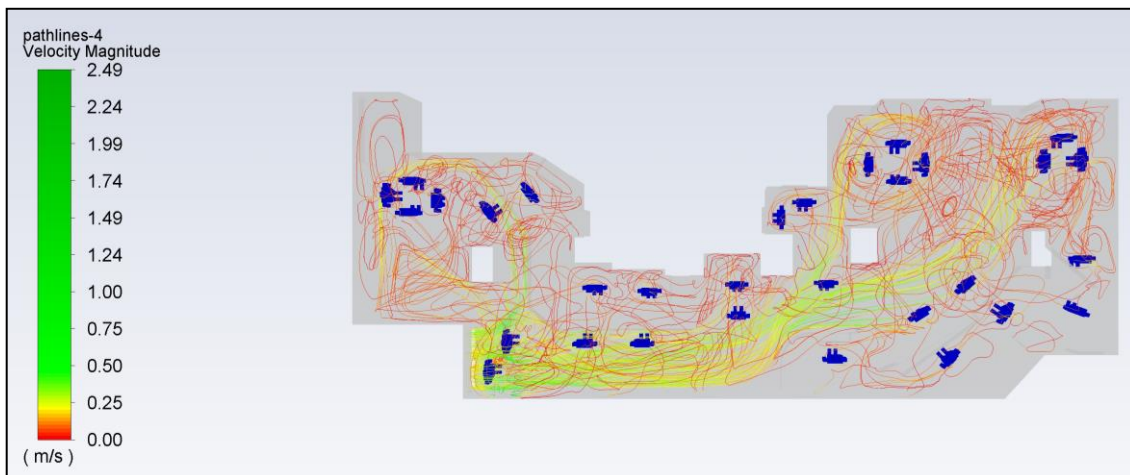
**Imagen 5. Vista isométrica de líneas de flujo estilo “semáforo” para el caso en estado transitorio con la puerta CERRADA. Fuente: elaboración propia**



**Imagen 6. Vista en planta de líneas de flujo estilo “semáforo” para el caso en estado transitorio con la puerta CERRADA. Fuente: elaboración propia.**



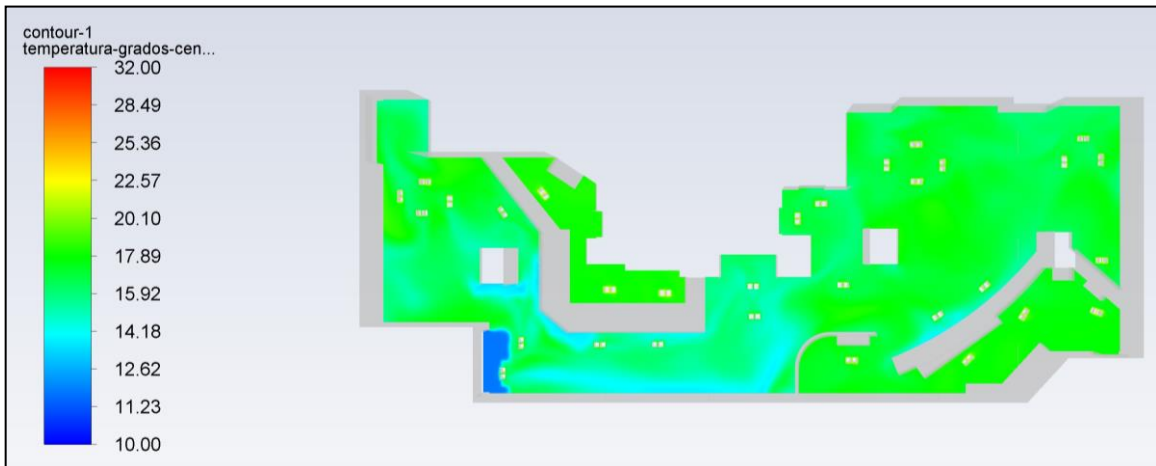
**Imagen 7. Vista isométrica de líneas de flujo estilo “semáforo” para el caso en estado transitorio con la puerta ABIERTA. Fuente: elaboración propia.**



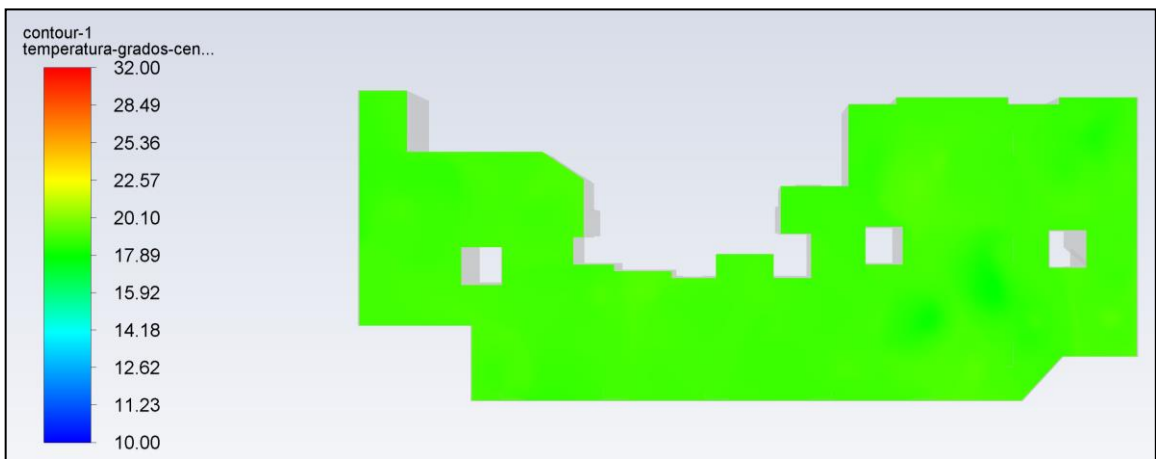
**Imagen 8. Vista en planta de líneas de flujo estilo “semáforo” para el caso en estado transitorio con la puerta ABIERTA. Fuente: elaboración propia.**

Como se puede apreciar en las *imágenes 5 y 6*, correspondientes al caso con la puerta cerrada, al ser un caso con menor tasa de renovación del aire, las velocidades del aire máximas y, en general, las velocidades en las diferentes zonas de la sala son inferiores, que las de las *imágenes 7 y 8*, correspondientes al caso con la puerta abierta. Las mayores velocidades se dan en las zonas de entrada y salida de aire (puerta y extractores) para ambos casos. Estas imágenes indican que, como era de esperar, la ventilación será mejor cuando se abre la puerta. Esto se puede visualizar de mejor manera en las vistas en planta de ambos casos donde, para el caso con la puerta abierta, el color amarillo destaca de mayor manera sobre el rojo (mayoría de rojo en el caso con la puerta cerrada) e incluso llega a las zonas de entrada y fondo de la sala, que se consideran peor ventiladas.

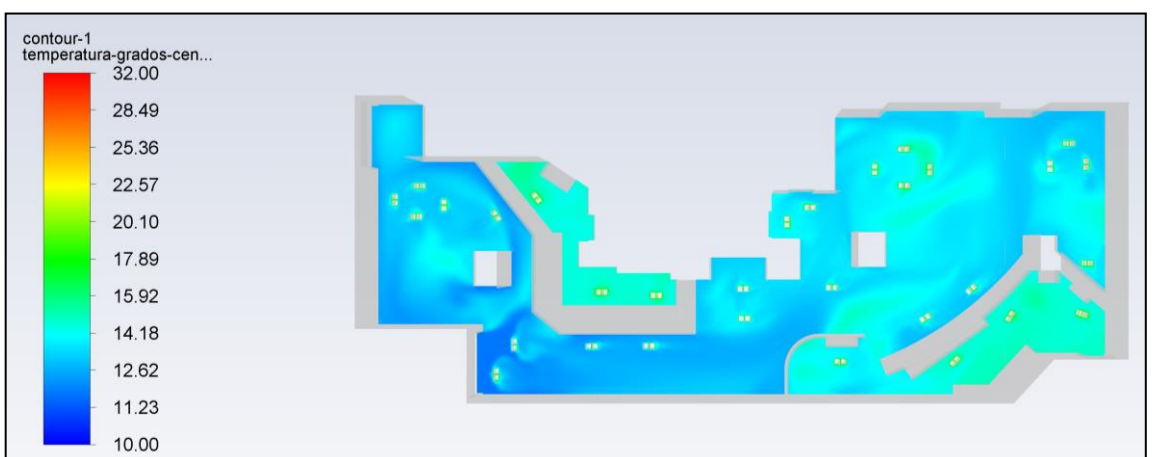
Relacionado también con la ventilación y renovación del aire se pueden observar, a continuación, imágenes para ambos casos de estudio sobre la temperatura del local. Se ha decidido colocar la misma escala de rango de temperatura para poder comparar mejor este cambio, así como presentar resultados para dos alturas diferentes (altura del suelo y altura del techo de la sala).



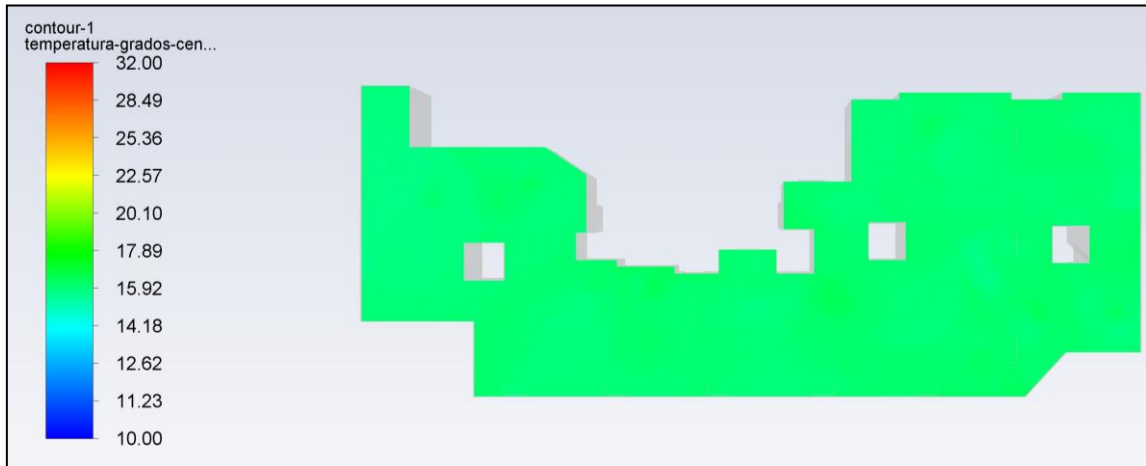
**Imagen 9. Temperatura del techo para el caso en estado transitorio con puerta ABIERTA. Fuente: elaboración propia**



**Imagen 10. Temperatura del techo para el caso en estado transitorio con puerta CERRADA. Fuente: elaboración propia**



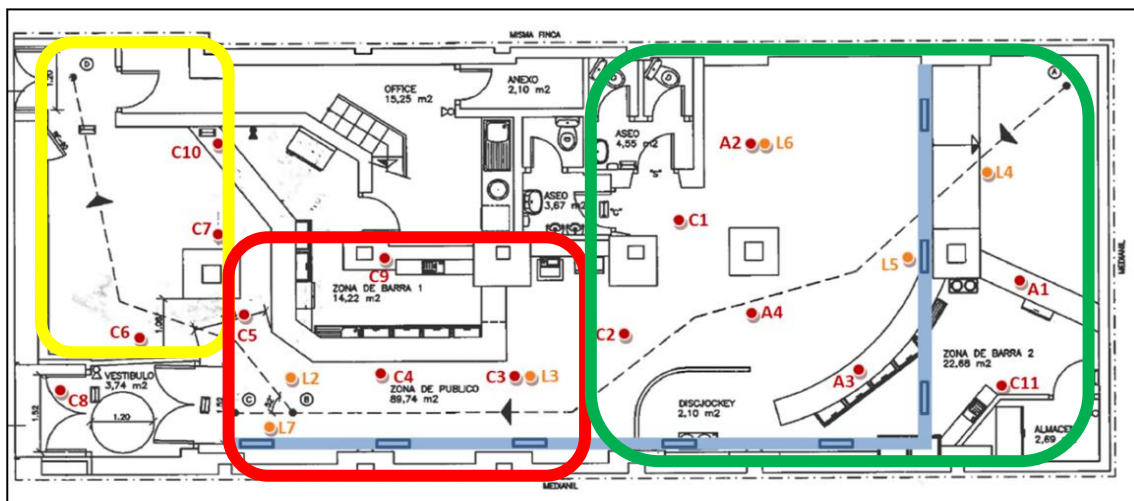
**Imagen 11. Temperatura del suelo para el caso en estado transitorio con puerta ABIERTA. Fuente: elaboración propia**



**Imagen 12. Temperatura del techo para el caso en estado transitorio con puerta ABIERTA. Fuente: elaboración propia**

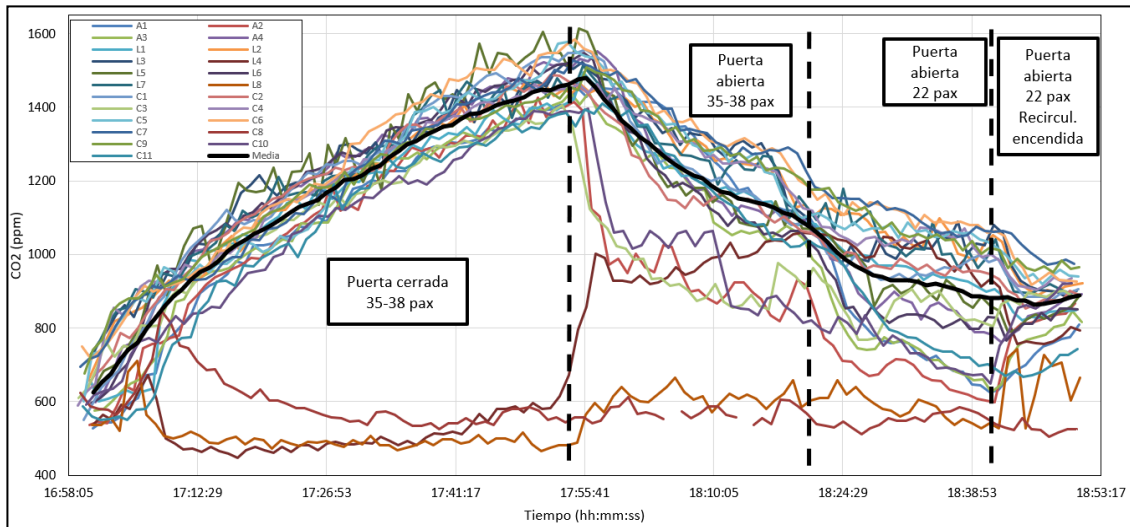
Las imágenes 9 y 10 muestran la distribución de temperaturas en el suelo y el techo de la sala respectivamente, para el caso con la puerta cerrada, obteniendo una media de 16°C para el suelo de la sala y de 18°C para el techo. Si comparamos con los resultados obtenidos para el caso con la puerta abierta, imágenes 11 y 12, se puede observar que una mayor ventilación del local reduce la temperatura de este, de forma que ahora se dispone de una media de temperaturas de 14°C para el suelo de la sala y de 15°C para el techo de esta. Un rango de temperaturas tan bajo puede ser debido a que el estudio experimental elaborado por LIFTEC se realiza un 29 de diciembre por lo que se ha considerado que la temperatura exterior, temperatura de la puerta, era de 12°C.

A continuación, se va a proceder al análisis de resultados de la calidad del aire de la sala, es decir, el análisis de la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire. Para ello, se ha recogido un dato por minuto, en cada uno de los sensores de la sala. Estos sensores se han dividido, como en el estudio elaborado por LIFTEC, por zonas. A continuación, en la imagen 13, se puede visualizar esta división donde se dispone en amarillo de la zona “entrada” en rojo de la zona “centro” y en verde de la zona “fondo”.

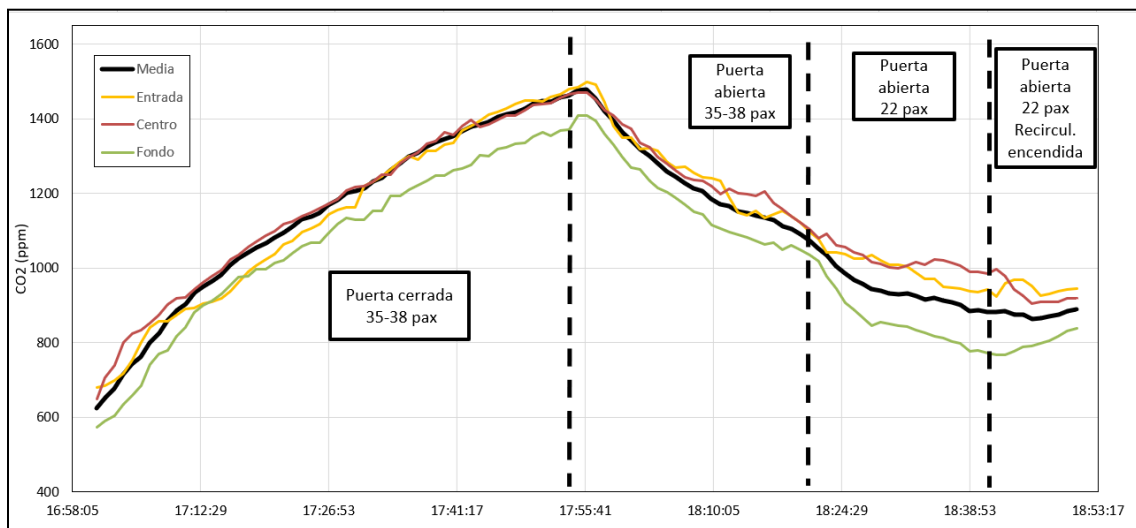


**Imagen 13. Distribución de los sensores de medición de CO<sub>2</sub> en la sala divididos por zonas. Fuente: “Medidas de ventilación y CO<sub>2</sub> en establecimientos de hostelería” LIFTEC**

Además, también se van a incorporar, en las *imágenes 14 y 15*, las gráficas facilitadas por LIFTEC con las medidas de los sensores distribuidas por sensores (*imagen 14*) y por las zonas mencionadas anteriormente (*imagen 15*).



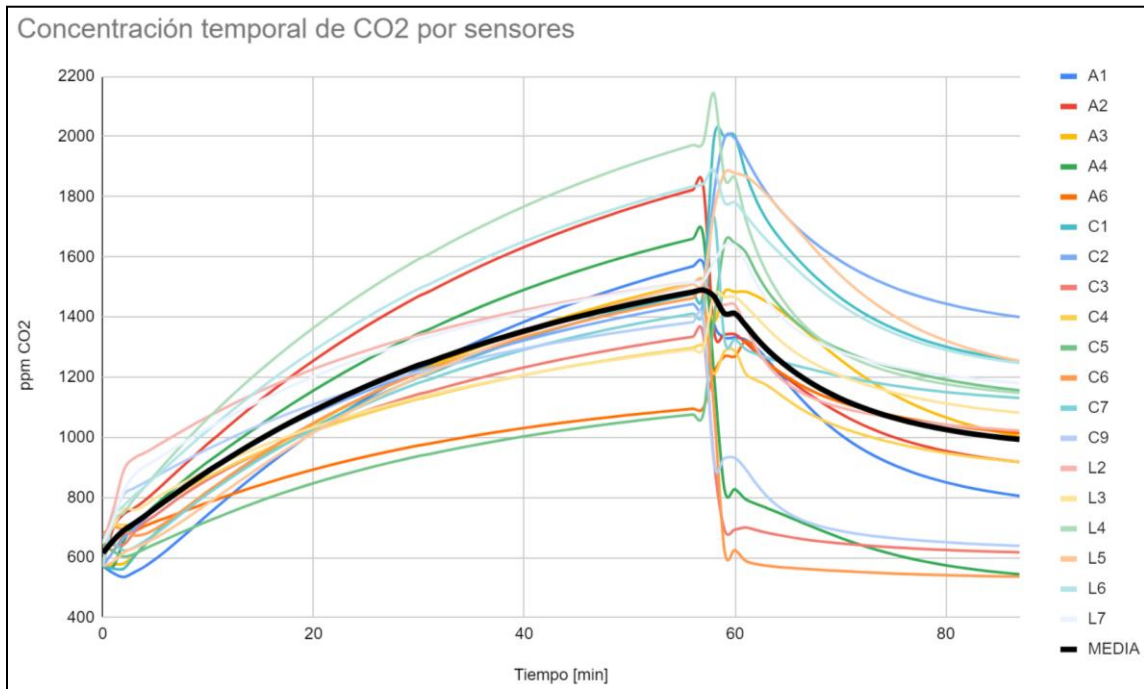
**Imagen 14. Gráfica temporal de ppm de CO<sub>2</sub> con personas en el interior por sensores. Fuente: “Medidas de ventilación y CO<sub>2</sub> en establecimientos de hostelería” LIFTEC.**



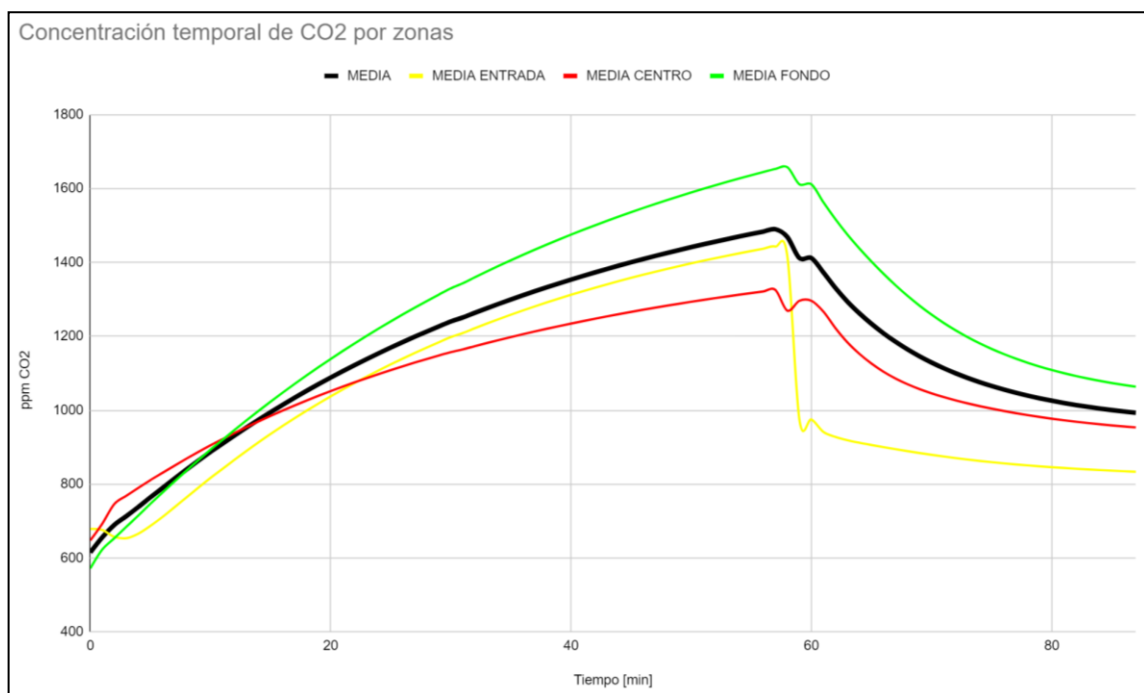
**Imagen 15. Gráfica temporal de ppm de CO<sub>2</sub> con personas en el interior por zonas. Fuente: “Medidas de ventilación y CO<sub>2</sub> en establecimientos de hostelería” LIFTEC.**

En el *ANEXO 6* de este trabajo se pueden visualizar todos los datos recogidos de manera computacional, mediante CFD, con los que se ha trabajado para elaborar las gráficas presentadas a continuación en las *imágenes 16 y 17*.

Dichos datos se han dividido en tablas, según la zona de procedencia del sensor. Además, se han incorporado los datos medidos por LIFTEC en cada zona de la sala y la media, tanto de las medidas de LIFTEC obtenidas experimentalmente, como de las medidas realizadas de forma computacional para la elaboración de este proyecto, todo ello se ha elaborado mediante una hoja de cálculo Excel.



**Imagen 16. Gráfica temporal de ppm de CO<sub>2</sub> con personas en el interior por zonas. Fuente: Elaboración propia.**



**Imagen 17. Gráfica temporal de ppm de CO<sub>2</sub> con personas en el interior por zonas. Fuente: Elaboración propia.**

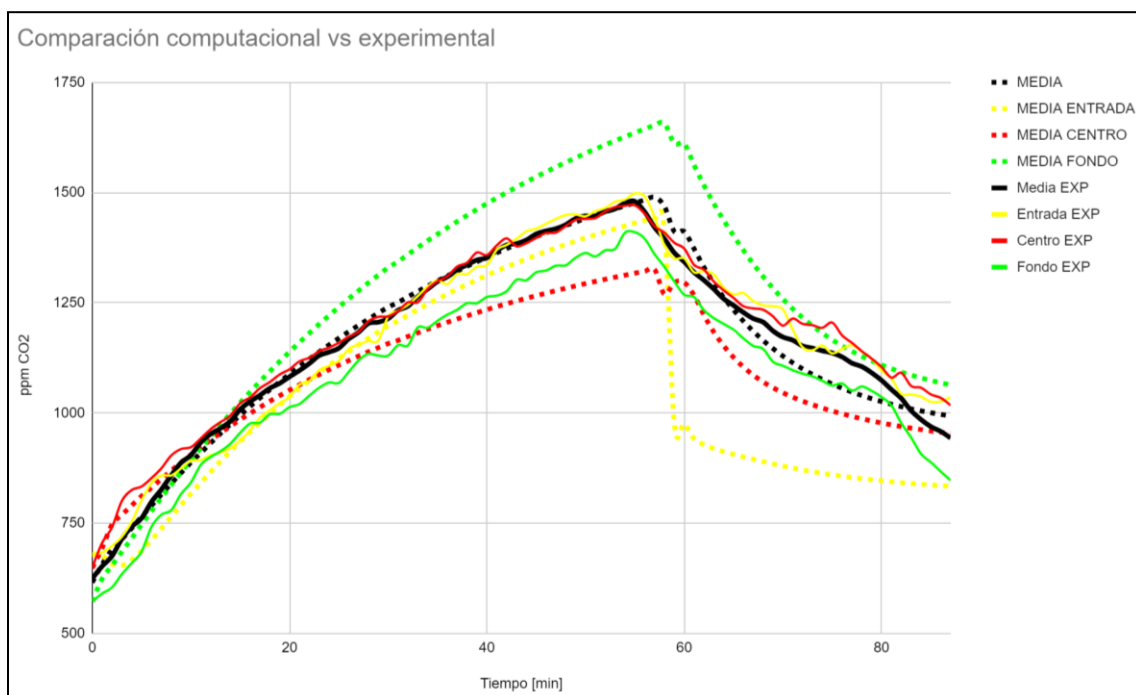
En cuanto a la relación entre las imágenes referidas a las gráficas temporales de concentración de CO<sub>2</sub> esta queda: la *imagen 14* (experimental) y la *imagen 16* (computacional), que representan la gráfica temporal de la concentración de CO<sub>2</sub> en todos los sensores y, la *imagen 15* (experimental) y la *imagen 17* (computacional), que representan

gráfica temporal de las medias de las concentraciones de CO<sub>2</sub> para las diferentes zonas de la sala.

En general se puede apreciar como las gráficas experimentales y computacionales siguen la misma tendencia. Al comienzo, instante con tiempo igual a 0 minutos, se aprecia una tendencia ascendente. Esto es debido a que, con la puerta cerrada, la tasa de renovación de aire no es suficiente como para ventilar y renovar de forma correcta el aire de la habitación, y por lo tanto la concentración de CO<sub>2</sub> es cada vez mayor. Los valores iniciales coinciden (condición inicial de contorno para las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la sala) y la pendiente ascendente es muy similar en ambos estudios hasta llegar al instante final de primer transitorio, 57 minutos. Hay que destacar que los valores finales no son exactamente los mismos debido a que la distribución de personas que se ha supuesto para el estudio computacional es fija y totalmente aleatoria. Esto es debido a que no hay datos de la distribución de personas en el estudio experimental. Por lo tanto, seguramente haya individuos en el estudio computacional demasiado cerca de los sensores. Como estos individuos están constantemente produciendo CO<sub>2</sub> los resultados se ven influidos por ellos. Probablemente durante el estudio experimental las personas ocupaban posiciones diferentes y se movían por la sala creando otra distribución diferente de personas, lo que repercute en la concentración de CO<sub>2</sub> por zonas. Aun así, la tendencia de dicha concentración es similar entre ambos estudios.

Una vez llegado el instante inicial del segundo transitorio, apertura de la puerta, se observa como la tendencia de concentración de CO<sub>2</sub> es ahora descendente. Una mayor tasa de renovación del aire de la sala permite una mejor ventilación del local y, por lo tanto, una disminución progresiva de la concentración de CO<sub>2</sub> en toda la sala. En este caso, se puede apreciar que, a partir del instante de tiempo 80 minutos (una hora y veinte minutos), las curvas de concentración de CO<sub>2</sub> empiezan a estabilizarse llegando en ambos casos a valores aproximados de 1000 ppm.

Para una mejor visualización de los resultados de este proyecto se ha procedido a elaborar una gráfica que compara, por zonas, los resultados obtenidos entre el modelo experimental, trazo continuo, y el computacional, trazo discontinuo. Esta gráfica se puede visualizar a continuación en la *imagen 18*.



**Imagen 18. Comparación temporal entre experimental y computacional de ppm de CO<sub>2</sub> con personas en el interior por zonas. Fuente: Elaboración propia.**



En la gráfica de la *imagen 18* se puede observar, en líneas continuas, la distribución por zonas de la concentración de CO<sub>2</sub> para el estudio experimental realizado por LIFTEC. En trazo discontinuo se puede observar la distribución por zonas de la concentración de CO<sub>2</sub> para el estudio computacional realizado para este proyecto. Además, la distribución de colores sigue: en amarillo de la zona “entrada”, en rojo de la zona “centro”, en verde de la zona “fondo” y en negro la media de las tres zonas. También se ha elaborado, como se muestra en la *tabla 2*, el error entre los resultados experimentales y computacionales, por zonas.

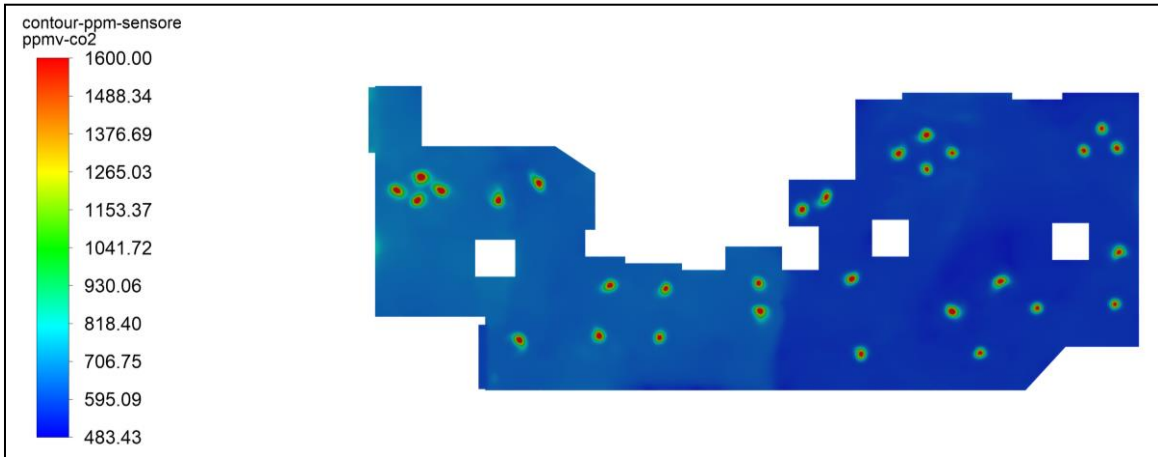
ERROR ENTRADA	10.70041	%
ERROR CENTRO	7.77031	%
ERROR FONDO	13.97061	%
ERROR DE LA MEDIA	1.88005	%

**Tabla 2. Errores por zonas entre los estudios experimentales y computacionales. Fuente: elaboración propia.**

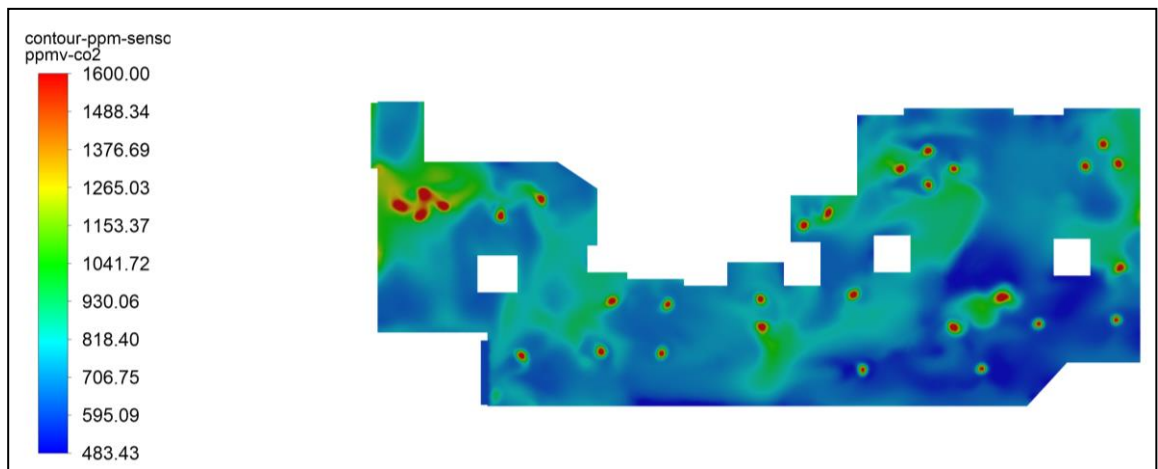
La comparación entre las gráficas de los modelos experimentales y computacionales refleja un buen resultado, como se ha explicado antes, en cuanto a la tendencia de las concentraciones temporales de CO<sub>2</sub>, primero ascendente (caso con puerta cerrada durante 57 minutos) y al abrir la puerta descendente. Como se puede apreciar, el error entre las medias de ambas gráficas es inferior al 2%.

La diferencia entre las medidas experimentales y computacionales en las distintas zonas de la sala, que da como resultado un error mayor entre ellas puede ser debido a que la distribución de personas en el interior de la sala es diferente entre ambos estudios, siendo fija y aleatoria para el caso computacional y probablemente diferente al caso experimental, donde los individuos del interior seguramente tenían mayor movilidad por la sala. Por esto se cree que los errores mostrados se deben a que, en algunas zonas de la sala durante el estudio experimental, había más personas que las colocadas en el computacional y, por lo tanto, mayor tasas de expiración en esa zona lo que hace que la concentración de CO<sub>2</sub> sea mayor. Sin embargo, en otras zonas seguramente el número de personas fuera menor en el estudio computacional y de ahí que las concentraciones de CO<sub>2</sub> sean menores en otras zonas de la sala.

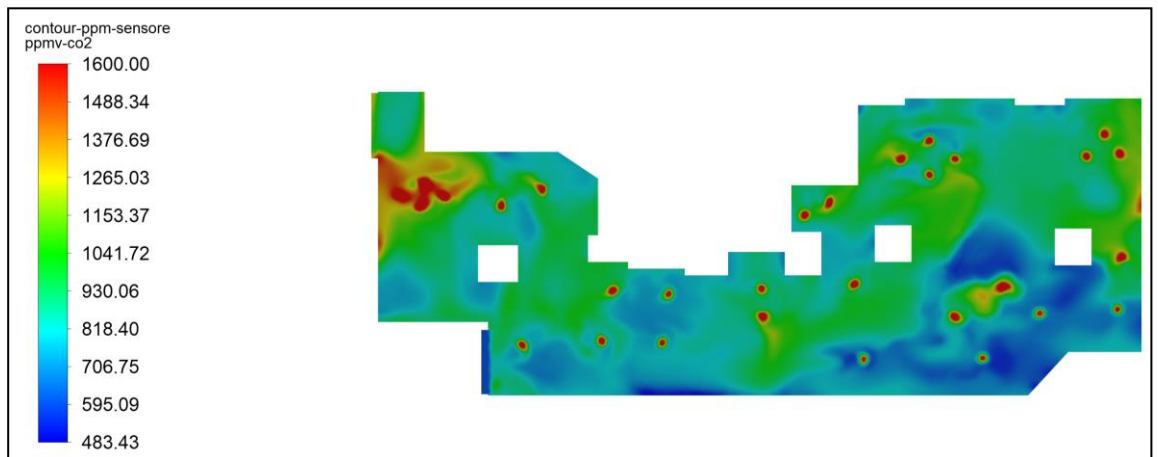
A continuación, en las *imágenes 19 a 27* se presentan las distribuciones temporales de concentraciones de CO<sub>2</sub> en la sala, donde se ve reflejado el campo de concentraciones de CO<sub>2</sub> desde el instante inicial (tiempo 0 minutos) hasta el final (tiempo 87 minutos) durante diferentes instantes de tiempo para visualizar mejor la evolución. En ellas se puede observar que, a partir de los 15 minutos de experimento, la concentración media de CO<sub>2</sub> ya es superior a 800 ppm (concentración límite que supone una buena calidad del aire). A partir de ese instante, y hasta el cambio de renovaciones de aire, los resultados empeoran. Las concentraciones más altas de CO<sub>2</sub> comienzan a darse en la zona de la entrada, donde podemos observar que a los 26 minutos ya alcanza aproximadamente las 1400 ppm, y a los 57 minutos la gran mayoría de la sala alcanza, o supera, este valor. En este instante se procede a abrir la puerta, la tasa de renovaciones de aire aumenta y en el instante final, la concentración media, excepto en la zona de la entrada (peor ventilación), se estabiliza en torno a las 1080 ppm.



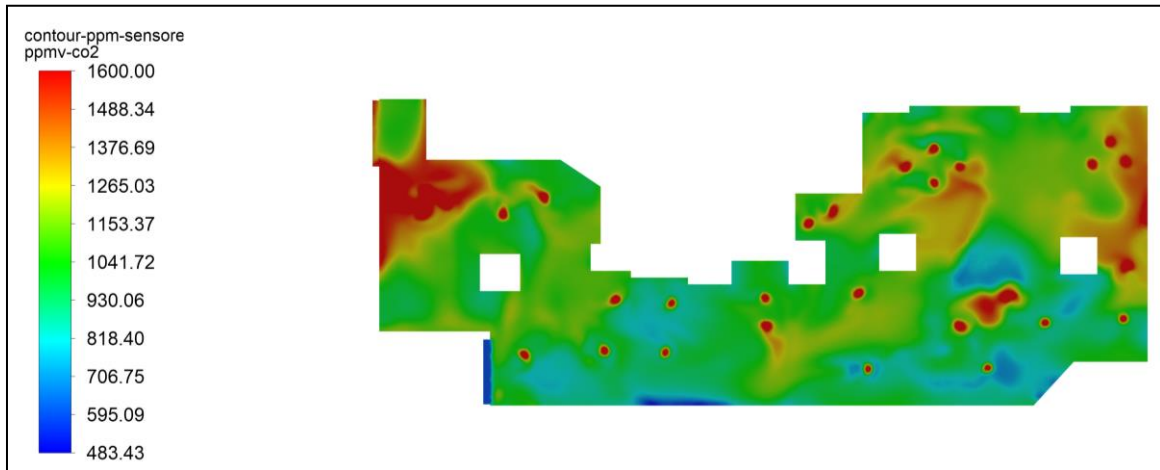
**Imagen 19. Distribución de la concentración de CO<sub>2</sub> en el instante t = 0 minutos. Fuente: elaboración propia.**



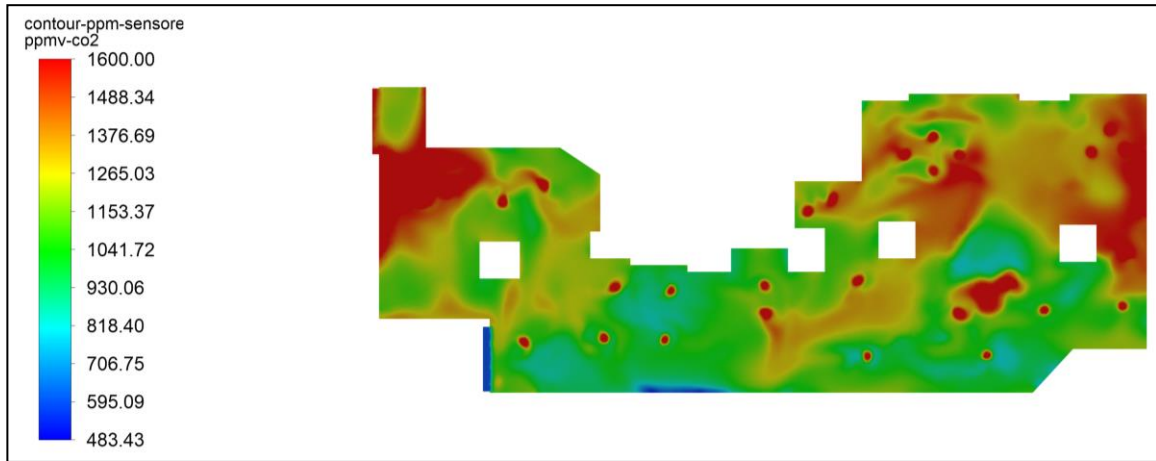
**Imagen 20. Distribución de la concentración de CO<sub>2</sub> en el instante t = 8 minutos. Fuente: elaboración propia.**



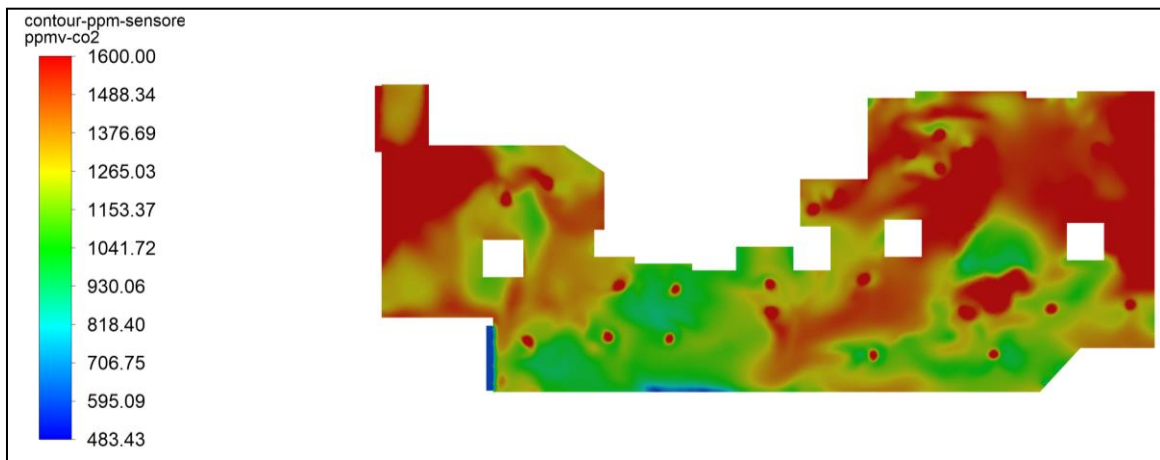
**Imagen 21. Distribución de la concentración de CO<sub>2</sub> en el instante t = 15 minutos. Fuente: elaboración propia.**



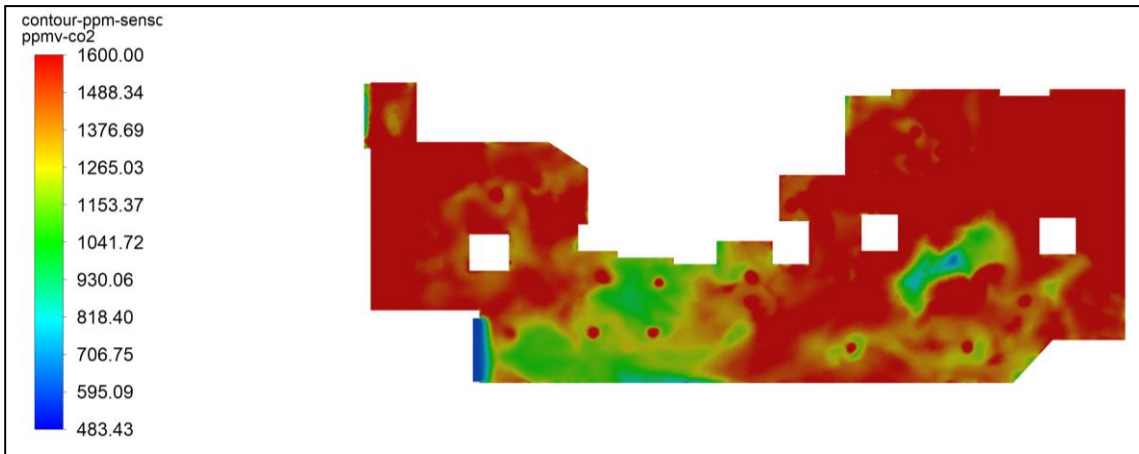
**Imagen 22. Distribución de la concentración de CO<sub>2</sub> en el instante t = 26 minutos. Fuente: elaboración propia.**



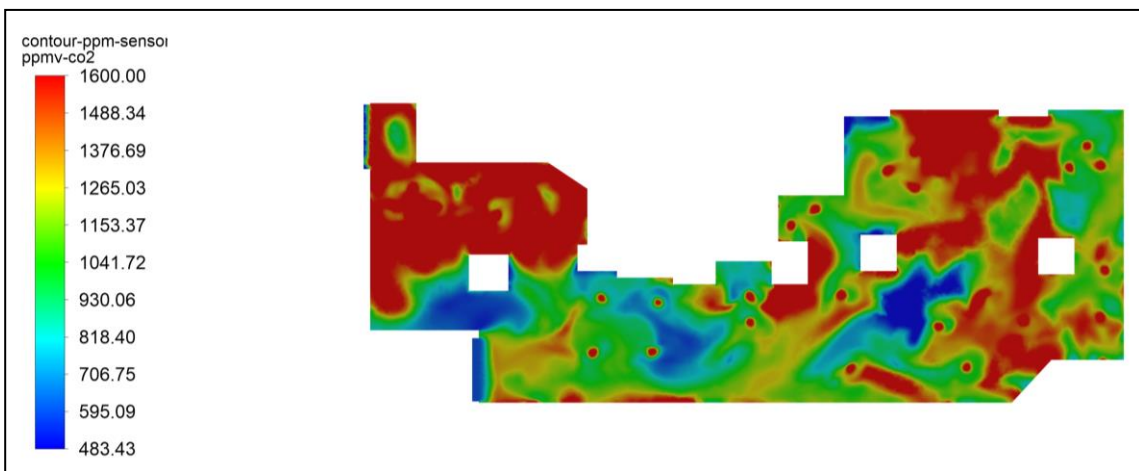
**Imagen 23. Distribución de la concentración de CO<sub>2</sub> en el instante t = 38 minutos. Fuente: elaboración propia.**



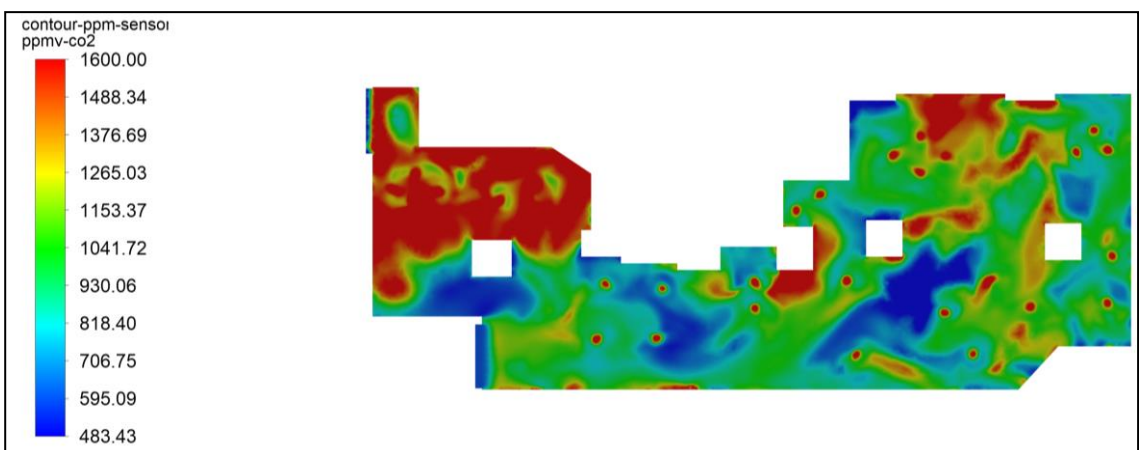
**Imagen 24. Distribución de la concentración de CO<sub>2</sub> en el instante t = 49 minutos. Fuente: elaboración propia.**



**Imagen 25. Distribución de la concentración de CO<sub>2</sub> en el instante t = 57 minutos. Fuente: elaboración propia.**



**Imagen 26. Distribución de la concentración de CO<sub>2</sub> en el instante t = 70 minutos. Fuente: elaboración propia.**



**Imagen 27. Distribución de la concentración de CO<sub>2</sub> en el instante t = 88 minutos. Fuente: elaboración propia.**

Una vez estudiada la calidad del aire de la sala, para finalizar este apartado se va a proceder al estudio de la probabilidad de contagio cuando un individuo del interior es portador del virus (contagioso). Se ha optado por disponer la peor situación posible, es decir, se va a colocar el individuo contagioso en la peor localización posible para ver el efecto que produce. Dicha situación será en la zona de la entrada, marcada en amarillo en la *imagen 13*, debido a que es la zona de la sala que tiene una peor ventilación y calidad del aire, como se ha podido comprobar anteriormente.

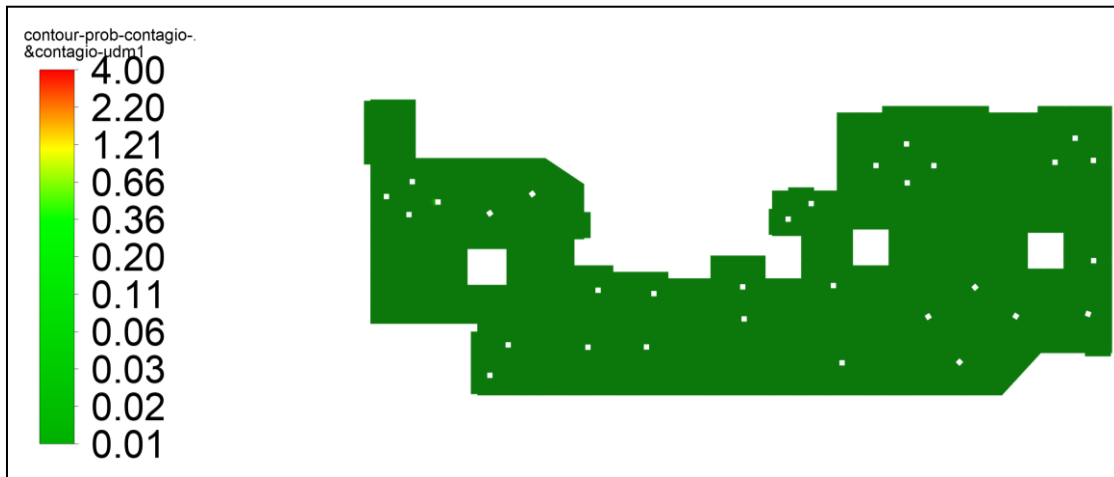


**Imagen 28. Distribución de los cuerpos en la sala. La flecha amarilla indica el individuo contagioso. Fuente: elaboración propia.**

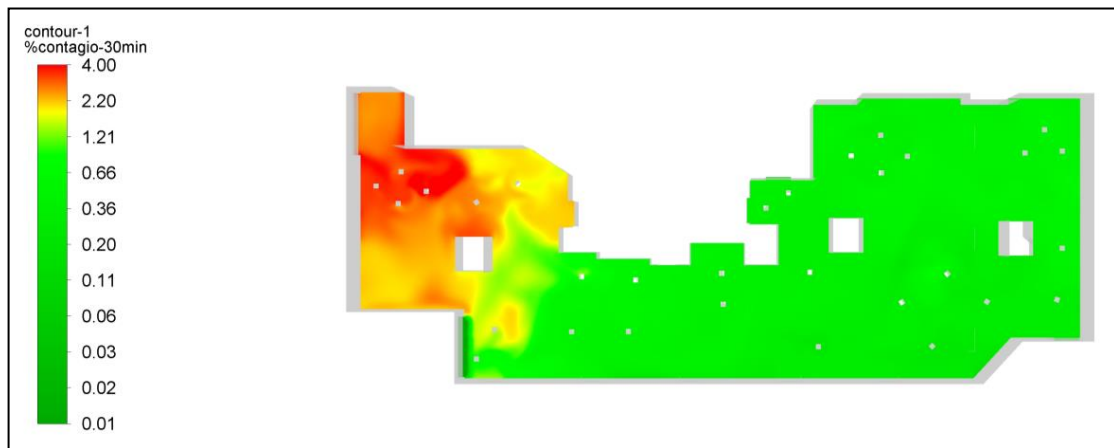
Como se ha explicado en las condiciones de contorno, se considera que en el instante inicial la probabilidad de contagio es nula, por lo tanto, la distribución de probabilidad de contagio irá aumentando conforme para el tiempo desde 0% para toda la sala. Para mostrar los resultados de probabilidad de contagio se ha optado por presentar los resultados en modo “semáforo” donde se ha marcado en verde probabilidades bajas y en rojo probabilidades altas. En amarillo se sitúa la probabilidad umbral, en este caso se ha optado por que este valor umbral sea del 2%.

Para poder comprobar la probabilidad de contagio se ha optado por realizar el primer transitorio y, al comienzo del segundo transitorio, inicializar la probabilidad de contagio para que una no influya a la otra y así poder comprobar que, efectivamente, el cambio de renovaciones de aire influye de manera positiva (a mayor tasa de renovación, menor probabilidad de contagio).

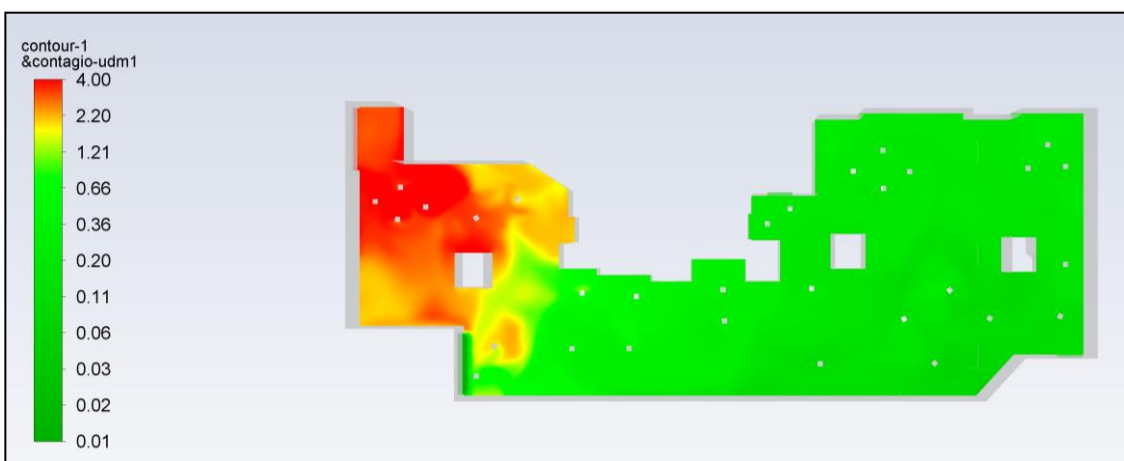
En las *imágenes 29 a 32* se puede visualizar la distribución en la sala de la probabilidad de contagio de manera temporal, de tal forma que la *imagen 29* corresponde al instante inicial del transitorio, las *imágenes 30 y 32* corresponden a la probabilidad de contagio para el minuto 30 de cada uno de los casos (puerta abierta y puerta cerrada) y la *imagen 31* corresponde al final del primer transitorio, es decir, al minuto 57.



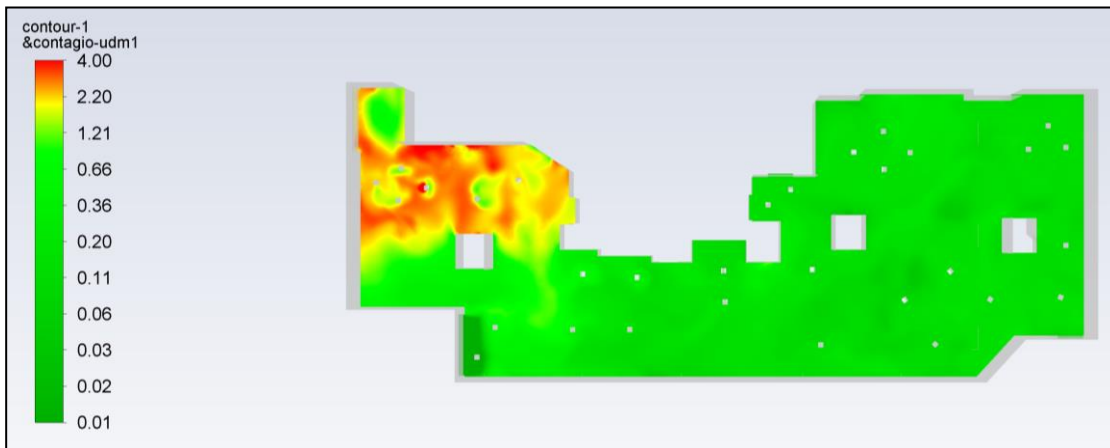
**Imagen 29. Distribución de la probabilidad de contagio, en porcentaje, en el instante t = 0 minutos. Fuente: elaboración propia.**



**Imagen 30. Distribución de la probabilidad de contagio, en porcentaje, en el instante t = 30 minutos. Fuente: elaboración propia.**



**Imagen 31. Distribución de la probabilidad de contagio, en porcentaje, en el instante t = 57 minutos. Fuente: elaboración propia.**



**Imagen 32. Distribución de la probabilidad de contagio, en porcentaje, en el instante  $t = 88$  minutos, inicializado a los 58 minutos. Fuente: elaboración propia.**

Como se puede comprobar en las imágenes, la probabilidad de contagio supera el valor umbral de 2% de probabilidad en la mayoría de la zona de entrada de la sala cuando la tasa de renovación de aire es baja (puerta cerrada). Cuando la tasa de renovación del aire es mayor (puerta abierta), podemos apreciar en la *imagen 32* que, claramente, existe una mejora en la distribución de la probabilidad de contagio. Dicha mejora se aprecia al comparar las *imágenes 30 y 32* porque ambas corresponden al mismo instante de tiempo.

Una vez vistos estos resultados, se puede afirmar que una buena ventilación del local, que en este caso se consigue con la apertura de la puerta, significa un menor riesgo de contagio por parte de los individuos que comparten espacio con la persona contagiosa.





## 5 CONCLUSIONES

---

Para la elaboración de este proyecto final de grado se ha optado por una metodología basada en CFD para analizar tanto la calidad del aire, como la probabilidad de contagio, por una enfermedad infecciosa transmitida por el aire, en un local de hostelería de la ciudad de Zaragoza. Se trata de un caso de actualidad en el último año debido al COVID-19. Se ha analizado el problema en estado estacionario, donde se han propuesto varios casos diferentes para analizar, y en estado transitorio, que se ha utilizado para corroborar unos resultados realizados en el mismo local de manera experimental por LIFTEC.

Comenzando por los casos en estado estacionario, los diferentes cálculos ilustran el efecto de los patrones de circulación de aire en la sala. Estos patrones ayudan a entender la capacidad de ventilación (renovación de aire) de la sala para determinar las distribuciones tanto de concentraciones de CO<sub>2</sub> (calidad del aire) como de quanta en el aire (probabilidad de contagio). En el caso base de este proyecto, con ventilación primero con puerta cerrada (menor) y después con puerta abierta (mayor), se puede comprobar claramente que el nivel de influencia de la ventilación es muy alto. La calidad del aire con la puerta cerrada no hace otra cosa que empeorar cuando la ventilación es menor, llegando a valores tales de concentración de CO<sub>2</sub> como 1700 ppm. Sin embargo, un incremento de capacidad de ventilación, con el simple hecho de abrir la puerta, permite una mayor calidad del aire de la sala, situando el valor medio de concentración de CO<sub>2</sub> de la sala, en estado estacionario, en 1000 ppm de CO<sub>2</sub>.

Como se ha podido demostrar, un cambio en el sistema de extracción, consiguiendo que los extractores funcionen a su capacidad teórica, influye de manera muy positiva en la calidad del aire, consiguiendo que la media en toda la sala sea de aproximadamente 800 ppm de CO<sub>2</sub>, un valor que se considera muy bueno para la calidad de aire de un espacio cerrado de estas características.

Los diferentes resultados han demostrado que, al igual que una mejor ventilación del local significa una mejor calidad del aire (reducción de concentración de CO<sub>2</sub>), una mayor tasa de renovación de aire consigue disminuir mucho la distribución de la probabilidad de contagio, siendo menor esta probabilidad de contagio cuando se realiza la apertura de la puerta, e incluso llegando a ser casi nula (para un tiempo de exposición de 30 minutos) cuando los extractores trabajan a su capacidad teórica. Por lo tanto, sería bueno realizar una inversión en el sistema de ventilación del local para conseguir llegar realmente a los 4000 m<sup>3</sup>/s. Otro factor también influyente es la situación del individuo contagioso. Se ha podido observar que, para el mismo tiempo de exposición, la distribución de probabilidad de contagio es menor para las zonas “medio” y “fondo” con respecto a la zona “entrada” donde la ventilación es peor. Una solución que se propone es la de abrir la puerta de emergencia del local, que está situada en la zona “entrada”, lo que aumentaría la ventilación de dicha zona, obteniendo una mayor calidad del aire y una menor probabilidad de contagio en dicha zona.

También se quieren indicar algunos aspectos relevantes del estudio en estado transitorio de este trabajo. Como ya se ha explicado, la tendencia temporal de los resultados de calidad del aire refleja una gran similitud entre el caso computacional y el experimental, siendo la concentración de CO<sub>2</sub> ascendente para el caso de puerta cerrada y descendente para el caso de puerta abierta y alcanzando, al finalizar el tiempo del transitorio, unas concentraciones de CO<sub>2</sub> muy similares a las del caso experimental. El error medio entre los dos estudios es menor al 2%, lo cual hace ver que la similitud general es muy alta. Ahora bien, existen diferencias de en torno al 10% entre las diferentes zonas de la sala entre los casos

experimental y computacional. Se cree que estas diferencias se deben a la posición de los individuos del interior de la sala. En el caso computacional (este proyecto) se ha considerado que los individuos del interior del local están, durante los 88 minutos que dura el estudio, en su interior y en la misma posición (fijos) ya que se han presentado en una disposición totalmente aleatoria, procurando situarlos a lo largo de toda la sala. Sin embargo, se cree que durante el estudio experimental realizado por LIFTEC, los individuos del interior del local tenían mayor movilidad, podían incluso salir en algún momento del local o podían estar situados la mayoría de ellos en dos de las tres zonas del local.

También puede ser otro factor influyente el hecho de que durante el estudio experimental no se dejara a los individuos del interior acercarse a los sensores de CO<sub>2</sub> por temor a que esto influyera en los cálculos (las personas también generan CO<sub>2</sub>). En el estudio computacional elaborado para este proyecto existen, quizás, algunos individuos demasiado cercanos a los sensores que pueden influir en los resultados de calidad del aire.

En cuanto a los resultados de la probabilidad de contagio durante el estudio transitorio, como era de esperar, esta sigue la misma evolución temporal que se podía visualizar previamente en el estudio estacionario. Esta distribución indica que la probabilidad de contagio, para el mismo tiempo de exposición, resulta menor cuando mejor es la tasa de renovación de aire de la sala. Es decir, durante la segunda parte del transitorio, donde mejora la ventilación del local con la apertura de la puerta, los individuos del interior del local que no son contagiosos tienen una menor probabilidad de contagiarse de COVID-19 que durante la primera parte del transitorio donde la ventilación es menor.

Cabe recordar que estos resultados de probabilidad de contagio han sido obtenidos con los parámetros epidemiológicos del coronavirus original y considerando que los individuos del interior del local no disponían de mascarillas. La imposición de mascarillas homologadas, bien quirúrgicas o bien FFP2, significaría una reducción de la probabilidad de contagio debido a que estas actuarían reduciendo tanto la tasa de espiración del individuo contagioso como la de inhalación de los individuos no contagiosos.

En el contexto actual (agosto del 2021) la variante *Delta*, detectada por primera vez en la India, es la más preocupante. La OMS clasifica a *Delta* como una variante de preocupación, lo que significa que ha demostrado ser capaz de aumentar la transmisibilidad, causar una enfermedad más grave o reducir el beneficio de las vacunas y los tratamientos.

Según Shane Crotty, virólogo del Instituto de Inmunología de La Jolla, en San Diego, el “superpoder” de *Delta* es su transmisibilidad. Los investigadores chinos descubrieron que las personas infectadas con *Delta* transportan 1.260 veces más virus en comparación con la versión original del coronavirus. Para incorporar el estudio de esta variante, y de otras (*Alpha*, Reino Unido o *Beta*, Sudáfrica), en este proyecto, que se ha elaborado con los parámetros epidemiológicos del coronavirus original, habría que añadir en las ecuaciones 2 y 3 de probabilidad de contagio un nuevo coeficiente. Se debe recordar en este punto que la probabilidad de contagio es una función que depende del tiempo de exposición, de la eficacia de la mascarilla y de la concentración de quanta. Se optaría por coeficiente de “transmisibilidad” y sería directamente proporcional al quanta. Este coeficiente de transmisibilidad indicaría como sería la transmisibilidad de la variante a estudiar con respecto a la original. Para el caso de una variante con menor transmisibilidad este coeficiente sería menor que uno y para un estudio de una variante con mayor transmisibilidad, como la variante *Delta*, este coeficiente sería mayor que uno. Se supone que para el estudio de una variante se sabría, como en el caso de la variante *Delta*, como sería este coeficiente de transmisibilidad.



## 6 BIBLIOGRAFIA

---

- [1] Vargas Marcos, F., Caballo Diéguez, C., García San Miguel, L., & Sierra Moros, M. J. (2020). *Evaluación del riesgo de la transmisión de SARS-CoV-2 mediante aerosoles. Medidas de prevención y recomendaciones*. 18 de noviembre de 2020.
- [2] Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA), C. (2020). *Emisión, exposición y filtración de SARS-CoV-2. Emisión y exposición a SARS-CoV-2 y opciones de filtración*. Versión 3.0, 15 de abril de 2020.
- [3] Fueyo, N., Cubero, A., & Güemes, G. (2021). *Transmission Risk of Airborne Diseases Indoors Using CFD: Application to COVID-19*. GFN – Universidad de Zaragoza. 14 January 2021.
- [4] Mora, X. (2017). *Navier-Stokes equations: Unpredictability even without butterflies? 0(8)*. <https://doi.org/10.7203/metode.8.9415>. *Mètode Science Studies Journal*. Universitat de València. Aceptado 10 de marzo de 2017.
- [5] Lozano Durán, A. (2019). *Apuntes sobre Dinámica de Fluidos Computacional*. Rev 0.6.0. 29 de abril de 2019.
- [6] Laboratorio de Combustión Industrial LIFTEC (CSIC/Univ. Zaragoza). (2021). *Medidas de ventilación y CO2 en establecimientos de hostelería*. Universidad de Zaragoza. Ref. LCI/21/02. Febrero del 2021. [www.unizar.es/lci](http://www.unizar.es/lci)
- [7] Jimenez, J. L., & Peng, Z. (2021). *COVID-19 Aerosol Transmission Estimator*. Version 3.5.7. Date 26 July 2021. <https://doi.org/10.1093/cid/ciaa1283>
- [8] de Dear, R. J., Arens, E., Hui, Z., & Oguro, M. (1996). *Convective and radiative heat transfer coefficients for individual human body segments*. Accepted 27 November 1996
- [9] Atecy, A. T. E. de C. y R. (2020). *Documento de recomendaciones REHVA COVID-19*. Revisado y actualizado el 17 de noviembre de 2020.



## ANEXO 1

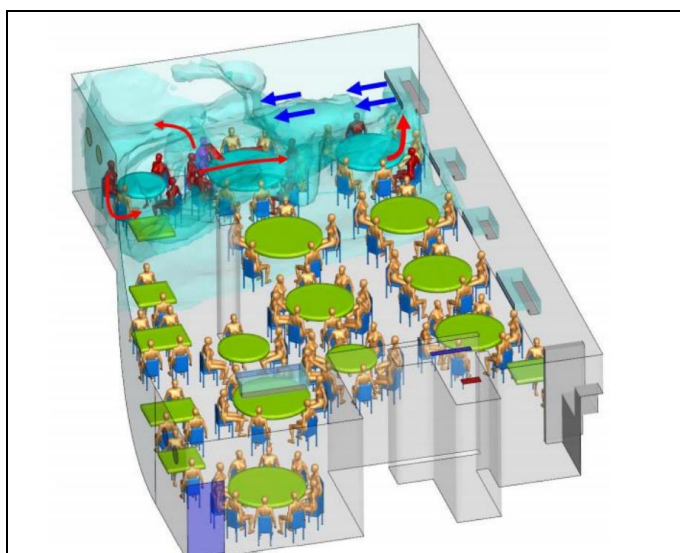
---

El presente ANEXO 1 hace referencia a los apartados teóricos de este proyecto. En él, se quiere exponer más detalladamente estudios o deducciones que complementan dicho apartado, incluyendo sus cuatro sub-apartados, 2.1 Aerosoles, 2.2 Quanta, 2.3 Probabilidad de contagio y 2.4 Mecánica computacional.

### APARTADO 1 – EJEMPLO DE ESTUDIO DE BROTES POR CONTACTO INDIRECTO

En el presente *apartado 1* se han descrito dos brotes, obtenidos del estudio (Vargas Marcos et al., 2020) en los que el contacto indirecto por vía inhalatoria parece el modo más plausible de contagio.

Así, por ejemplo, en un restaurante de Guangzhou, China, se estudió un brote entre los comensales de diferentes familias que participaron en una cena en el mes de enero de 2020.

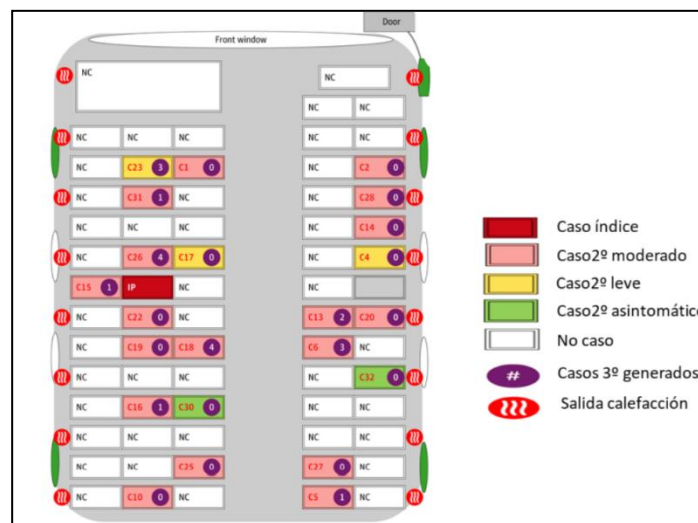


**ANEXO 1 Imagen 1. Brote en el restaurante de Guangzhou. Simulación de la dispersión de los aerosoles desde el caso índice (color magenta) siguiendo la corriente generada por aire acondicionado hasta los extractores del baño. Los casos secundariamente infectados se representan en color rojo y el resto de los comensales en color dorado. Fuente: original de Li et al**

El individuo contagioso era asintomático, por lo que se deduce que las emisiones respiratorias que producía eran mayoritariamente de muy pequeño tamaño. Se pudo constatar con los vídeos de seguridad del restaurante que no hubo contacto físico entre los asistentes de las otras mesas y que el aire acondicionado junto con la presencia de los comensales y el calor de los platos, entre otros factores, generaron una corriente entre las mesas donde se produjeron los casos secundarios (*ANEXO 1 Imagen 1*). Otro ejemplo es el brote del ensayo del coro del valle de Skagit, en una estancia cerrada durante 2,5 horas en el mes de marzo, con una tasa de ataque entre 53% (32 casos confirmados) y 87% (54 confirmados + probables) entre 60 participantes. En este ensayo se habían tomado medidas específicas de distanciamiento (0,75 metros entre ellos y 1,50 entre filas) y todos estaban asintomáticos, aunque no llevaban mascarillas. Posteriormente se identificó a una persona con síntomas leves que pudo ser el caso índice. Este evento de super diseminación no puede ser

explicado por la transmisión mediante partículas mayores de 100 µm ni fómites y sí puede ser explicado por la gran cantidad de aerosoles que se generan durante el canto, y la capacidad de estos para generar infección a una distancia mayor de 2 metros.

En varios brotes ocurridos en transportes públicos, en los que las personas viajaron sin mascarilla y casi no se movieron de los asientos o sus camarotes, también parece clara la contribución de la transmisión por aerosoles a distancias mayores de 2 metros, si bien no se pudieron descartar otras vías de transmisión. Un estudio detallado del crucero Diamond Princess atribuyó un 59% del contagio a los aerosoles. En Zhejiang, se investigó en profundidad un brote ocurrido en enero de 2020, antes del uso generalizado de mascarillas, entre los 293 participantes a un evento religioso, en el que 126 personas se desplazaron en dos autobuses similares, durante 100 minutos, con las ventanas cerradas y un sistema de calefacción en modo de recirculación del aire.



**ANEXO 1 Imagen 2. Transmisión por aerosoles en el autobús de Zhejiang. Fuente: "Evaluación del riesgo de a transmisión de SARS-CoV-2 mediante aerosoles. Medidas de prevención y recomendaciones" coordinado por el Ministerio de Sanidad de España**

Sólo se infectaron las personas que viajaron en el mismo autobús que el caso índice que en ese momento estaba asintomático (24 de 68, 35,3%) y no hubo ningún caso entre los viajeros del otro autobús ni el resto de los asistentes, pese a que el evento duró 180 minutos (150 minutos la misa y 30 minutos una comida). El riesgo de contagio en las personas que viajaron en el mismo autobús del caso índice fue 11,4 veces mayor que en el resto de los asistentes. Dentro del autobús, el riesgo fue similar para los que se sentaron próximos al caso índice que para los que se sentaron más lejos, sugiriendo transmisión por aerosoles debida a la recirculación del aire por todo el espacio cerrado (ANEXO 1 Imagen 2).

APARTADO 2 – MODELO CERO DIMENSIONAL Y SUPOSICION DE ESTADO ESTACIONARIO PARA LA ESTIMACION DE RIESGO

En el presente *apartado 2* se presenta un resumen de los modelos cero dimensionales que se utilizan con frecuencia. Se utilizará para estudiar el tiempo característico para la evolución de la concentración de quanta y las implicaciones de un estado estacionario aproximado.

La concentración media de quanta en un modelo cero dimensional (tipo caja) es, utilizando una sala como volumen de control:

$$V \frac{d\bar{q}}{dt} + \bar{q}Q = X_q(1 - \eta_{ex}) - V k_c \bar{q} \quad (7)$$

Q/V (h <sup>-1</sup> )	k <sub>c</sub> (h <sup>-1</sup> )	t <sub>char</sub> (min)
20	0.92	2
10	0.92	5.6
5	0.92	11
2	0.92	23
1	0.92	37
0.2	0.92	73

ANEXO 1 Tabla 1. Tiempo característico para concentraciones de quanta para distinta ACH

donde los términos representan, sucesivamente: la tasa de cambio del número de quanta en la habitación, el flujo de quanta que sale de la habitación a través de salidas, la tasa de exhalación de quanta del individuo contagioso y la inactivación de los quanta en la habitación. En esta Ecuación, V es el volumen de la sala, Q es la tasa de flujo volumétrico de la ventilación (se supone que está libre de virus), X<sub>q</sub> es la tasa de exhalación de quanta combinada de todos los individuos infecciosos, η<sub>ex</sub> es la eficiencia de exhalación de las mascarillas que lleva el individuo infectado y k<sub>c</sub> es la tasa de inactivación del virus. Suponemos aquí, de acuerdo con el modelo multidimensional, que la tasa de deposición de aerosoles es cero; de lo contrario, se puede agregar a k<sub>c</sub>.

La solución de la Ecuación anterior es:

$$\bar{q}(t) = \bar{q}_0 e^{-kt} + \frac{X_q(1 - \eta_{ex})}{Vk} (1 - e^{-kt}) \quad (8)$$

Donde  $\bar{q}_0$  es la concentración inicial de quanta en la habitación, y la constante de tiempo k es:

$$k = \frac{Q}{V} + k_c \quad (9)$$

El valor de  $\bar{q}$  en estado estacionario es, de la Ecuación 8:

$$\bar{q}_{st} = \frac{X_q(1 - \eta_{ex})}{Vk} \quad (10)$$

Y el valor de  $\bar{q}$  promedio en el tiempo hasta un tiempo t es:

$$\bar{q}_t = \frac{1}{t} \int_0^t \bar{q}(\tau) d\tau = \frac{1}{kt} \left[ \bar{q}_0(1 - e^{-kt}) - \frac{X_q(1 - \eta_{ex})}{V} \left( t - \frac{1}{k}(1 - e^{-kt}) \right) \right] \quad (11)$$



A partir de la *Ecuación 8*, se puede definir un tiempo característico para la evolución de la concentración de quanta como:

$$t_{char} = \frac{1}{k} \quad (12)$$

Este tiempo característico  $t_{char}$  se estima, en la *Tabla 1*, para un valor típico de  $k_c = 0,92 \text{ h}^{-1}$  (que incluye la tasa de deposición de aerosol) y varios valores para  $Q/V$  (expresados como cambios de aire por hora, ACH).

Para un evento que dura 50 minutos, por ejemplo, el tiempo característico es mucho menor que el duración del evento para tasas de ACH tan bajas como  $5 \text{ h}^{-1}$ , típico de alta ventilación. En estos casos, puede ser justificado utilizar una aproximación de estado estacionario para la concentración de quanta, y luego usar esta estimación para calcular el riesgo de contagio con algún pequeño error. Para tasas de ventilación más bajas, típicas por ejemplo de la infiltración de aire, el tiempo característico es del orden de la duración del evento o mayor, y el supuesto de estado estacionario puede ser demasiado conservador. En estos casos, en un modelo cero dimensional, una alternativa menos conservadora es utilizar la concentración de quanta promediada en el tiempo, *Ecuación 11* para estimar el riesgo de contagio, o bien integrar numéricamente la Ecuación de probabilidad, *Ecuación 2*.

Para un modelo tridimensional, el tiempo característico de quanta en la ubicación donde se encuentra la persona con mayor riesgo (es decir, la persona que se encuentra inmediatamente próxima del infectado), el tiempo característico de quanta en su ubicación viene dado por convección (velocidad local  $v$ ) y difusión (coeficiente  $D_q$ ) del individuo infectado, y la distancia de separación  $\Delta$ :

$$t_{char} = \left[ \frac{v}{\Delta} + \frac{D_q}{\Delta^2} \right]^{-1} \quad (13)$$

Para distancias seguras del orden de  $\Delta \approx 1 \text{ m}$ , e incluso para velocidades locales pequeñas, este tiempo característico es lo suficientemente pequeño en comparación con la duración del evento para que se utilice la concentración de quanta en estado estacionario como una estimación razonable para calcular la probabilidad de contagio para el individuo más expuesto. Para los individuos más alejados, la concentración de quanta en estado estacionario es probablemente demasiado conservadora; sin embargo, se utilizará para estimar el riesgo de contagio, como alternativa, es decir, calculando numéricamente la integral de la *Ecuación 2* en todos los puntos del dominio.

### APARTADO 3 – DEDUCCIÓN DE LA PROBABILIDAD DE CONTAGIO

Para una estimación más simple de la probabilidad de contagio, que no requiere el cálculo de una integral, el valor en el local de  $q(x, t)$  en estado estacionario  $q_{st}(x)$  se puede usar en la *Ecuación 2*; esta estimación más simple es conservadora, es decir, da lugar a riesgos ligeramente mayores. En este caso, la probabilidad se convierte en:

$$R(x, t) = 1 - e^{-(1-\eta_{in})Iq_{est}(\vec{x})t} \quad (14)$$

Esto viene a raíz de la Ecuación de conservación de una especie química en un volumen de control:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_c} \rho y_A dV + \int_{S_c} \rho y_A [(\vec{v} - \vec{v}_c) \cdot \vec{n}] dS = \int_{S_c} \rho D_A \nabla y_A \cdot \vec{n} dS + \int_{V_c} \dot{\omega}_A dV \quad (15)$$

Debido a que q es por unidad de volumen y no de masa:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_c} q dV + \int_{S_c} q [(\vec{v} - \vec{v}_c) \cdot \vec{n}] dS = \int_{S_c} D_q \nabla q dS + \int_{V_c} \dot{\omega}_q dV \quad (16)$$

Donde el primer término (IT) es la variación temporal de quanta en el volumen de control, el segundo (II) la ingestión de quanta (entradas, salidas), el tercer término (ID) se refiere a la entrada y salida de quanta a través de los límites del dominio debido a fenómenos de transporte ("difusión") y que supondremos nulo, y finalmente el último término (IG) se refiere a la generación o destrucción de quanta:

$$\int_{V_c} \dot{\omega}_q dV \rightarrow \dot{\omega}_q = \frac{ER_q(1 - \eta_{ex})I}{\dot{\omega}_q} - k_c q - k_d q \quad (17)$$

Con  $ER_q$  medido en quanta por segundo es la tasa de exhalación de q, que depende del nivel de actividad y de infección del individuo contagioso.  $\eta_{ex}$  es la eficiencia de la mascarilla, en tanto por uno, para atrapar gotas/aerosol en la exhalación. I será el número de individuos contagiosos en el volumen de control de volumen V.  $k_c$  es el inverso del tiempo característico de desactivación del virus, en  $s^{-1}$  y finalmente  $k_d$  es inverso del tiempo de deposición del aerosol en superficies. Para este estudio será nulo.

Realizando el balance, y siendo  $S_e$  la entrada,  $S_s$  la salida y  $S_p$  la pared:

$$IT = V \frac{dq}{dt} \quad (18)$$

$$II_e = -q_e Q = 0 \text{ (suponemos que el aire entra libre de virus)} \quad (19)$$

$$II_s = q_s \int_{S_s} \vec{v} \cdot \vec{n} dS = q_s Q = qQ \quad (20)$$

$$II_p = 0 \quad (21)$$

$$IG = V \dot{\omega}_q = ER_q(1 - \eta_{ex})I - V k_c q \quad (22)$$

Cuya Ecuación diferencial será:

$$V \frac{dq}{dt} + qQ = ER_q(1 - \eta_{ex})I - V k_c q \quad (23)$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{ER_q(1 - \eta_{ex})I}{V} - \left( \frac{Q}{V} + k_c \right) q = S - kq \quad (24)$$

Por lo que:

$$q = q_0 e^{-kt} + \frac{S}{k} (1 - e^{-kt}) \quad (25) \quad \text{con } q_0 = q(t = 0)$$

En estacionario ( $t \rightarrow \infty$ ):

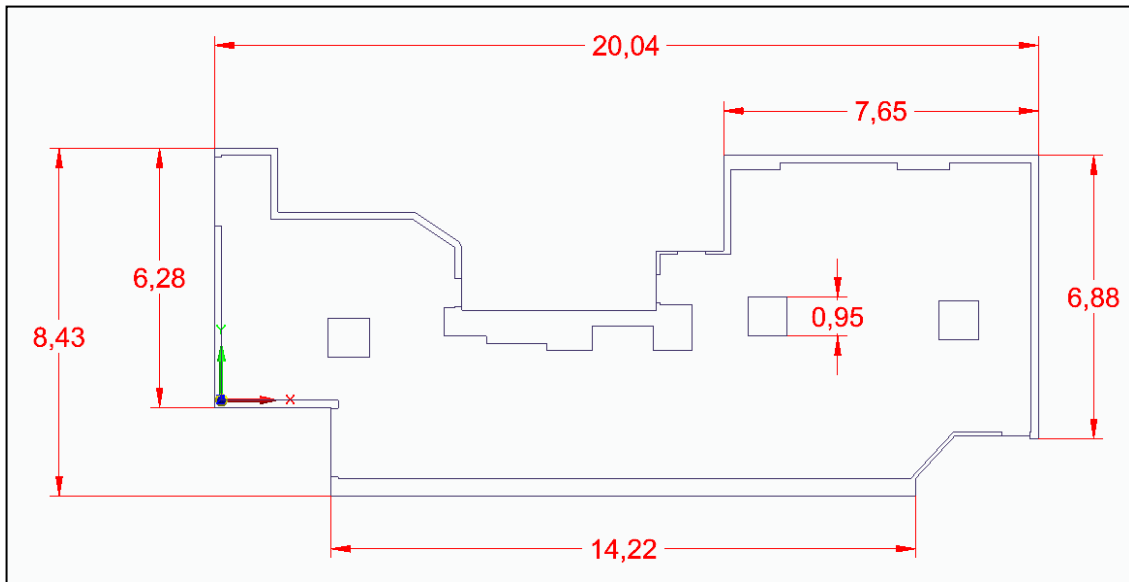
$$q_{est} = \frac{S}{k} = \frac{ER_q(1-\eta_{ex})I}{\frac{Q}{V} + k_c} \quad (26)$$

Por lo que se llega a:

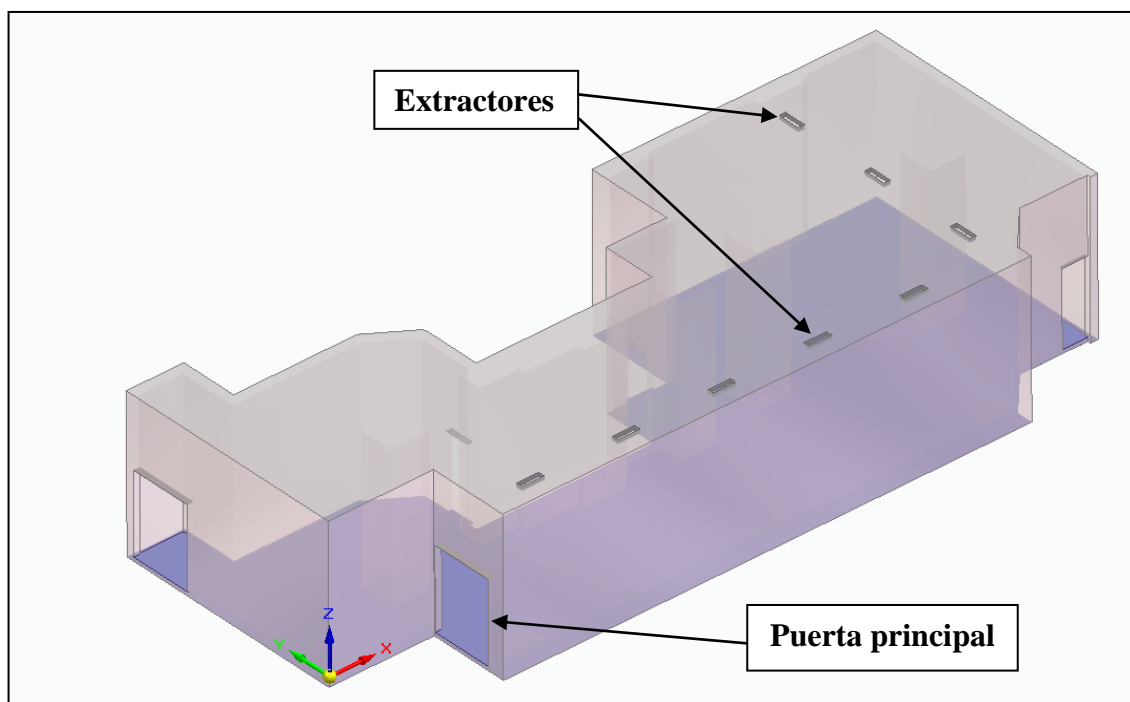
$$R(x, t) = 1 - e^{-(1-\eta_{in})I \int_0^t q(\tau) d\tau} = 1 - e^{-(1-\eta_{in})I q_{est}(\vec{x})t} \quad (27)$$

## ANEXO 2

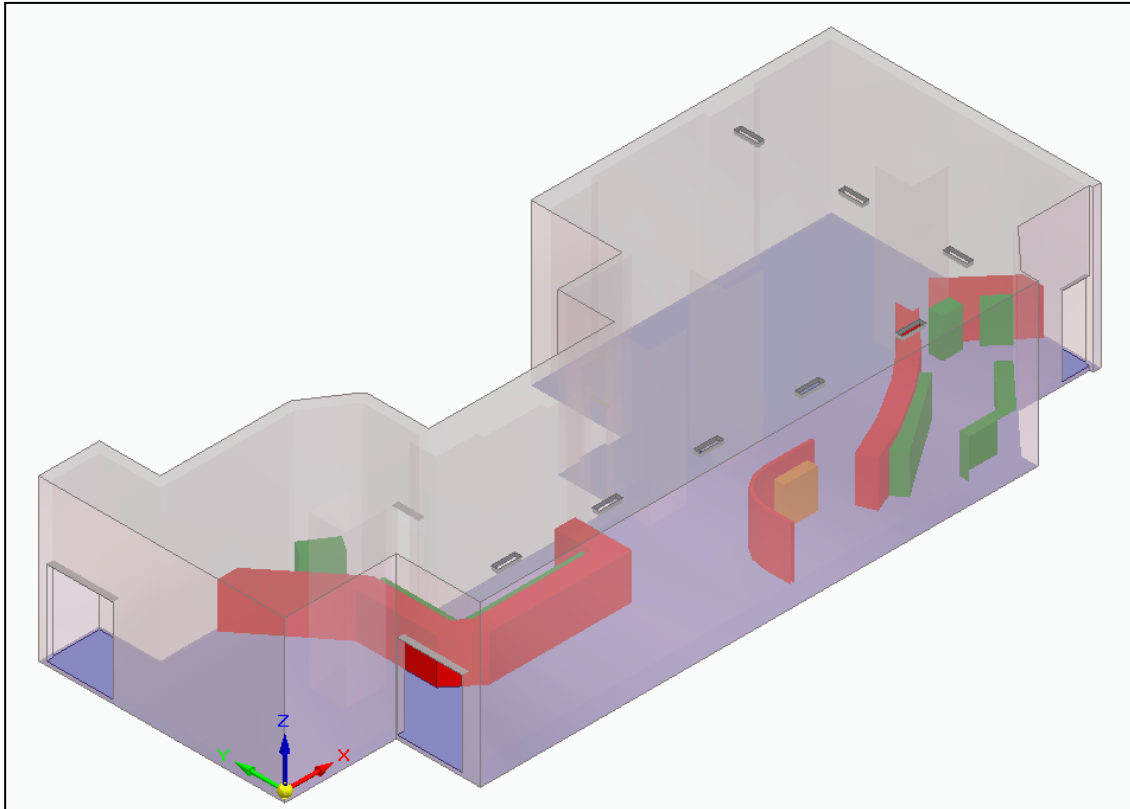
El presente ANEXO 2 hace referencia al proceso de creación de la geometría para la elaboración de este proyecto. Hace referencia al apartado 3.2 Modelo Geométrico incluyendo sus tres sub-apartados, 3.2.1 Modelado de la sala, 3.2.2 Modelado de las personas y 3.2.3 Obtención del volumen fluido.



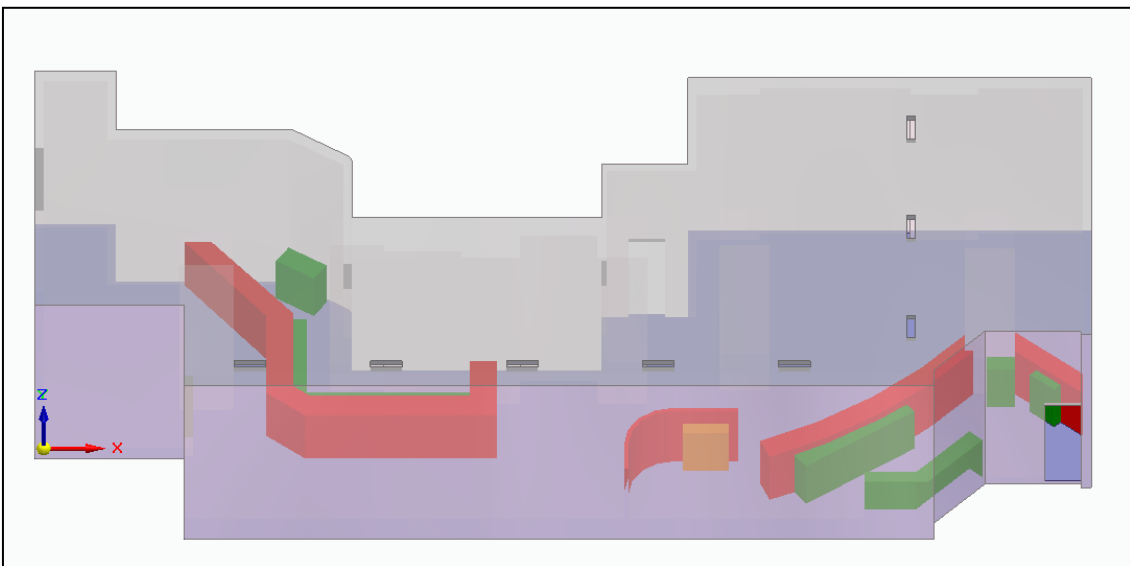
ANEXO 2 Imagen 1. Boceto de la planta en el plano XY. Fuente: elaboración propia



ANEXO 2 Imagen 2. Vista isométrica de la Sala Choclat sin elementos en su interior. Fuente: elaboración propia

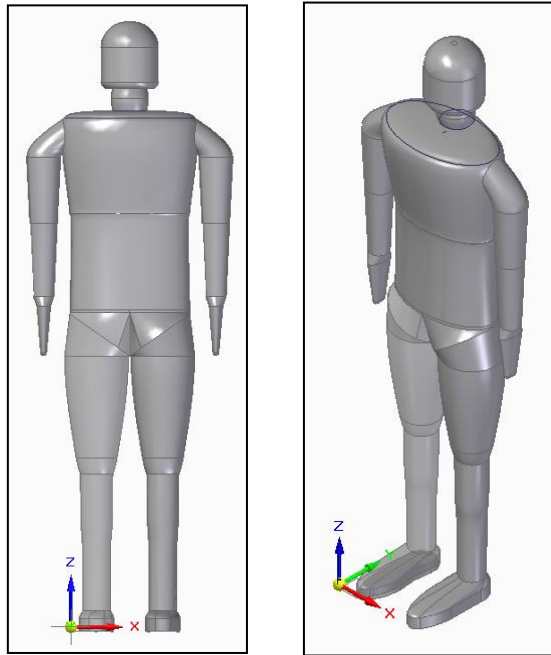


**ANEXO 2 Imagen 3. Vista isométrica de la Sala Chocolat con elementos en su interior. Fuente: elaboración propia**

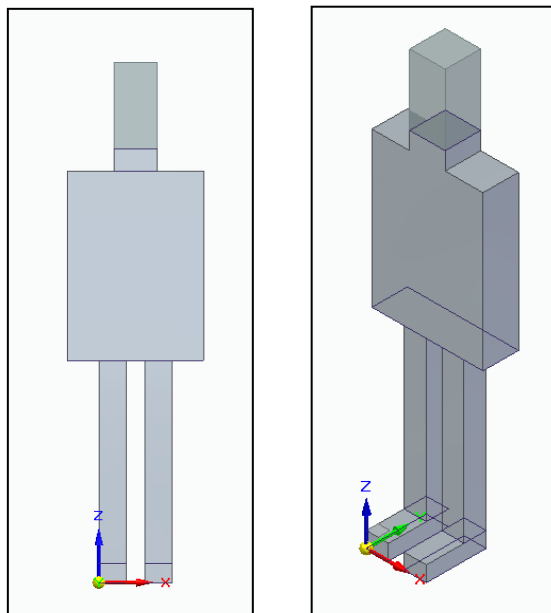


**ANEXO 2 Imagen 4. Sala Chocolat sin elementos en su interior. Fuente: elaboración propia**

A continuación se pueden observar la diferencia entre el diseño más complejo de los individuos del interior del local, que fue el primer diseño elaborado, y el diseño más simple. Dado que había que buscar la combinación entre un diseño que se ajustara a un cuerpo real y un diseño que no diera problemas para ajustar la malla (con las menores curvas posibles), finalmente se decidió por utilizar el diseño de los cuerpo que se puede apreciar en la *imagen 3* de este proyecto.



**ANEXO 2 Imagen 5. Primera diseño de los cuerpos. Fuente: elaboración propia**

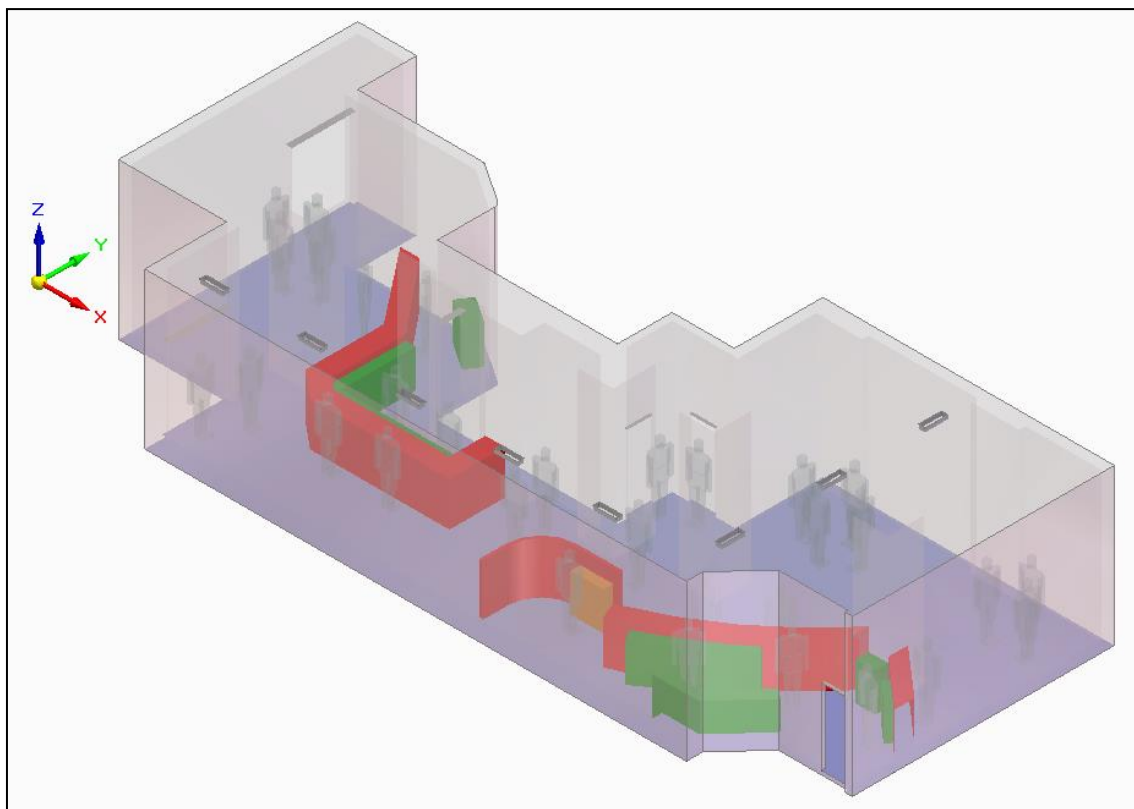


**ANEXO 2 Imagen 6. Diseño muy simplificado de los cuerpos. Fuente: elaboración propia**

Una vez decidido el diseño de los cuerpos de los individuos del interior, se procede a colocarlos siguiendo una distribución aleatoria, procurando que sean distribuidos por toda la sala y manteniendo las normas de seguridad sanitaria, es decir, grupos reducidos de no más de cuatro personas. Así pues, se puede visualizar a continuación la distribución de los individuos del interior del local.

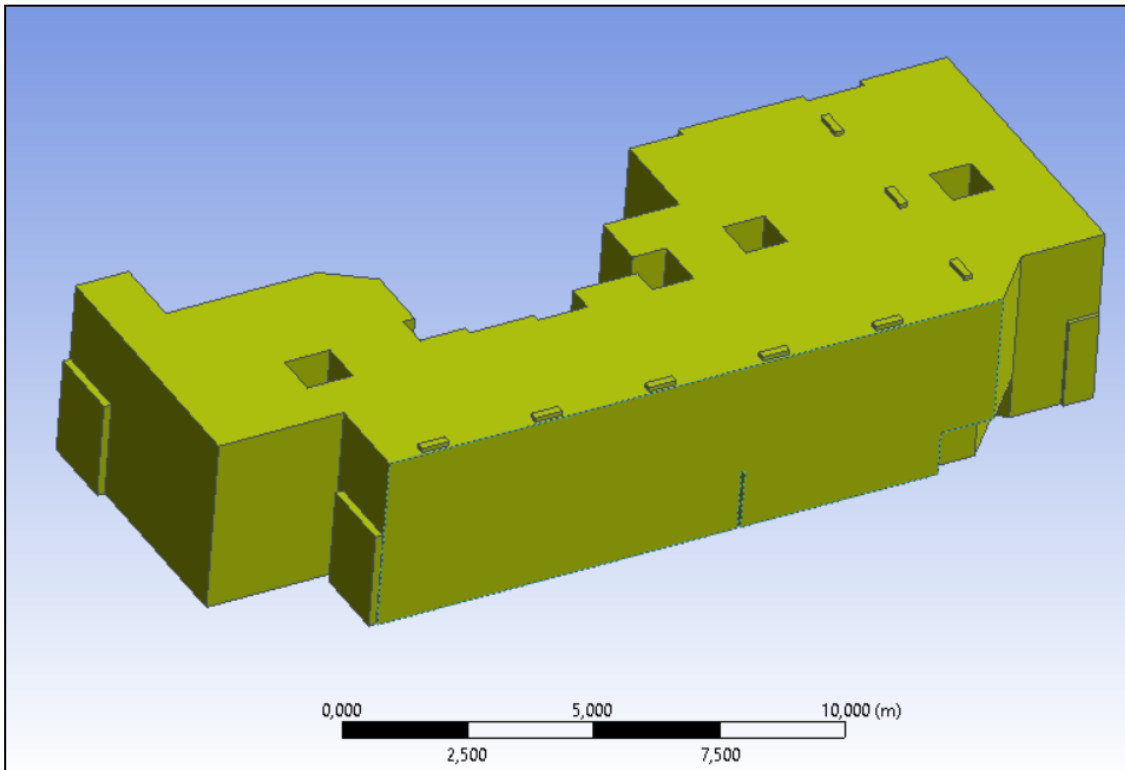


**ANEXO 2 Imagen 7. Vista de planta de la distribución de los individuos del interior de la sala.  
Fuente: elaboración propia**

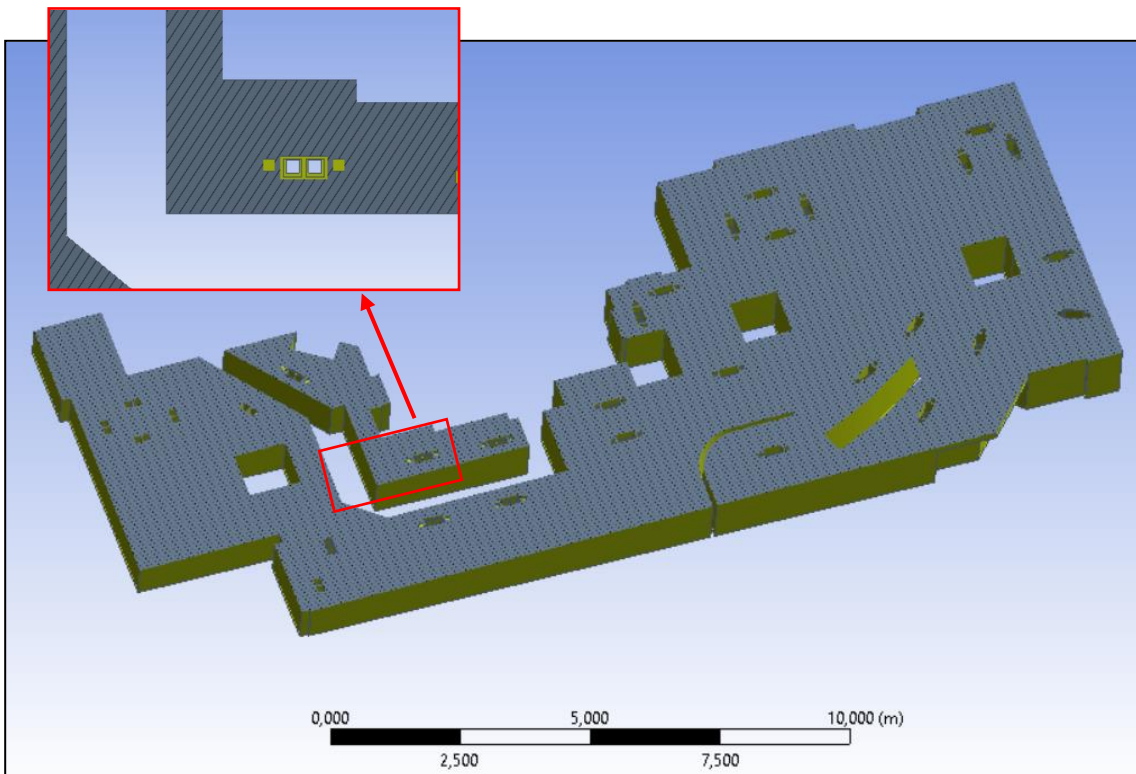


**ANEXO 2 Imagen 8. Vista isométrica de la Sala Chocolate con individuos y elementos en su interior. Fuente: elaboración propia**

Una vez disponemos de la sala, su mobiliario correspondiente y con los individuos participantes en este estudio distribuidos por el interior, se procede a la obtención del objeto de estudio de este proyecto, es decir, el volumen fluido. En la *imagen 10* de este ANEXO 2 se puede comprobar como los elementos del mobiliario o los cuerpos no son fluido y por lo tanto existen huecos en el interior del volumen fluido. Una vez obtenido el volumen fluido se procederá a nombrar sus caras más relevantes. Dichas caras son relevantes para este proyecto porque será donde sean fijadas las condiciones de contorno y son: la puerta principal, los extractores, los cuerpos humanos y las caras (ver en el presente ANEXO *imágenes 11 a 13*).

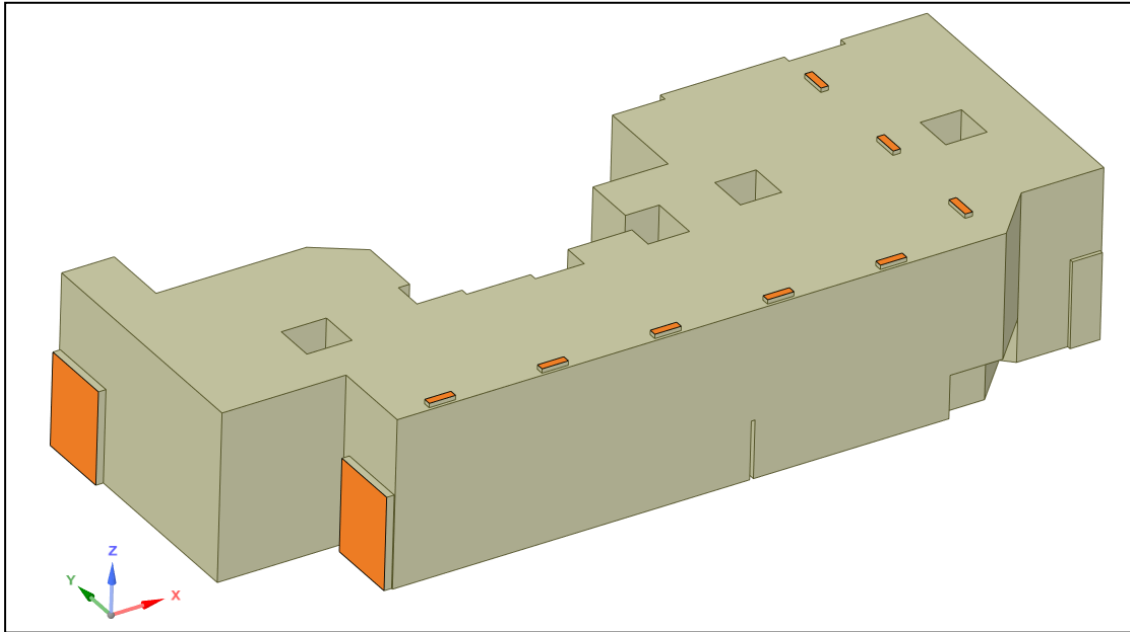


**ANEXO 2 Imagen 9. Vista isométrica de volumen fluido que será el objeto de estudio de este trabajo. Fuente: elaboración propia**

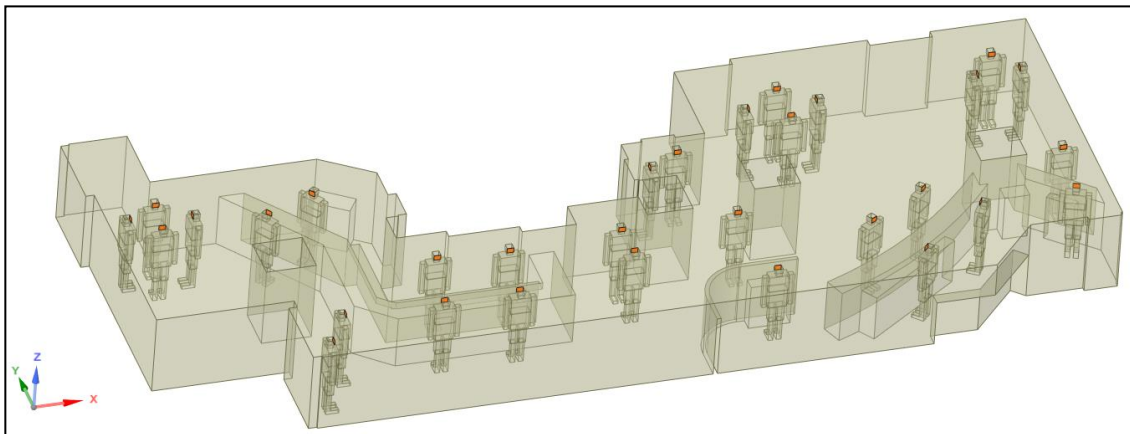


**ANEXO 2 Imagen 10. Vista isométrica de un corte realizado al volumen fluido para apreciar los huecos de los individuos y elementos del interior de la sala. Fuente: elaboración propia**

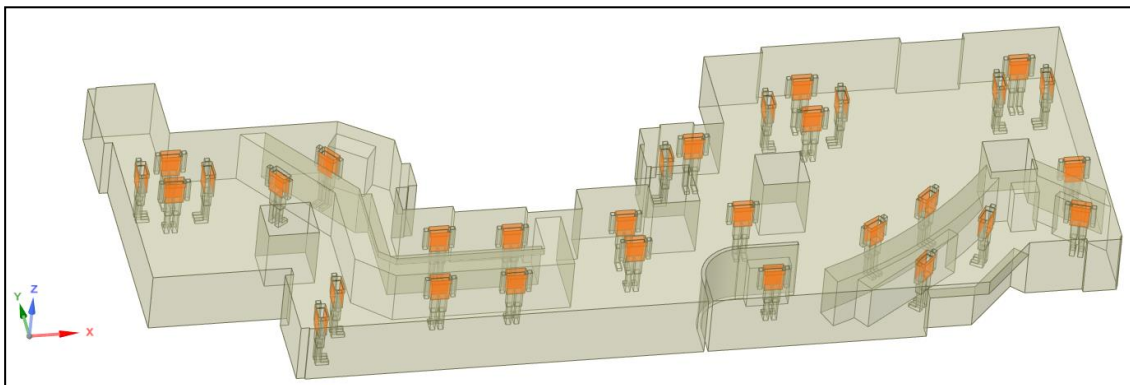




**ANEXO 2 Imagen 11. Vista isométrica de volumen fluido con puertas principal, secundaria y extractores nombrados. Fuente: elaboración propia**



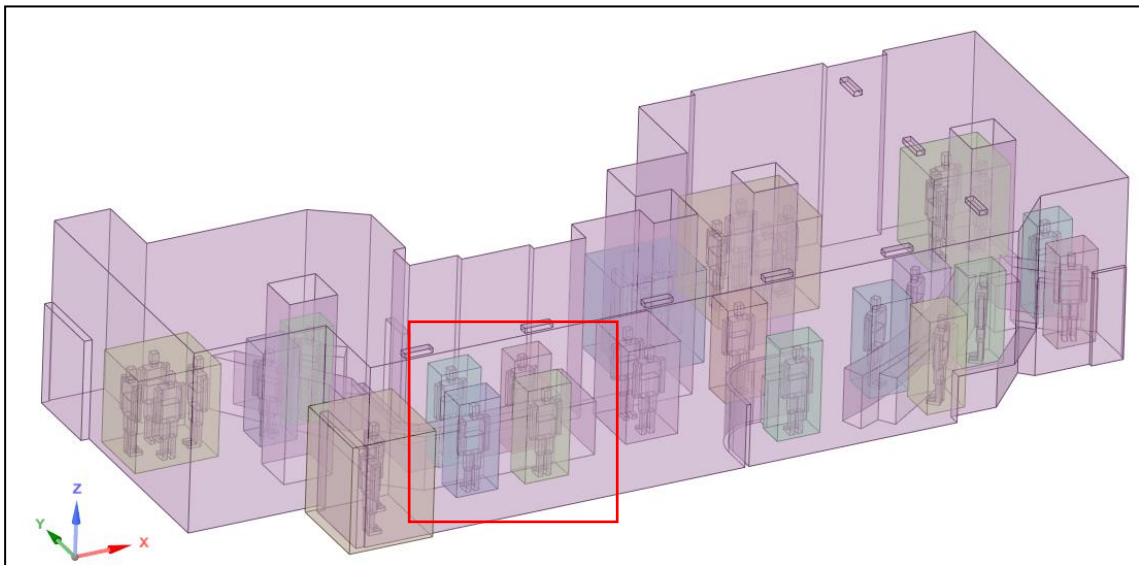
**ANEXO 2 Imagen 12. Vista isométrica de volumen fluido cortado por un plano para facilitar el acceso a las caras para poder nombrarlas. Fuente: elaboración propia**



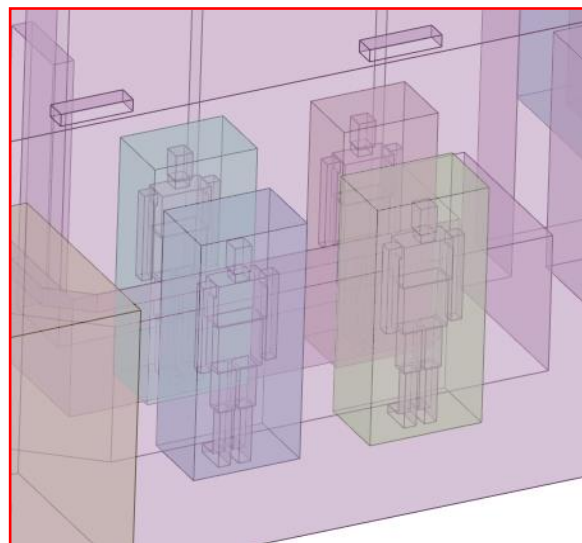
**ANEXO 2 Imagen 13. Vista isométrica de volumen fluido cortado por un plano para facilitar el acceso a los cuerpos para poder nombrarlas. Fuente: elaboración propia**

## ANEXO 3

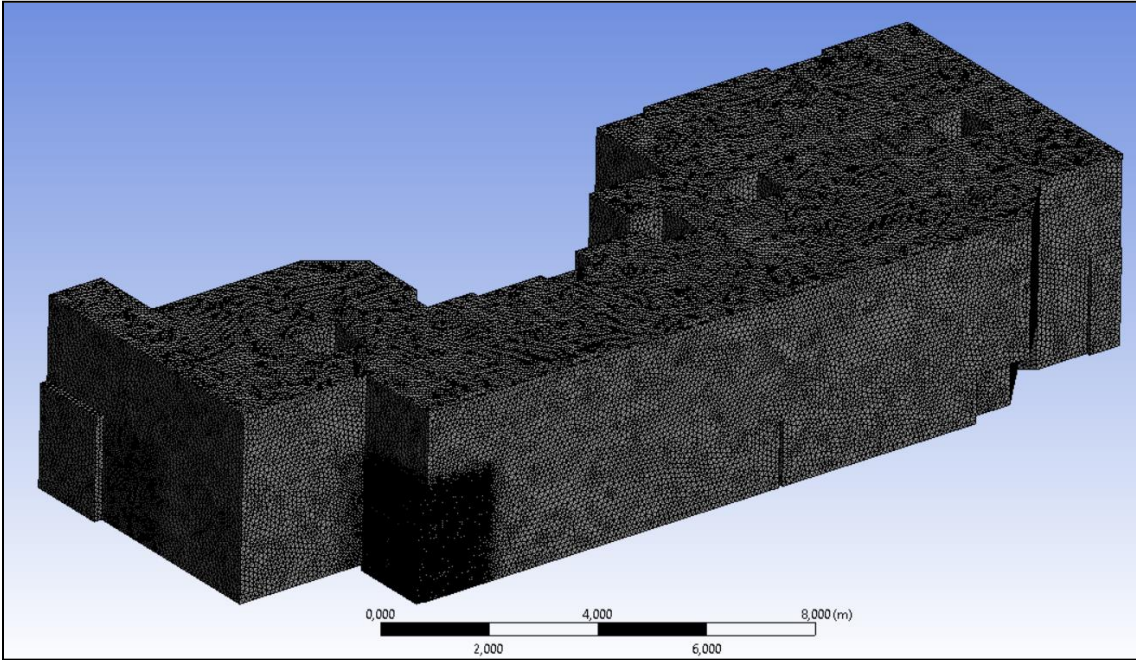
El presente ANEXO 3 hace referencia al proceso de mallado de la geometría para la elaboración de este proyecto, es decir, al apartado 3.3 Mallado del volumen fluido. Las *imágenes 1 y 2* de este ANEXO ilustran el proceso por el que se ha conseguido ajustar con una malla más fina la zona de los cuerpos. Para ello se han diseñado unos cubos que cubren todo el cuerpo del individuo y actúan como cuerpos de influencia, donde el mallado será más fino, más exacto. En las *imágenes 3 a 5* de este ANEXO se aprecia la malla desde el exterior y, mediante un corte, desde el interior, donde se puede observar de mejor forma esta malla más fina en la zona de los cuerpos.



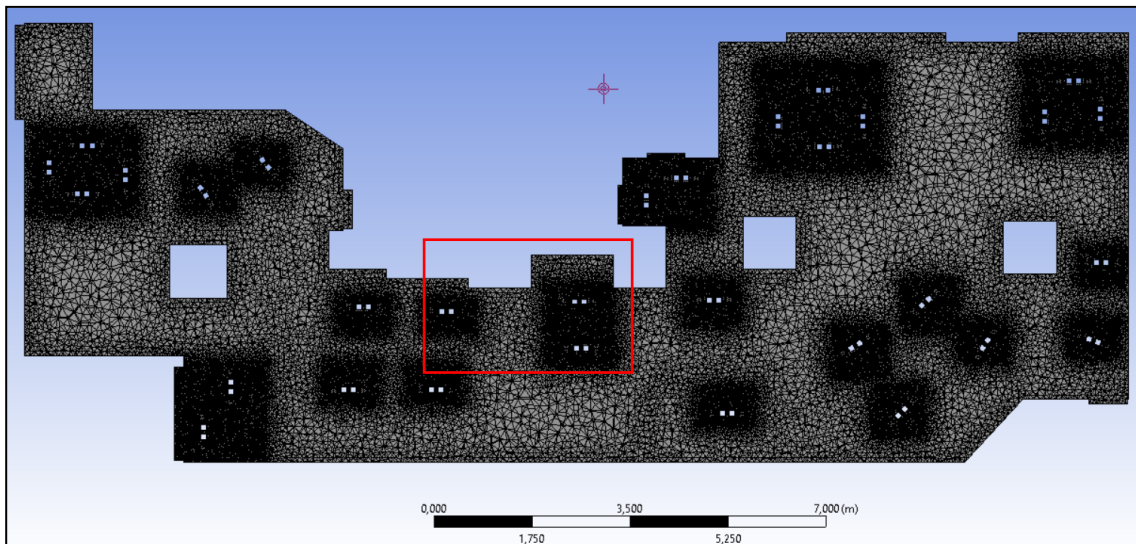
**ANEXO 3 Imagen 1. Vista isométrica de volumen fluido con los cuerpos de influencia para la mejora del mallado. Fuente: elaboración propia**



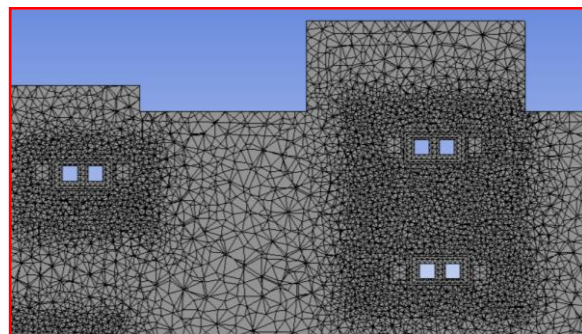
**ANEXO 3 Imagen 2. Detalle para mejor visualizado de los cuerpos de influencia. Fuente: elaboración propia**



**ANEXO 3 Imagen 3. Vista isométrica de volumen fluido mallado mediante malla final. Fuente: elaboración propia**



**ANEXO 3 Imagen 4. Vista de planta de volumen fluido mallado cortado por un plano paralelo al suelo del local. Fuente: elaboración propia**



**ANEXO 3 Imagen 5. Detalle para mejor visualizado de la diferencia de malla con cuerpos de influencia. Fuente: elaboración propia**

## ANEXO 4

---

El presente ANEXO 4 hace referencia al proceso de obtención de condiciones de contorno (Boundary Conditions) para la realización de los cálculos de este proyecto. Trata del apartado 3.4 Condiciones de contorno y en él se va a demostrar la obtención de algunas de estas y su conversión a las unidades requeridas para trabajar en CFD.

### APARTADO 1 – CAMBIO DE UNIDADES DE LOS CAUDALES DE LOS EXTRACTORES

Dado que el caudal de los extractores proporcionado por LIFTEC viene dado en unidades de  $m^3/h$ , siendo  $909 m^3/h$  para el caso con la puerta cerrada y  $2005 m^3/h$  para el caso con puerta abierta, en este apartado se van a deducir dichos caudales en las unidades utilizadas en CFD. Además, se va a obtener la tasa de renovaciones de aire de la sala, también para ambos casos, utilizando el caudal mencionado anteriormente y el volumen de la sala. Con los resultados de este apartado se ha procedido a elaborar la Tabla 1 de este proyecto.

$$Q_{ANSYS} \left[ \frac{kg}{s} \right] = \frac{Q_{MEDIDO} \cdot \rho_{AIRE}}{3600} \quad (33)$$

$$Q_{Extractores Puerta Cerrada} \left[ \frac{kg}{s} \right] = \frac{909 \cdot 1.183}{3600} = 0.298 \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (34)$$

$$Q_{Extractores Puerta Abierta} \left[ \frac{kg}{s} \right] = \frac{2005 \cdot 1.183}{3600} = 0.66 \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (35)$$

$$Q_{Extractores Puerta Cerrada CFD} \left[ \frac{kg}{s} \right] = \frac{0.298}{2} = 0.1494 \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (36)$$

$$Q_{Extractores Puerta Abierta CFD} \left[ \frac{kg}{s} \right] = \frac{0.66}{2} = 0.33 \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (37)$$

$$V_{SALA} [m^3] = Area_{Sala} \cdot Altura_{Sala} = 129 \cdot 4 = 516 [m^3] \quad (38)$$

$$Tasa\ de\ renovación \left[ \frac{1}{h} \right] = \frac{Q_{AIRE}}{V_{Sala}} \quad (39)$$

$$Tasa\ de\ renovación_{Puerta\ Cerrada} \left[ \frac{1}{h} \right] = \frac{909}{516} = 1.761 \left[ \frac{1}{h} \right] \quad (40)$$

$$Tasa\ de\ renovación_{Puerta\ Abierta} \left[ \frac{1}{h} \right] = \frac{2005}{516} = 3.885 \left[ \frac{1}{h} \right] \quad (41)$$

## APARTADO 2 – CAMBIO DE UNIDADES DE LA CONCENTRACIÓN DE CO<sub>2</sub>

Este apartado 2 tratará de la obtención de la concentración de CO<sub>2</sub> en las unidades con las que se trabajará en CFD. Se comienza con la obtención de la concentración de CO<sub>2</sub> en la puerta principal. Para ello se procede a:

-El CO<sub>2</sub> tiene una masa molar de 44 gramos por mol.

-El aire tiene una masa molar de 28 gramos por mol.

La relación entre las masas molares es:

$$R = \frac{44 \left[ \frac{g}{mol} \right]}{28 \left[ \frac{g}{mol} \right]} = 1.5714 \quad (42)$$

La concentración de CO<sub>2</sub> viene dada con respecto a la total del aire de la sala. Las unidades son ppm (partes por millón) relaciona la cantidad de partículas de CO<sub>2</sub> en un millón de partículas de aire. Según el estudio elaborado por LIFTEC, en la puerta principal que da al exterior, estas son 600 ppm. Lugo la fracción volumétrica será:

$$Fracción Vol_{CO_2} = \frac{600}{1000000} = 0.0006 \left[ \frac{mol CO_2}{mol aire} \right] \quad (43)$$

Por lo tanto, la fracción másica de CO<sub>2</sub>, la cual se inserta como condición de contorno en la puerta principal y en los extractores es:

$$Fracción M_{CO_2} = R \cdot Fracción Vol_{CO_2} = 1.5714 \cdot 0.0006 = 0.000943 \left[ \frac{kg_{CO_2}}{kg_{aire}} \right] \quad (44)$$

A continuación, se procede al cálculo de la concentración de CO<sub>2</sub> que emiten las personas al respirar. Se parte de que ANSYS Fluent nos devuelve un área de caras total de 0.0308 m<sup>2</sup>. El caudal de inhalación (idéntico para inhalación y exhalación) para una sola persona es de 0.52 m<sup>3</sup>/h de aire. Por lo tanto, dado que se dispone en los informes LIFTEC de 38 personas en el interior:

$$0.52 \left[ \frac{m^3}{h} \right] \cdot 38 \text{ personas} \cdot \frac{1 \text{ hora}}{3600 \text{ seg}} = 0.00549 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \text{ de aire en total} \quad (45)$$

Dado que se ha obtenido mediante un balance para ajustar las ppm de CO<sub>2</sub> con los datos aportados por LIFTET, el porcentaje (volumétrico o molar) de CO<sub>2</sub> en el aire es del 4.61%:

$$0.00549 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \cdot \frac{4.61}{100} = 0.000253 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \text{ de } CO_2 \text{ en total} \quad (46)$$

Debido a que su densidad es de  $1.8 \text{ kg/m}^3$  el gasto total másico quedará:

$$0.000253 \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \cdot 1.8 = 0.000455 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \text{ de } \text{CO}_2 \text{ 38 personas} \quad (47)$$

Ahora, como se ha colocado en el interior de esta sala 31 personas en vez de 38, cuyas caras son de  $0.0308 \text{ m}^2$ :

$$\frac{0.000455 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]}{31 \text{ personas} \cdot 0.0308 \text{ m}^2} = 0.000477 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \right] \quad (48)$$

Por lo tanto, se impondrá como condición de contorno en todas las caras una generación de  $\text{CO}_2$  de  $0.000477 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2$ .

### APARTADO 3 – CAMBIO DE UNIDADES DEL QUANTA GENERADO POR EL INDIVIDUO CONTAGIOSO

En este presente apartado se va a desarrollar el cambio de unidades de la tasa de emisión de quanta del individuo contagioso para poder trabajar con ello en CFD. Dicha tasa de emisión de quanta de un individuo, según el estudio (Jimenez & Peng, 2021), es de 21 quanta/h.

Para la realización de este trabajo se ha considerado que los individuos del interior del local no llevan mascarilla. La eficiencia de la mascarilla entonces será  $\eta = 0$ .

$$\text{Quanta} \left[ \frac{\text{quanta}}{\text{s}} \right] = \frac{\text{quanta} \cdot (1 - \eta)}{3600} = \frac{21 \cdot (1 - 0)}{3600} = 0.00583 \left[ \frac{\text{quanta}}{\text{s}} \right] \quad (49)$$

Debido a que el área de una cara es de  $0.0308 \text{ m}^2$ :

$$\text{Quanta} \left[ \frac{\text{quanta}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \right] = \frac{0.00583 \left[ \frac{\text{quanta}}{\text{s}} \right]}{0.0308 \text{ m}^2} = 0.1894 \left[ \frac{\text{quanta}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \right] \quad (50)$$

## ANEXO 5

---

El presente ANEXO 5 hace referencia al apartado 3.5 Método de resolución CFD incluyendo sus subapartados 3.5.1 Resolución del modelo estacionario y 3.5.2 Resolución del modelo transitorio. En él se muestran los resultados obtenidos mediante CFD para este proyecto.

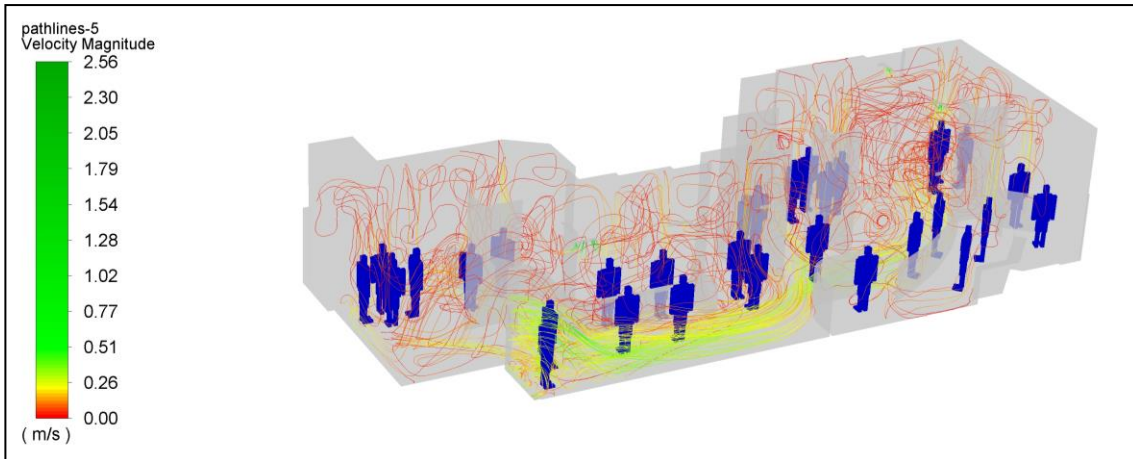
### APARTADO 1 – SOLUCIÓN MODELO ESTACIONARIO PUERTA CERRADA

En este apartado se pueden visualizar imágenes de distintos resultados obtenidos mediante la resolución del modelo estacionario para la puerta cerrada. Los resultados obtenidos se refieren al flujo, turbulencia y energía.

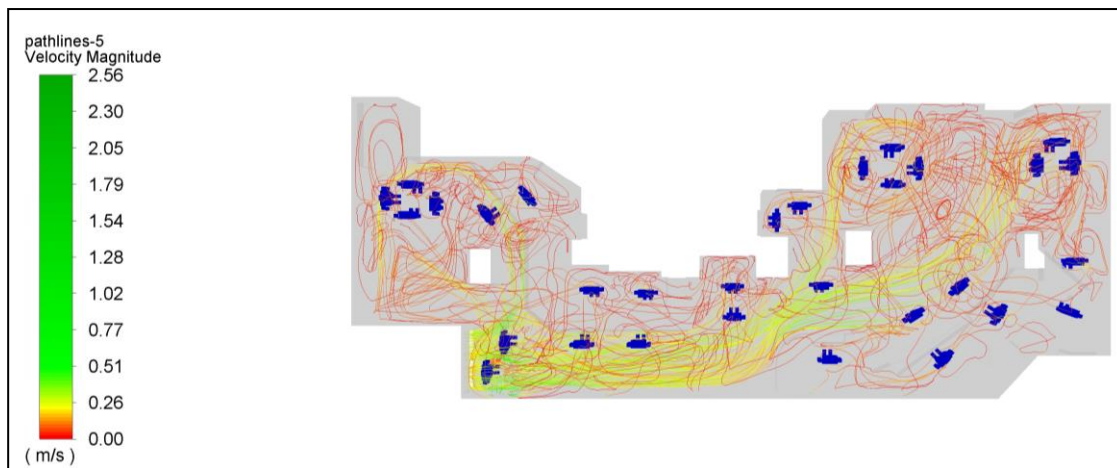
En cuanto al flujo, como se puede apreciar a continuación en las *imágenes 1 y 2* de este ANEXO que representan las líneas de flujo, se ha optado por una representación en modo “semáforo” donde las velocidades más bajas están en color rojo y las más altas en color verde. El color amarillo representará una velocidad umbral, en este caso 0.2 m/s y siempre se colocará en dicha velocidad para poder comparar mejor los diferentes casos.

Se puede ver que, en la mayor parte de la sala, especialmente la zona entrada y la zona fondo, el flujo tiene una velocidad baja. Sin embargo, en la zona centro de la sala, donde coincide el flujo de la puerta principal y el de cuatro de los extractores, la velocidad del fluido es alta, lo que significa que la zona centro de la sala es la que dispone de mejor ventilación y por lo tanto la tasa de renovaciones de aire será mayor en dicha zona. La velocidad máxima de flujo se aprecia en los extractores situados más próximos a la puerta y es de 2.56 m/s.

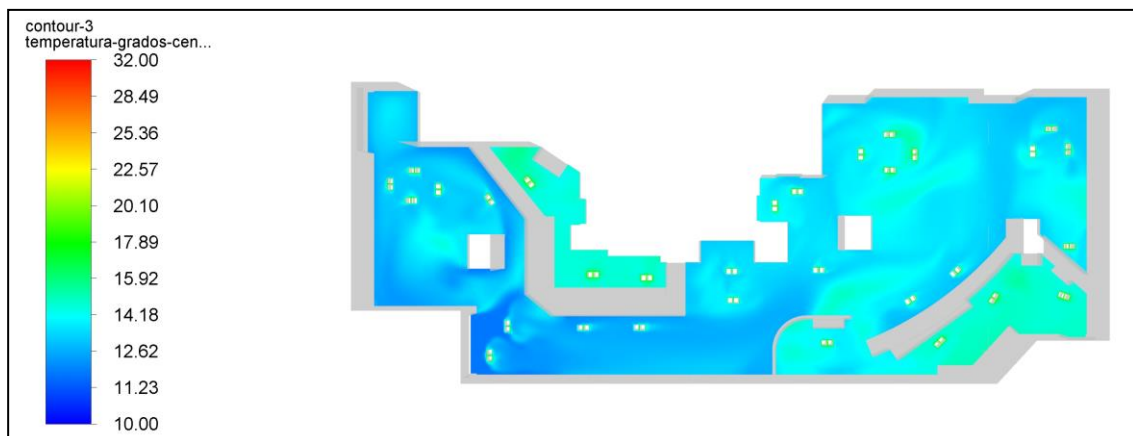
Considerando que el estudio elaborado por LIFTEC es realizado a finales de diciembre, donde la temperatura del exterior es relativamente baja (se ha considerado de 12°C) las simulaciones CFD dan como resultado, en estado estacionario, una temperatura media en el suelo de alrededor de 14°C y en la zona del techo de 17°C.



**ANEXO 5 Imagen 1. Vista isométrica de las líneas de flujo donde en rojo se encuentran las menores velocidades y en verde las mayores. Fuente: elaboración propia**

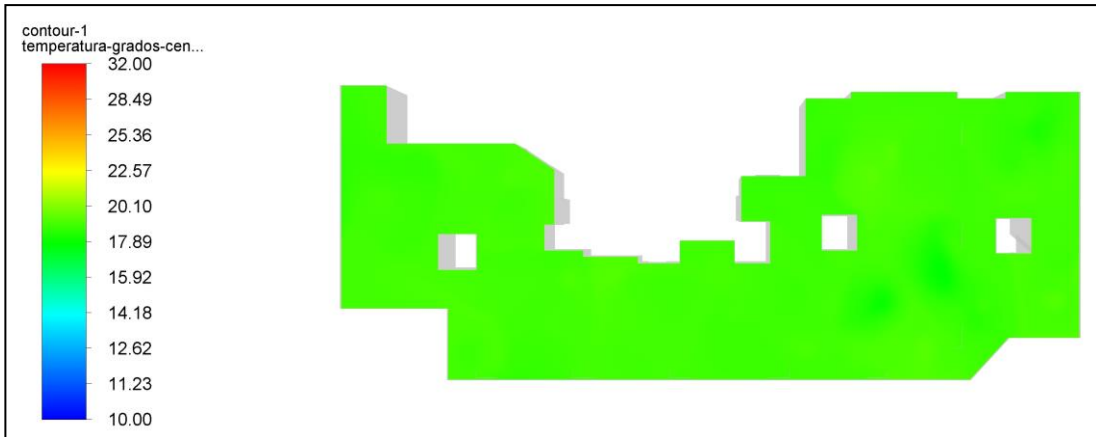


**ANEXO 5 Imagen 2. Vista en planta de las líneas de flujo donde en rojo se encuentran las menores velocidades y en verde las mayores. Fuente: elaboración propia**



**ANEXO 5 Imagen 3. Distribución de temperatura a la altura del suelo de la sala. Temperatura media de 14 °C. Fuente: elaboración propia**





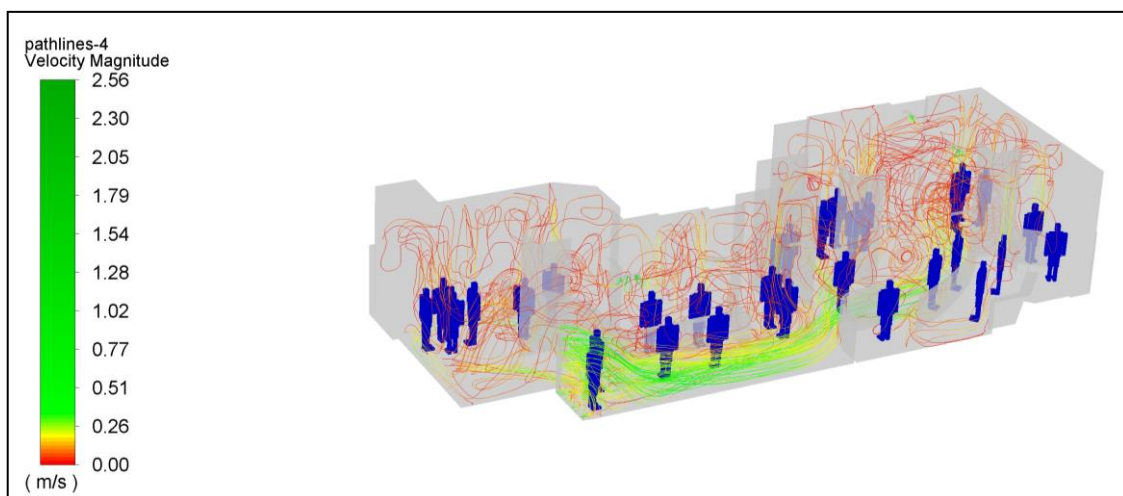
**ANEXO 5 Imagen 4. Distribución de temperatura a la altura del techo de la sala. Temperatura media de 17 °C. Fuente: elaboración propia**

## APARTADO 2 – RESOLUCIÓN MODELO ESTACIONARIO PUERTA ABIERTA

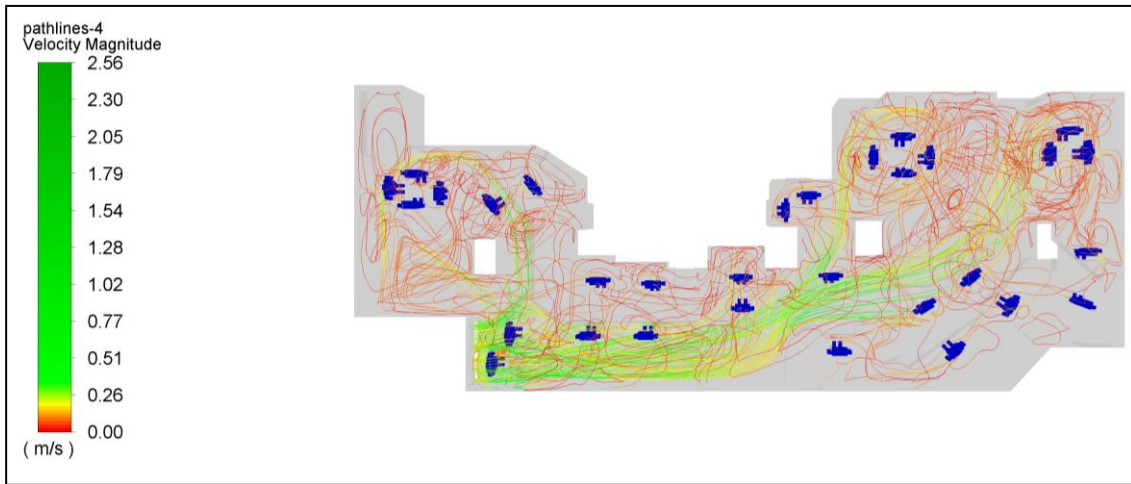
En este apartado se pueden visualizar imágenes de distintos resultados de flujo, turbulencia y energía obtenidos mediante la resolución del modelo estacionario para la puerta abierta.

La distribución de velocidades de flujo para este caso se asemeja al caso con puerta cerrada. Sin embargo, se puede observar que hay una mayor tonalidad verde en la zona centro de la sala y una mayor tonalidad amarilla en las zonas entrada y fondo de la sala, con respecto al caso con la puerta cerrada. Esto es debido a que al abrir la puerta el caudal de aire es superior con respecto al caso anterior y por lo tanto la velocidad media del flujo es superior. Aunque la velocidad media sea mayor, la velocidad máxima de flujo se sigue apreciando en los extractores situados más próximos a la puerta y sigue siendo de 2.56 m/s.

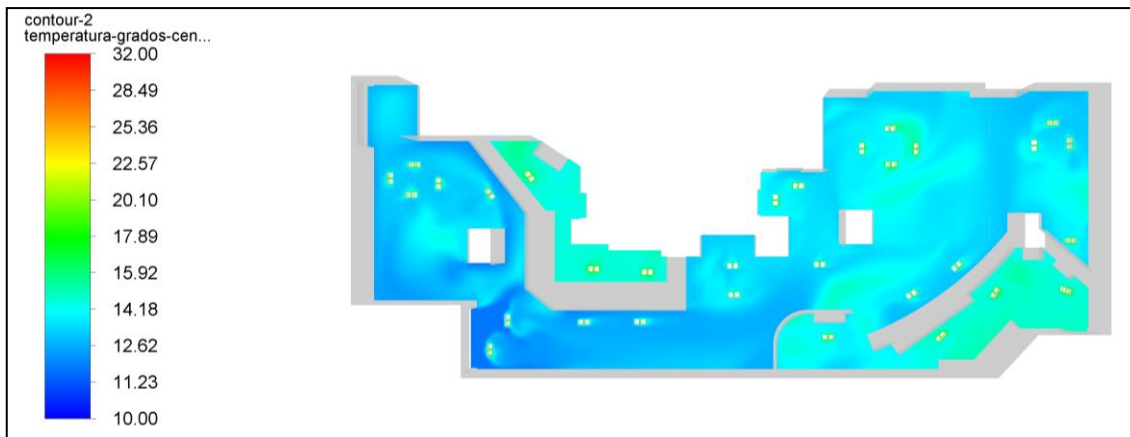
En cuanto a la temperatura de la sala, las simulaciones CFD dan como resultado, en estado estacionario, una temperatura media en el suelo de alrededor de 14°C y en la zona del techo de 17°C.



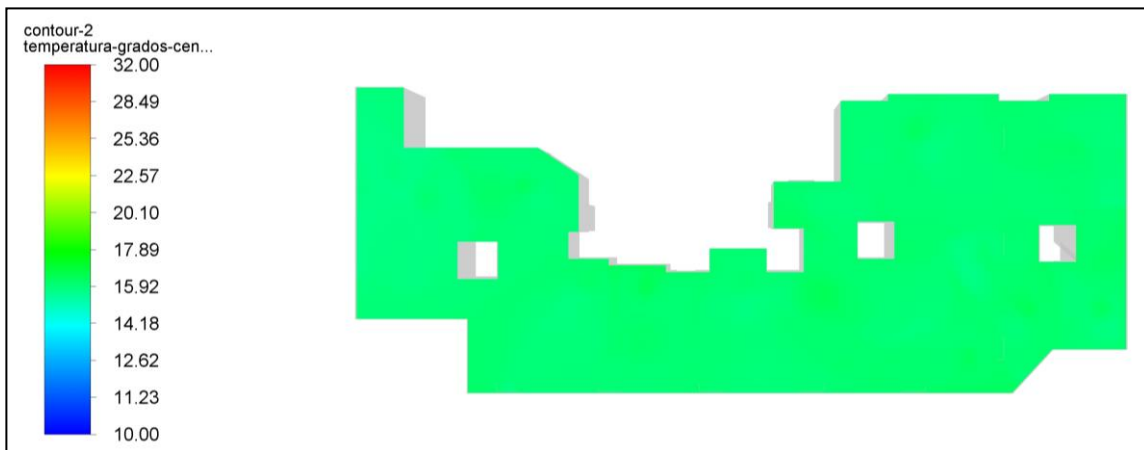
**ANEXO 5 Imagen 5. Vista isométrica de las líneas de flujo donde en rojo se encuentran las menores velocidades y en verde las mayores. Fuente: elaboración propia**



**ANEXO 5 Imagen 6. Vista en planta de las líneas de flujo donde en rojo se encuentran las menores velocidades y en verde las mayores. Fuente: elaboración propia**



**ANEXO 5 Imagen 7. Distribución de temperatura a la altura del suelo de la sala. Temperatura media de 13 °C. Fuente: elaboración propia**



**ANEXO 5 Imagen 8. Distribución de temperatura a la altura del techo de la sala. Temperatura media de 15 °C. Fuente: elaboración propia**

### APARTADO 3 – CALIDAD DEL AIRE Y PROBABILIDAD DE CONTAGIO ESTADO ESTACIONARIO

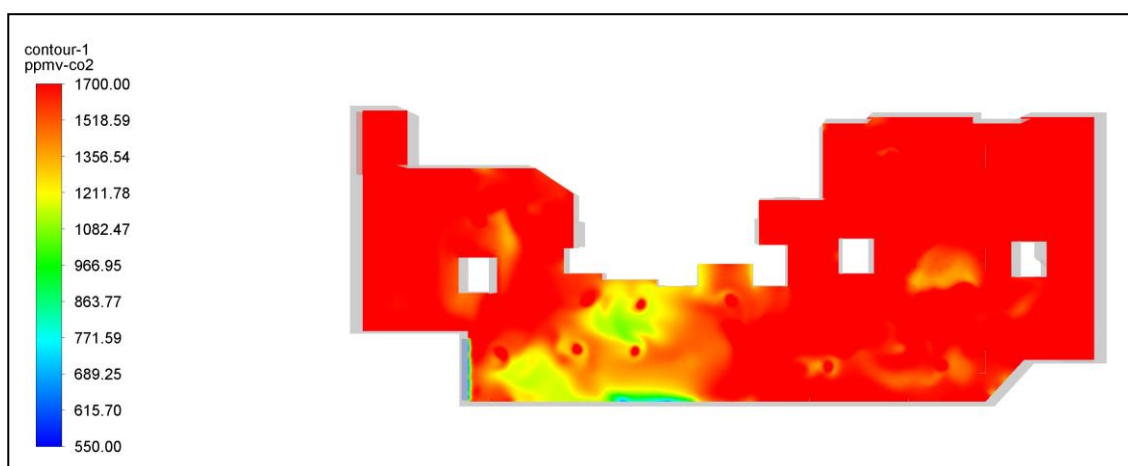
En este apartado se pueden visualizar imágenes de distintos resultados obtenidos mediante la resolución del modelo estacionario para la puerta cerrada y abierta. Los resultados se refieren a la calidad del aire de la sala y a la probabilidad de contagio para distintos tiempos de exposición.

Respecto al estudio de la calidad del aire del local, se puede comprobar que, en estado estacionario, la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire de la sala es muy alta para el caso de puerta cerrada, superando las 1600 ppm en la mayor parte de la sala, *imagen 9*. Sin embargo, el simple hecho de abrir la puerta mejora de tal forma la tasa de renovación de aire de la sala que, exceptuando la parte superior de la entrada de la sala, zona con peor ventilación, la concentración de CO<sub>2</sub> media es de aproximadamente 1000 ppm, *imagen 10*. Es decir, la apertura de la puerta reduce una media de 600 ppm de CO<sub>2</sub> y por lo tanto aumenta la calidad del aire del local.

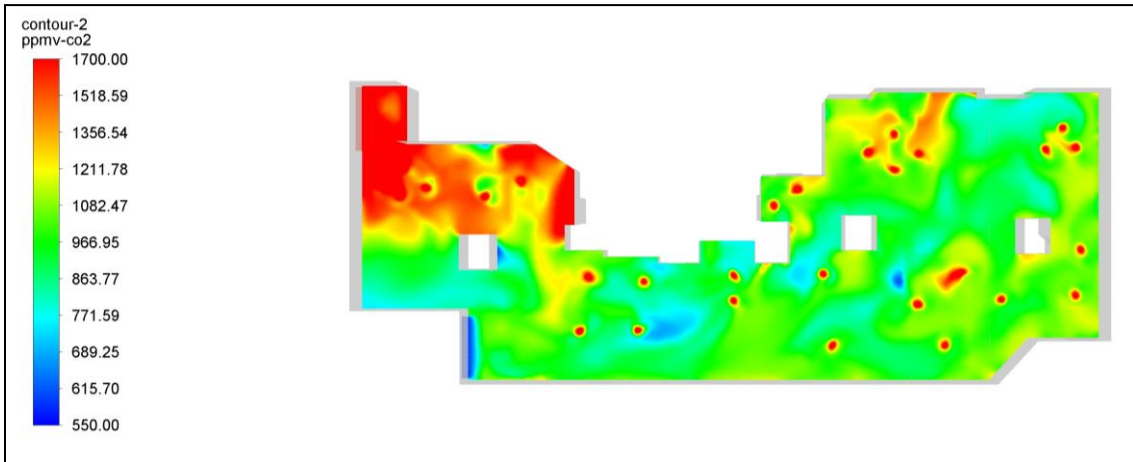
En cuanto a la probabilidad de contagio, se ha escogido de nuevo una representación de esta en modo “semáforo” donde el color verde representa una probabilidad de contagio baja y el color rojo una probabilidad de contagio alta. El valor umbral, en amarillo, se ha colocado en una probabilidad del 2%.

Debido a que la probabilidad de contagio depende del tiempo, para una mejor visualización de esta, se va a comparar la probabilidad para los casos de puerta cerrada y abierta en el mismo tiempo. Se han escogido como tiempos 30 y 60 minutos de exposición. Con ello, se pueden contrastar las *imágenes 11 y 12* correspondientes a un tiempo de 30 minutos y las *imágenes 13 y 14*, correspondientes a un tiempo de 60 minutos.

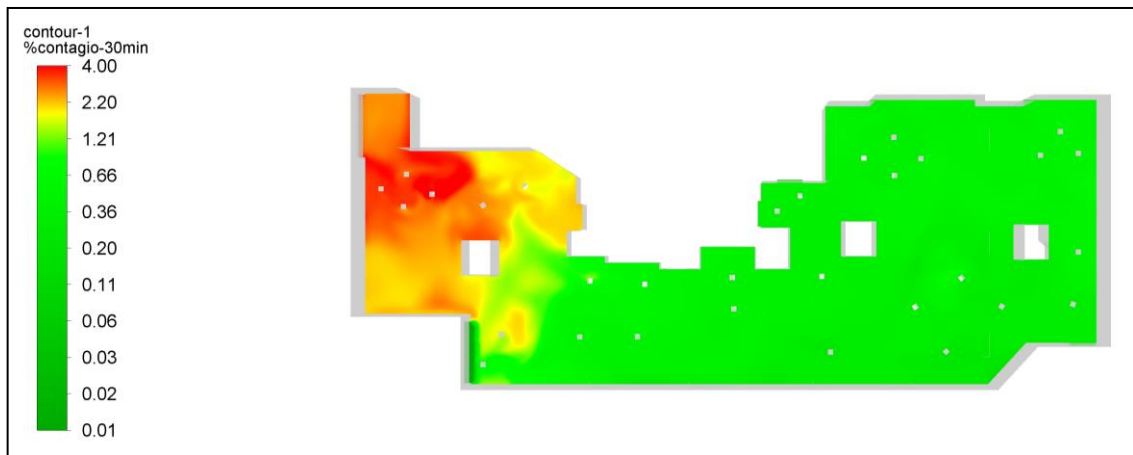
Los resultados indican, como era de esperar, que la probabilidad de contagio es mayor cuando existe una peor ventilación de la sala (puerta cerrada) llegando a ser mayor al 2% en toda la zona de la entrada para un tiempo de exposición de 30 minutos. Para un tiempo de exposición de 60 minutos, en el caso de puerta cerrada esta probabilidad es superior al 4% para toda la zona de la entrada de la sala y para el caso con la puerta abierta mejora significativamente siendo superior al 4% en una zona más reducida.



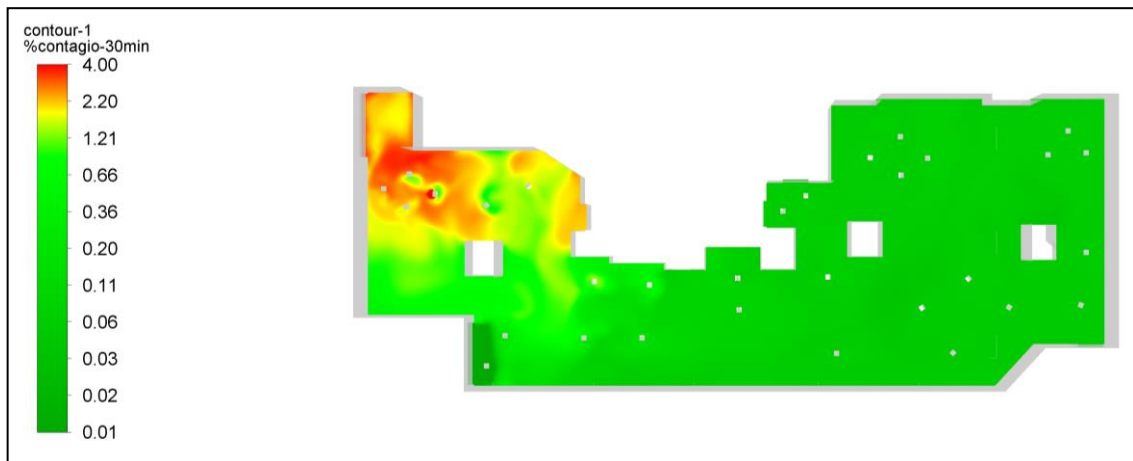
**ANEXO 5 Imagen 9. Distribución de ppm de CO<sub>2</sub> en estado estacionario para el caso de puerta CERRADA. Fuente: elaboración propia**



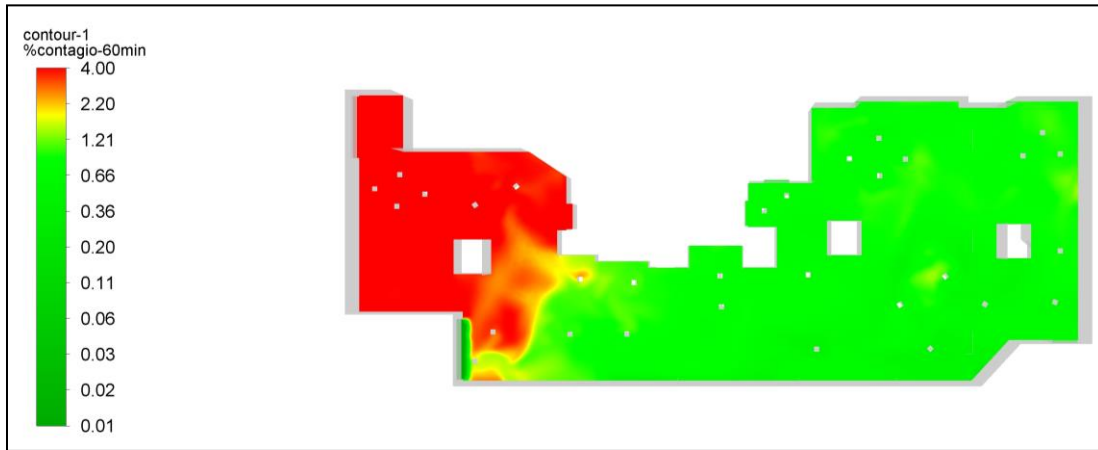
**ANEXO 5 Imagen 10. Distribución de ppm de CO<sub>2</sub> en estado estacionario para el caso de puerta ABIERTA. Fuente: elaboración propia**



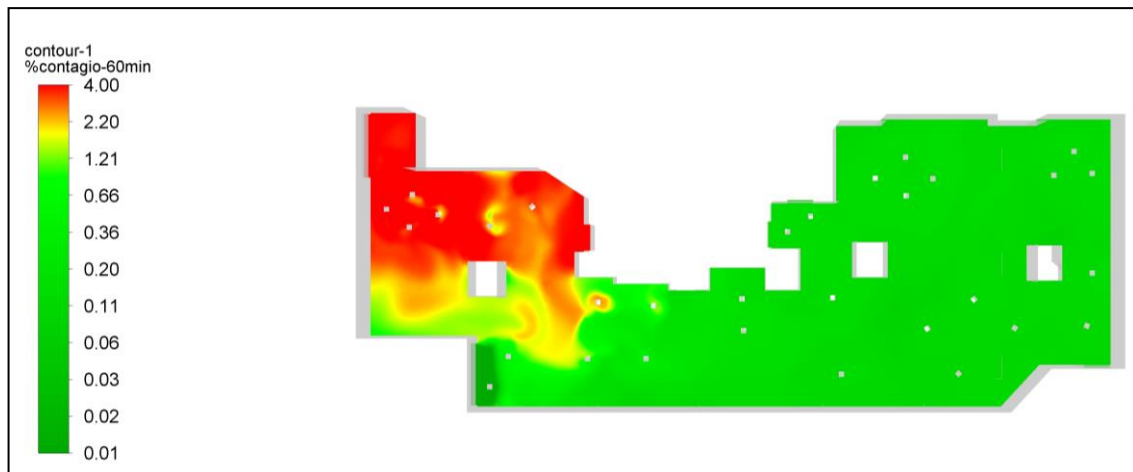
**ANEXO 5 Imagen 11. Probabilidad de contagio tras 30 minutos de exposición en estado estacionario para el caso de puerta CERRADA. Fuente: elaboración propia**



**ANEXO 5 Imagen 12. Probabilidad de contagio tras 30 minutos de exposición en estado estacionario para el caso de puerta ABIERTA. Fuente: elaboración propia**



**ANEXO 5 Imagen 13. Probabilidad de contagio tras 60 minutos de exposición en estado estacionario para el caso de puerta CERRADA. Fuente: elaboración propia**



**ANEXO 5 Imagen 14. Probabilidad de contagio tras 60 minutos de exposición en estado estacionario para el caso de puerta ABIERTA. Fuente: elaboración propia**

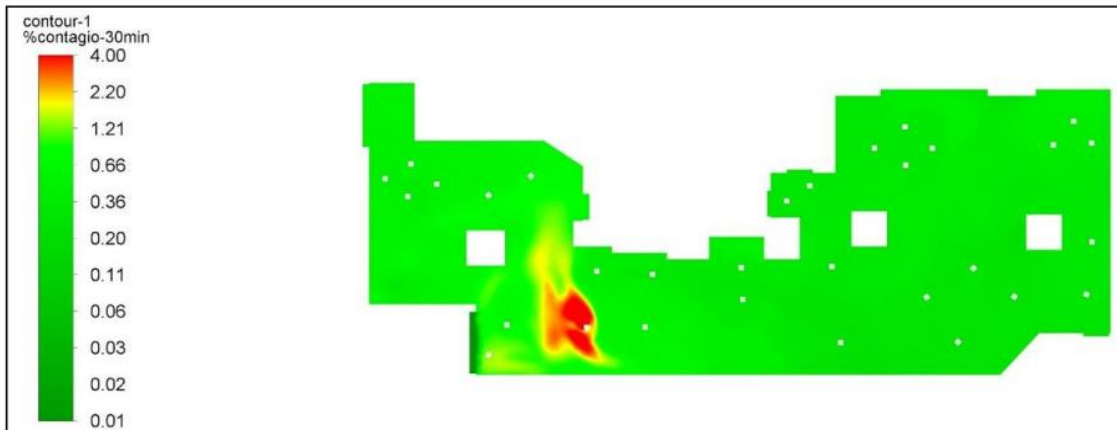
#### APARTADO 4 – PROBABILIDAD DE CONTAGIO ESTADO ESTACIONARIO ZONAS DIFERENTES

En este apartado se pueden visualizar imágenes de distintos resultados obtenidos mediante la resolución del modelo estacionario para la puerta cerrada y abierta. Los resultados obtenidos se refieren a la probabilidad de contagio para 30 minutos de exposición y diferentes posiciones del individuo contagioso.

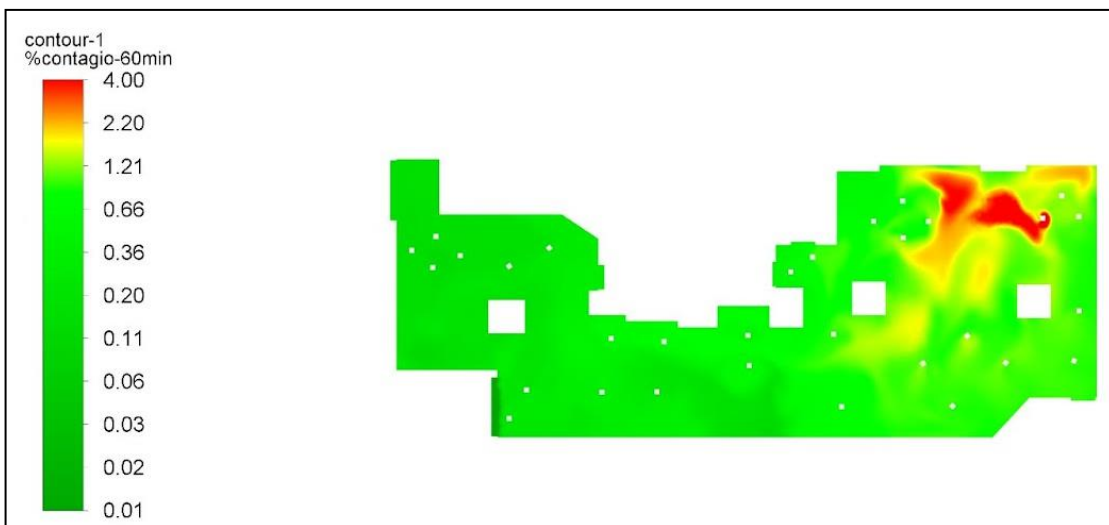
Este apartado ha sido realizado para poder observar los resultados de probabilidad de contagio cuando se coloca el individuo contagioso en las zonas mejor ventiladas, es decir, en la zona centro o en la zona media de la sala.

Efectivamente, los resultados mostrados en las *imágenes 15 a 18* de este ANEXO muestran cómo, para un tiempo de exposición de 30 minutos, la situación del individuo contagioso influye de una forma notable en los resultados.

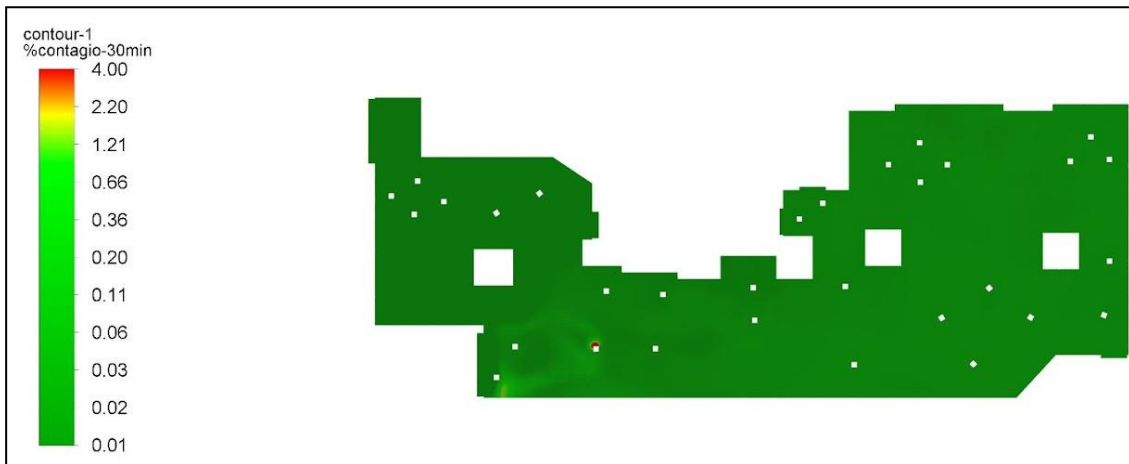
Cabe destacar que, aunque los resultados de las 4 imágenes son muy buenos incluso para una tasa de renovación del aire baja (puerta cerrada), los mejores resultados se dan cuando el individuo contagioso se sitúa en la zona centro de la sala, próximo a la puerta. En esa zona la ventilación que mostraban las líneas de flujo era la mejor de la sala y por lo tanto influye mucho en la disminución de la probabilidad de contagio.



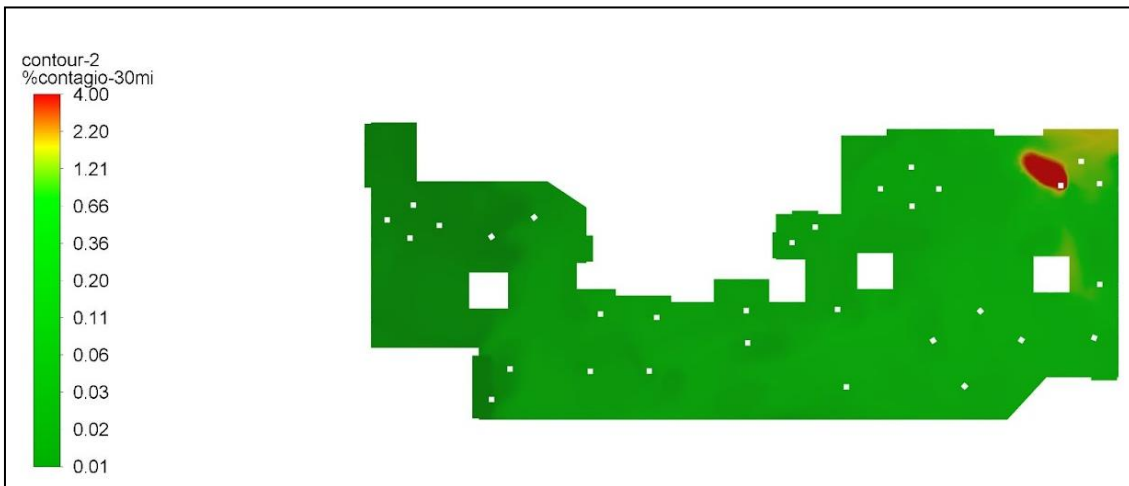
**ANEXO 5 Imagen 15. Probabilidad de contagio tras 30 minutos de exposición en estado estacionario para el caso de puerta CERRADA con individuo contagioso en el centro de la sala.**  
Fuente: elaboración propia



**ANEXO 5 Imagen 16. Probabilidad de contagio tras 30 minutos de exposición en estado estacionario para el caso de puerta CERRADA con individuo contagioso en el fondo de la sala.**  
Fuente: elaboración propia



**ANEXO 5 Imagen 17. Probabilidad de contagio tras 30 minutos de exposición en estado estacionario para el caso de puerta ABIERTA con individuo contagioso en el centro de la sala.**  
**Fuente: elaboración propia**



**ANEXO 5 Imagen 18. Probabilidad de contagio tras 30 minutos de exposición en estado estacionario para el caso de puerta ABIERTA con individuo contagioso en el fondo de la sala.**  
**Fuente: elaboración propia**

#### APARTADO 5 – RESULTADOS PARA CASOS CON CAUDAL TEORICO Y TEORICO x 1.5

En este apartado se pueden visualizar imágenes de distintos resultados obtenidos mediante la resolución del modelo estacionario para el mismo caso, pero considerando las capacidades de extracción teórica (4000 m<sup>3</sup>/h) y teórica x 1.5 (6000 m<sup>3</sup>/h).

Se ha querido resolver de nuevo el flujo, la turbulencia y la ecuación de energía y así poder comprobar cómo sería la respuesta del sistema cuando la capacidad de los extractores fuera realmente la teórica. Gracias a ello se podrán comparar los resultados con los obtenidos mediante la capacidad real (casos con la puerta cerrada y abierta).

En cuanto a la velocidad de las líneas de flujo, se muestran los resultados en modo “semáforo” con las velocidades bajas en color rojo, 0.2 m/s en color amarillo y las velocidades altas en color verde. El aumento a la capacidad teórica aumenta la velocidad máxima a más del doble (pasando de 2.56 m/s en los casos base a 5.52 m/s en el caso teórico). La velocidad

general del flujo es más alta, ya que la existencia del color amarillo ocupa casi toda la zona centro de la sala e incluso alcanza las zonas entrada y fondo de esta.

Las temperaturas, tanto del suelo (12°C), *imagen 21*, como del techo (14°C), *imagen 22*, de la sala disminuyen en un grado con respecto a las temperaturas medias del caso con la puerta abierta y la concentración media de CO<sub>2</sub> alcanza un valor medio de 771 ppm, *imagen 23*. Este valor de concentración de CO<sub>2</sub> significa una buena calidad del aire del interior de la sala ya que, para una sala de estas características, se considera una buena calidad del aire cuando la concentración de CO<sub>2</sub> en el mismo es inferior a 800 ppm.

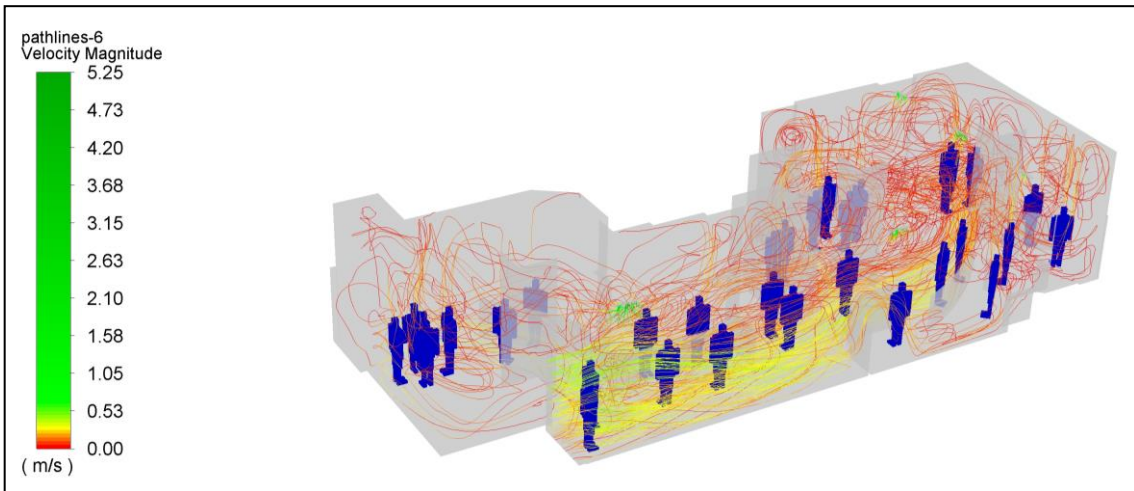
Para finalizar el estudio del caso con la capacidad teórica de los extractores, también se han querido mostrar los resultados de probabilidad de contagio. Estos resultados se pueden apreciar en las *imágenes 24 y 25* de este ANEXO. Esta probabilidad de contagio ha sido representada en modo “semáforo” donde las mayores probabilidades de contagio se representan en color rojo y las menores en color verde. El valor umbral se ha colocado, de nuevo, en una probabilidad de del 2%. Los tiempos de exposición escogidos han sido de nuevo 30 y 60 minutos. Como se puede comprobar, los resultados, en comparación con los mostrados para el caso base, son muy buenos. La probabilidad de contagio no es superior al 2% en ningún punto de la sala, exceptuando en la cabeza contagiosa.

Fijando el estudio ahora en el caso donde se ha incrementado la capacidad teórica en un 50%, en cuanto a la velocidad de las líneas de flujo, se puede comprobar como aumenta la velocidad máxima (pasando de 2.56 m/s en los casos base a 8.43 m/s en el caso teórico). La velocidad general del flujo es más alta, ya que la existencia del color amarillo, e incluso algunas tonalidades de color verdes, ocupa casi toda la zona centro de la sala, alcanzando también las zonas entrada y fondo de esta.

La concentración media de CO<sub>2</sub> alcanza un valor medio de aproximadamente 690 ppm, *imagen 30*. Este valor de concentración de CO<sub>2</sub> significa una buena calidad del aire del interior de la sala ya que, para una sala de estas características, se considera una buena calidad del aire cuando la concentración de CO<sub>2</sub> en el mismo es inferior a 800 ppm.

Para finalizar el estudio del caso con la capacidad teórica aumentada de los extractores, también se han querido mostrar los resultados de probabilidad de contagio. Estos resultados se pueden visualizar en las *imágenes 31 y 32* de este ANEXO. Los tiempos de exposición escogidos han sido de nuevo 30 y 60 minutos. Como se puede comprobar, los resultados, en comparación con los mostrados para el caso base, son muy buenos y se asemejan al caso teórico mostrado anteriormente en este mismo apartado. La probabilidad de contagio no es superior al 2% en ningún punto de la sala, exceptuando en la cabeza contagiosa.

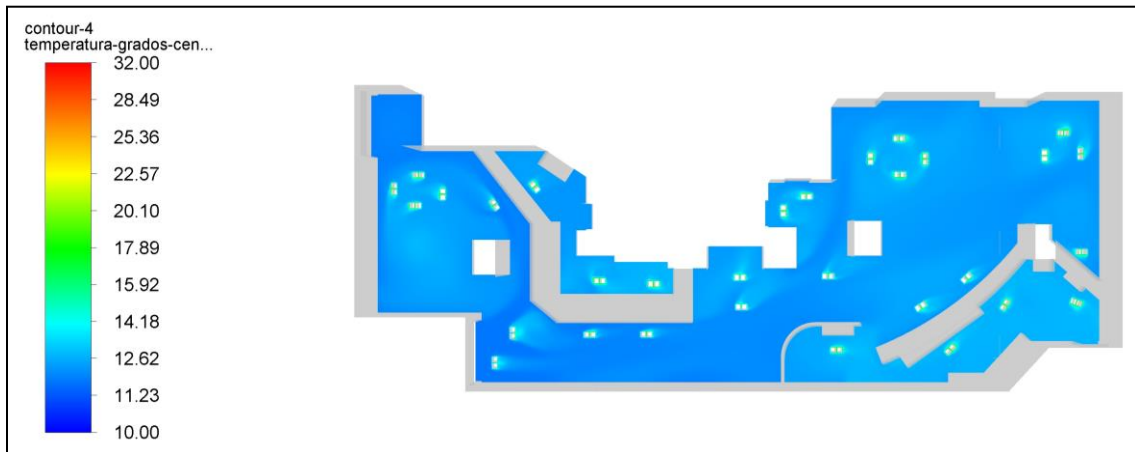




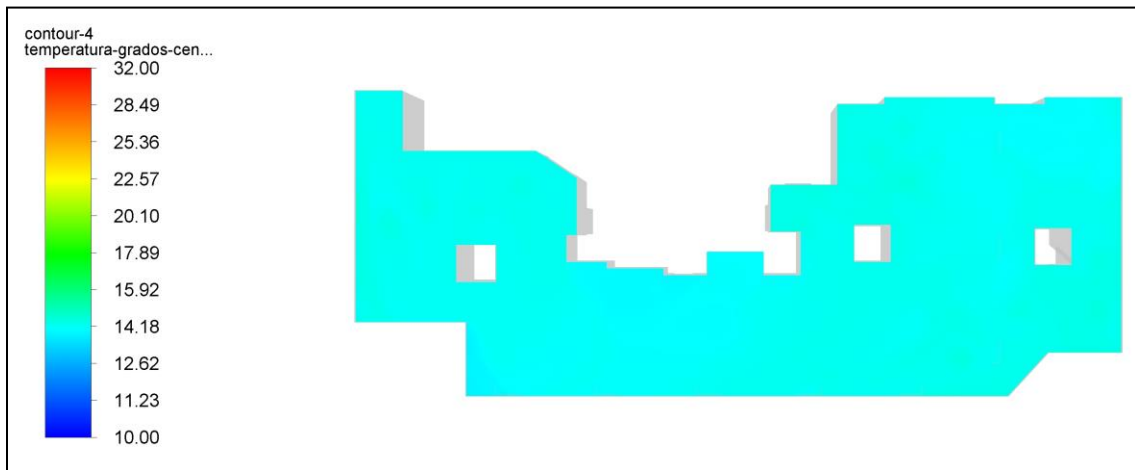
**ANEXO 5 Imagen 19. Vista isométrica de las líneas de flujo donde en rojo se encuentran las menores velocidades y en verde las mayores. Caso TEORICO. Fuente: elaboración propia**



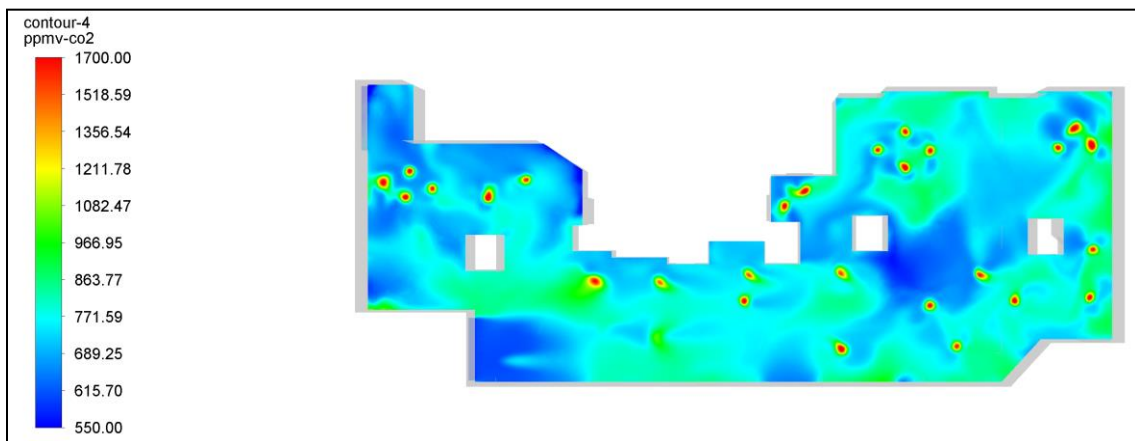
**ANEXO 5 Imagen 20. Vista en planta de las líneas de flujo donde en rojo se encuentran las menores velocidades y en verde las mayores. Caso TEORICO. Fuente: elaboración propia**



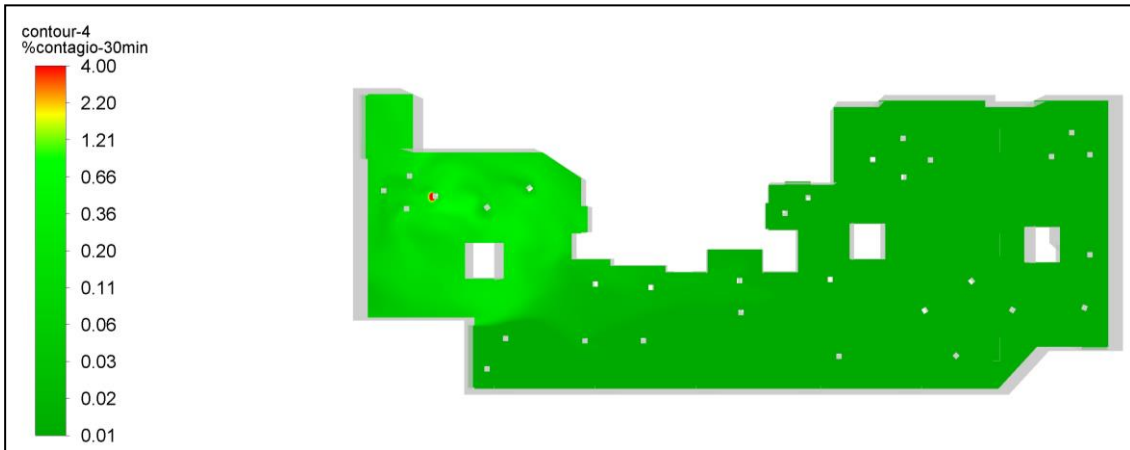
**ANEXO 5 Imagen 21. Distribución de temperatura a la altura del suelo de la sala. Temperatura media de 13 °C. Caso TEORICO. Fuente: elaboración propia**



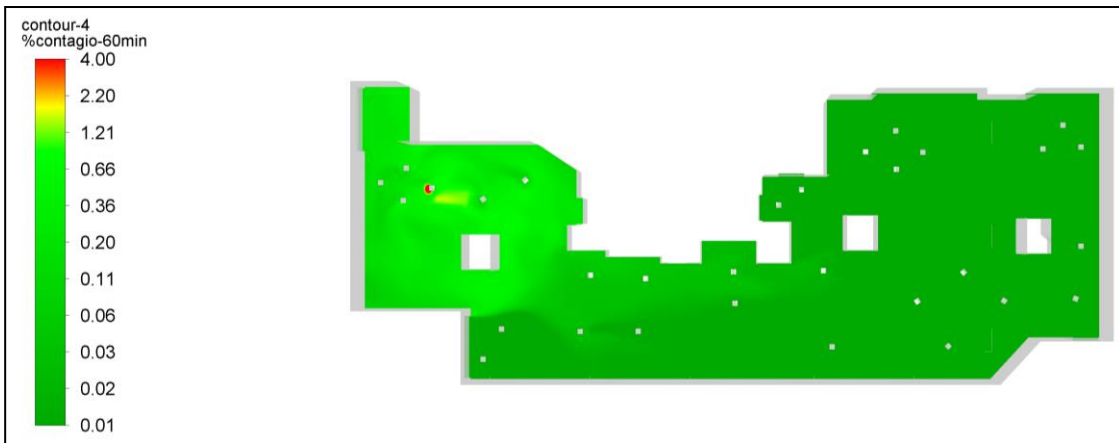
**ANEXO 5 Imagen 22. Distribución de temperatura a la altura del techo de la sala. Temperatura media de 14 °C. Caso TEORICO. Fuente: elaboración propia**



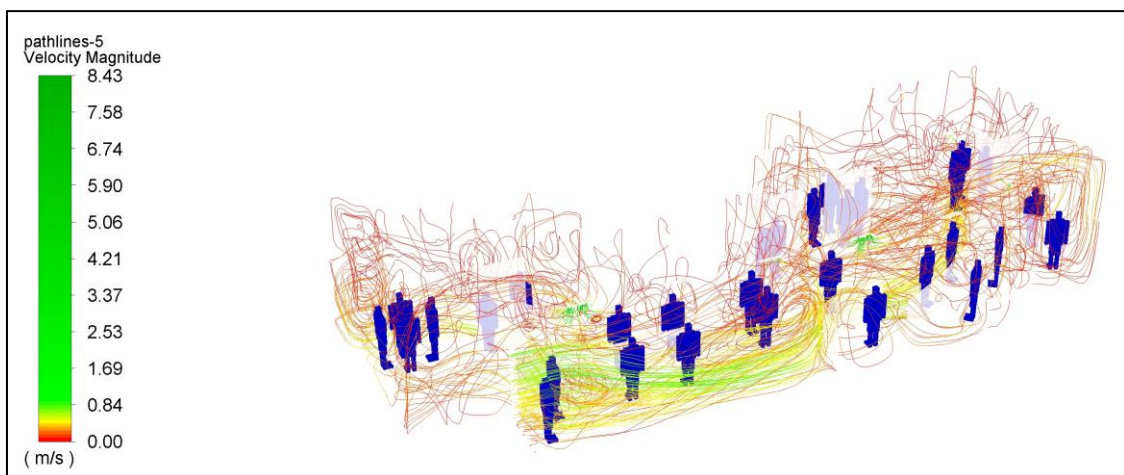
**ANEXO 5 Imagen 23. Distribución de ppm de CO<sub>2</sub> en estado estacionario para el caso TEORICO. Fuente: elaboración propia**



**ANEXO 5 Imagen 24. Probabilidad de contagio tras 30 minutos de exposición en estado estacionario para el caso TEORICO. Fuente: elaboración propia**



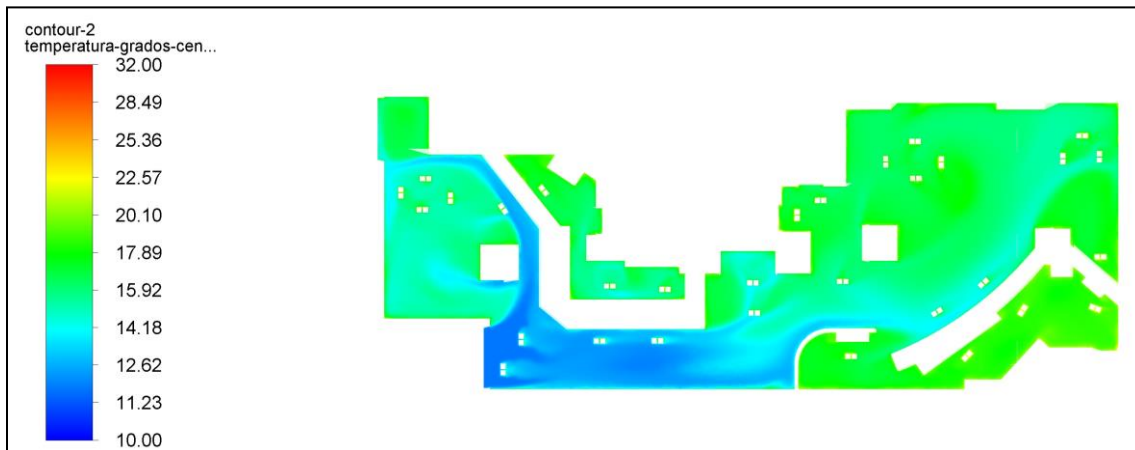
**ANEXO 5 Imagen 25. Probabilidad de contagio tras 60 minutos de exposición en estado estacionario para el caso TEORICO. Fuente: elaboración propia**



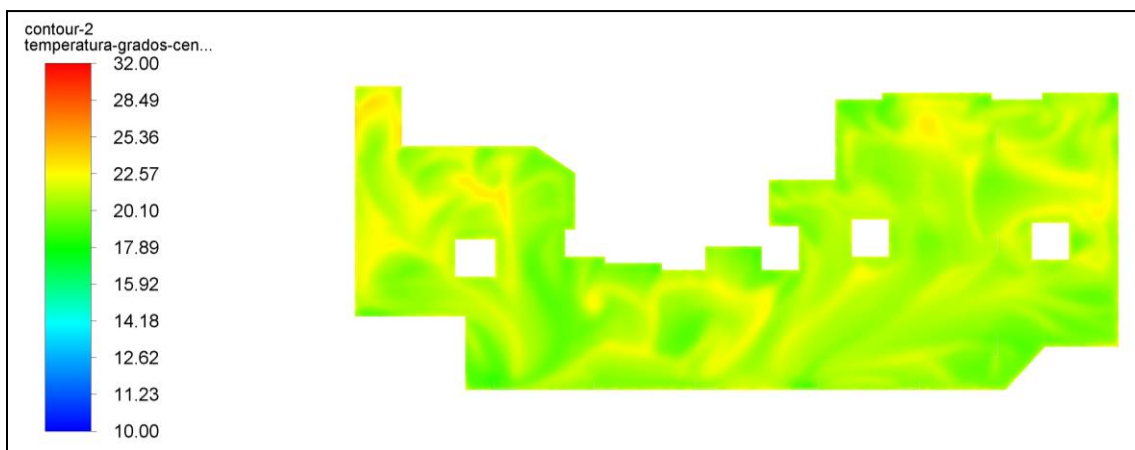
**ANEXO 5 Imagen 26. Vista isométrica de las líneas de flujo donde en rojo se encuentran las menores velocidades y en verde las mayores. Caso TEORICO x 1.5. Fuente: elaboración propia**



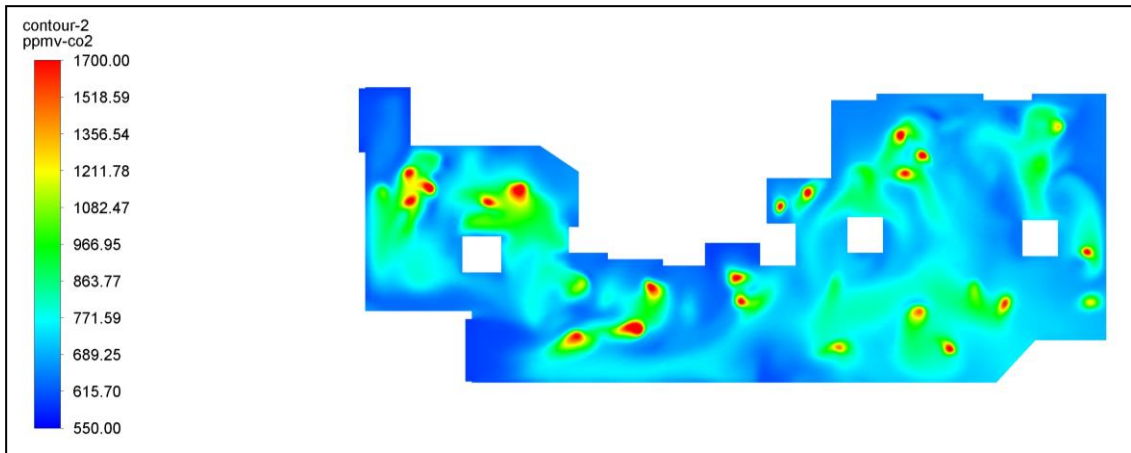
**ANEXO 5 Imagen 27. Vista en planta de las líneas de flujo donde en rojo se encuentran las menores velocidades y en verde las mayores. Caso TEORICO x 1.5. Fuente: elaboración propia**



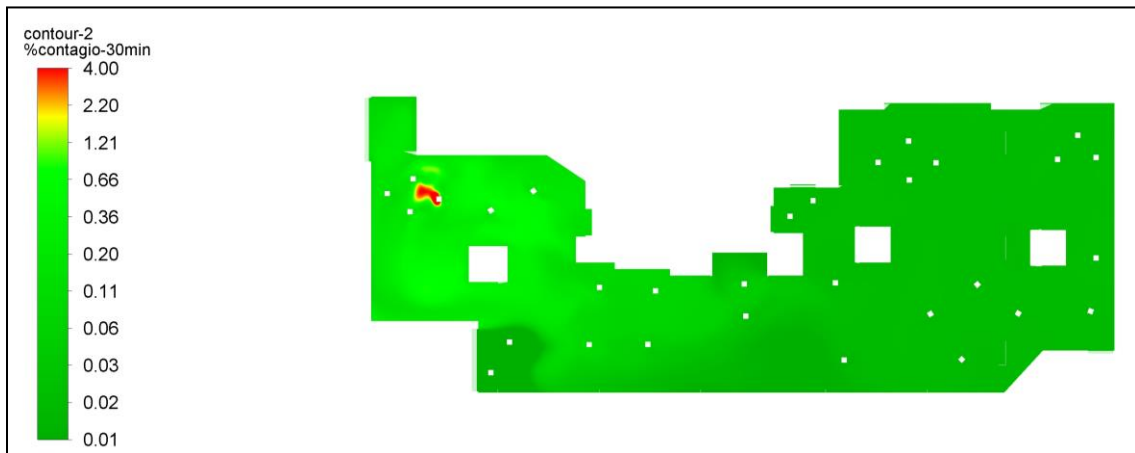
**ANEXO 5 Imagen 28. Distribución de temperatura a la altura del suelo de la sala. Temperatura media de 15 °C. Caso TEORICO x 1.5. Fuente: elaboración propia**



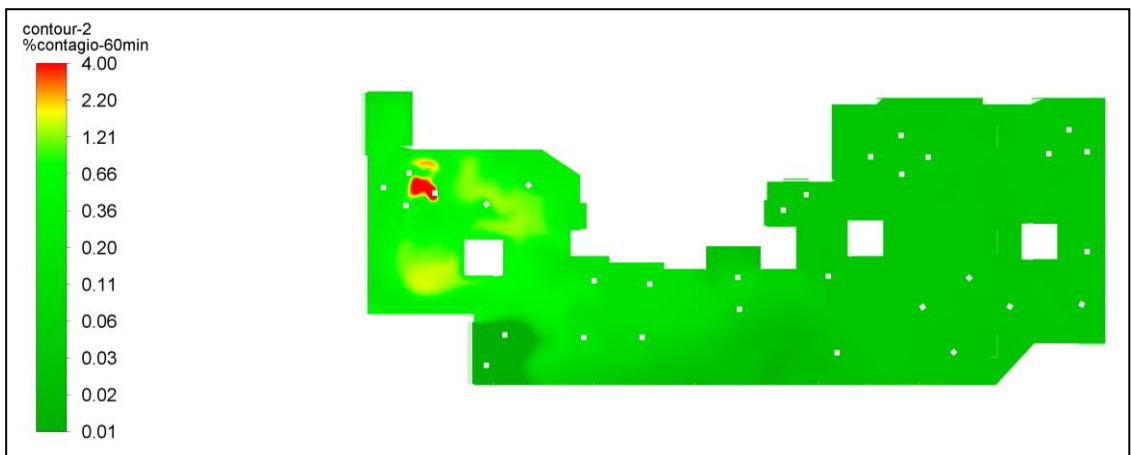
**ANEXO 5 Imagen 29. Distribución de temperatura a la altura del suelo de la sala. Temperatura media de 21 °C. Caso TEORICO. Fuente: elaboración propia**



**ANEXO 5 Imagen 30. Distribución de ppm de CO<sub>2</sub> en estado estacionario para el caso TEORICO x 1.5. Fuente: elaboración propia**



**ANEXO 5 Imagen 31. Probabilidad de contagio tras 30 minutos de exposición en estado estacionario para el caso TEORICO x 1.5. Fuente: elaboración propia**



**ANEXO 5 Imagen 32. Probabilidad de contagio tras 60 minutos de exposición en estado estacionario para el caso TEORICO x 1.5. Fuente: elaboración propia**

## ANEXO 6

El presente ANEXO 6 hace referencia al apartado 4. Análisis de resultados y recoge los datos obtenidos de concentración de CO<sub>2</sub> durante el estudio del transitorio. Las *tablas 1 a 3* recogen los resultados obtenidos por zonas, siendo la *Tabla 1* correspondiente a los 9 sensores de la zona del fondo de la sala, la *Tabla 2* corresponde a los 8 sensores de la zona media de la sala y, finalmente, la *Tabla 3* que corresponde a los 3 sensores situados en la zona entrada de la sala. Dichos sensores han recogido un dato de concentración de CO<sub>2</sub>, medido en partes por millón, por cada minuto de estudio.

En cuanto a la *Tabla 4* del presente ANEXO, en ella se reflejan: la media, por minuto, de los sensores correspondientes a la misma zona de la sala, la media, también por minuto, de todos los sensores de la sala, los datos experimentales, proporcionados por LIFTEC, de la media de cada una de las zonas de la sala y, finalmente, la media de los datos experimentales. Esta *Tabla 4* ha permitido elaborar, tanto la gráfica que se puede visualizar en la *imagen 18* de este proyecto en la que se comparan los resultados experimentales y computacionales, como la *Tabla 2* de este proyecto donde se pueden apreciar los errores entre las diferentes medias de ambos estudios. Esta *Tabla 4* ha sido elaborada mediante una hoja de cálculo Excel a partir de los resultados obtenidos en los reports del estudio en estado transitorio.

**ANEXO 6 Tabla 1. Datos recogidos en ppm de CO<sub>2</sub> para los sensores de la zona “fondo” de la sala.**  
Fuente: elaboración propia.

flow-time [min]	A1	A2	A3	A4	C1	C2	L4	L5	L6
1	572,09	572,09	572,09	572,09	572,09	572,09	572,09	572,09	572,09
2	548,35	697,87	577,00	570,36	563,35	619,63	718,14	586,50	730,19
3	535,28	744,97	580,17	655,83	563,50	666,18	749,20	616,53	772,55
4	551,13	764,35	606,61	708,77	603,41	695,20	795,82	631,72	806,79
5	570,38	790,09	642,56	742,03	644,15	729,18	835,29	646,72	836,65
6	595,07	820,26	677,09	774,56	681,42	762,44	876,44	665,57	868,73
7	621,90	852,13	708,10	805,47	711,81	791,99	915,62	685,97	900,01
8	651,46	884,52	738,02	836,02	739,79	820,07	954,31	708,34	931,83
9	681,96	916,22	766,52	864,76	766,35	846,07	992,03	731,84	963,10
10	712,80	947,81	793,78	892,24	791,96	870,47	1028,53	756,14	993,84
11	743,59	979,08	819,96	918,85	816,72	893,59	1063,95	780,88	1023,96
12	772,79	1008,52	844,16	943,71	839,78	914,71	1096,87	804,75	1052,21
13	802,78	1038,65	868,62	969,11	863,21	935,79	1130,18	829,63	1081,05
14	832,14	1068,11	892,37	994,02	886,03	955,99	1162,47	854,31	1109,22
15	860,80	1096,88	915,50	1018,47	908,28	975,41	1193,79	878,67	1136,72
16	888,74	1124,93	938,05	1042,45	929,99	994,13	1224,18	902,64	1163,55
17	915,92	1152,28	960,08	1065,98	951,17	1012,22	1253,70	926,15	1189,71
18	942,36	1178,94	981,61	1089,03	971,85	1029,73	1282,39	949,16	1215,23
19	968,06	1204,91	1002,66	1111,61	992,03	1046,70	1310,29	971,66	1240,11
20	993,03	1230,21	1023,24	1133,71	1011,72	1063,19	1337,42	993,62	1264,36

21	1017,30	1254,87	1043,35	1155,33	1030,94	1079,20	1363,83	1015,05	1288,01
22	1040,88	1278,90	1063,00	1176,45	1049,69	1094,78	1389,55	1035,95	1311,06
23	1063,81	1302,31	1082,20	1197,10	1067,99	1109,94	1414,59	1056,32	1333,54
24	1086,10	1325,13	1100,95	1217,25	1085,84	1124,69	1438,98	1076,17	1355,44
25	1107,78	1347,37	1119,25	1236,93	1103,25	1139,06	1462,74	1095,51	1376,80
26	1128,87	1369,04	1137,12	1256,13	1120,23	1153,04	1485,90	1114,35	1397,62
27	1149,39	1390,16	1154,56	1274,87	1136,78	1166,67	1508,46	1132,70	1417,92
28	1169,36	1410,75	1171,57	1293,14	1152,92	1179,93	1530,45	1150,58	1437,70
29	1188,80	1430,81	1188,16	1310,96	1168,66	1192,86	1551,88	1167,99	1456,98
30	1207,73	1450,36	1204,33	1328,33	1184,00	1205,44	1572,77	1184,96	1475,78
31	1226,16	1469,42	1220,10	1345,27	1198,95	1217,70	1593,13	1201,49	1494,10
32	1241,13	1484,89	1232,92	1359,03	1211,10	1227,65	1609,67	1214,90	1508,98
33	1258,69	1503,06	1247,97	1375,18	1225,36	1239,32	1629,08	1230,66	1526,45
34	1275,80	1520,77	1262,64	1390,94	1239,26	1250,69	1648,01	1246,01	1543,49
35	1292,47	1538,02	1276,93	1406,29	1252,81	1261,77	1666,46	1260,96	1560,09
36	1308,72	1554,84	1290,87	1421,25	1266,01	1272,55	1684,44	1275,54	1576,26
37	1324,55	1571,22	1304,44	1435,83	1278,87	1283,05	1701,97	1289,74	1592,02
38	1339,98	1587,18	1317,67	1450,04	1291,40	1293,27	1719,04	1303,58	1607,38
39	1355,01	1602,72	1330,56	1463,88	1303,61	1303,23	1735,68	1317,06	1622,35
40	1369,66	1617,87	1343,11	1477,37	1315,50	1312,92	1751,89	1330,20	1636,93
41	1383,93	1632,62	1355,35	1490,51	1327,09	1322,35	1767,69	1343,00	1651,13
42	1397,84	1646,99	1367,26	1503,31	1338,38	1331,53	1783,08	1355,48	1664,97
43	1411,39	1660,99	1378,87	1515,79	1349,37	1340,47	1798,08	1367,63	1678,45
44	1424,60	1674,62	1390,18	1527,94	1360,08	1349,17	1812,69	1379,48	1691,58
45	1437,47	1687,90	1401,19	1539,78	1370,51	1357,65	1826,92	1391,02	1704,37
46	1450,01	1700,83	1411,92	1551,31	1380,67	1365,89	1840,79	1402,27	1716,83
47	1462,23	1713,42	1422,37	1562,54	1390,57	1373,92	1854,30	1413,22	1728,97
48	1474,14	1725,69	1432,55	1573,49	1400,20	1381,73	1867,46	1423,90	1740,79
49	1485,74	1737,64	1442,47	1584,15	1409,59	1389,34	1880,28	1434,30	1752,30
50	1497,04	1749,27	1452,12	1594,53	1418,73	1396,74	1892,77	1444,43	1763,52
51	1508,06	1760,60	1461,53	1604,65	1427,63	1403,94	1904,93	1454,30	1774,44
52	1518,78	1771,63	1470,69	1614,50	1436,30	1410,95	1916,78	1463,92	1785,07
53	1529,24	1782,37	1479,60	1624,09	1444,74	1417,78	1928,32	1473,29	1795,43
54	1539,42	1792,82	1488,29	1633,44	1452,96	1424,42	1939,56	1482,41	1805,52
55	1549,34	1803,01	1496,75	1642,54	1460,97	1430,88	1950,50	1491,30	1815,34
56	1559,00	1812,92	1504,99	1651,41	1468,77	1437,18	1961,17	1499,96	1824,91
57	1568,41	1822,58	1513,01	1660,04	1476,36	1443,30	1971,55	1508,40	1834,22
58	1577,58	1831,98	1520,82	1668,45	1483,75	1449,26	1981,66	1516,62	1843,29
59	1378,40	1356,35	1385,61	1211,82	1991,30	1807,95	2143,24	1749,88	1889,97
60	1331,80	1342,71	1483,49	826,85	2000,93	1993,30	1862,26	1877,97	1780,84
61	1331,80	1342,71	1483,49	826,85	2000,93	1993,30	1862,26	1877,97	1780,84
62	1324,68	1314,98	1484,15	794,06	1879,32	1930,83	1726,59	1868,06	1737,95
63	1298,45	1282,90	1470,20	778,58	1789,21	1867,95	1625,46	1841,41	1694,87
64	1260,96	1250,21	1451,27	764,95	1723,50	1813,11	1547,14	1806,82	1656,19
65	1219,58	1220,84	1428,74	750,88	1673,07	1767,33	1485,10	1768,51	1620,68

66	1178,06	1194,19	1402,63	736,43	1629,91	1728,08	1434,42	1728,41	1586,56
67	1138,25	1168,80	1374,08	721,82	1590,69	1693,59	1392,54	1687,83	1553,59
68	1101,18	1144,28	1344,44	707,26	1554,60	1662,76	1357,79	1647,89	1522,24
69	1067,29	1120,91	1314,73	692,96	1521,53	1634,90	1328,80	1609,44	1492,92
70	1036,65	1099,02	1285,71	679,09	1491,40	1609,59	1304,41	1573,05	1465,84
71	1009,11	1078,76	1257,87	665,81	1464,06	1586,56	1283,69	1539,05	1441,02
72	984,41	1060,17	1231,51	653,23	1439,33	1565,59	1265,91	1507,55	1418,38
73	962,30	1043,21	1206,78	641,41	1417,01	1546,50	1250,53	1478,54	1397,83
74	942,50	1027,80	1183,73	630,40	1396,88	1529,13	1237,10	1451,95	1379,21
75	924,77	1013,85	1162,37	620,20	1378,72	1513,32	1225,29	1427,65	1362,38
76	908,87	1001,23	1142,66	610,78	1362,33	1498,93	1214,85	1405,48	1347,17
77	894,59	989,83	1124,52	602,12	1347,54	1485,83	1205,55	1385,29	1333,43
78	881,75	979,53	1107,87	594,18	1334,17	1473,91	1197,24	1366,93	1321,03
79	870,19	970,23	1092,63	586,91	1322,07	1463,05	1189,77	1350,22	1309,83
80	859,75	961,84	1078,68	580,27	1311,12	1453,16	1183,05	1335,03	1299,70
81	850,33	954,25	1065,95	574,22	1301,20	1444,15	1176,98	1321,23	1290,54
82	841,81	947,38	1054,32	568,69	1292,21	1435,94	1171,48	1308,68	1282,25
83	834,09	941,17	1043,72	563,66	1284,05	1428,46	1166,49	1297,28	1274,75
84	827,10	935,55	1034,06	559,07	1276,64	1421,65	1161,97	1286,91	1267,95
85	820,75	930,46	1025,26	554,90	1269,91	1415,44	1157,85	1277,48	1261,78
86	814,99	925,84	1017,23	551,10	1263,79	1409,77	1154,11	1268,90	1256,19
87	809,76	921,65	1009,93	547,64	1258,23	1404,61	1150,70	1261,11	1251,12
88	805,00	917,85	1003,27	544,49	1253,17	1399,91	1147,59	1254,01	1246,51

**ANEXO 6 Tabla 2. Datos recogidos en ppm de CO<sub>2</sub> para los sensores de la zona “medio” de la sala.  
Fuente: elaboración propia.**

<b>flow-time [min]</b>	<b>A6</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>	<b>C9</b>	<b>L2</b>	<b>L3</b>	<b>L7</b>
1	647,82	647,82	647,82	647,82	647,82	647,82	647,82	647,82
2	624,53	641,86	703,94	620,93	731,75	758,71	702,94	722,55
3	672,14	642,92	708,32	603,45	809,55	890,51	761,16	820,01
4	686,81	683,84	707,94	611,79	831,19	931,04	758,25	875,42
5	704,66	716,64	735,62	629,14	849,77	948,21	773,72	902,76
6	719,25	741,03	764,30	645,27	869,44	968,49	797,99	924,17
7	731,79	766,48	785,56	660,65	888,15	989,49	817,63	945,85
8	744,74	792,45	807,16	676,27	907,06	1010,08	836,64	967,82
9	757,76	816,27	828,75	691,57	925,67	1030,04	855,81	988,97
10	770,64	838,60	849,09	706,62	943,89	1049,67	874,30	1009,71
11	783,31	859,80	868,33	721,42	961,64	1068,77	891,93	1030,00
12	795,23	879,07	885,97	735,28	978,14	1086,47	908,13	1048,93
13	807,37	898,18	903,58	749,38	994,83	1104,34	924,36	1068,11
14	819,19	916,39	920,40	763,06	1010,97	1121,61	939,89	1086,72
15	830,69	933,78	936,47	776,31	1026,56	1138,27	954,79	1104,75
16	841,85	950,44	951,87	789,14	1041,63	1154,35	969,09	1122,20



17	852,69	966,43	966,64	801,54	1056,19	1169,87	982,84	1139,08
18	863,19	981,82	980,82	813,52	1070,25	1184,84	996,07	1155,40
19	873,36	996,67	994,48	825,09	1083,84	1199,30	1008,82	1171,19
20	883,21	1011,02	1007,64	836,27	1096,98	1213,27	1021,13	1186,45
21	892,75	1024,91	1020,34	847,08	1109,69	1226,76	1033,03	1201,22
22	901,98	1038,37	1032,62	857,52	1121,98	1239,82	1044,53	1215,50
23	910,92	1051,43	1044,50	867,61	1133,88	1252,44	1055,67	1229,33
24	919,57	1064,11	1056,01	877,38	1145,40	1264,67	1066,46	1242,72
25	927,95	1076,43	1067,17	886,83	1156,57	1276,50	1076,92	1255,68
26	936,06	1088,40	1077,99	895,97	1167,39	1287,97	1087,08	1268,24
27	943,92	1100,04	1088,49	904,83	1177,88	1299,09	1096,93	1280,41
28	951,53	1111,36	1098,69	913,41	1188,05	1309,88	1106,49	1292,21
29	958,90	1122,38	1108,60	921,72	1197,92	1320,34	1115,78	1303,65
30	966,05	1133,09	1118,23	929,78	1207,50	1330,48	1124,81	1314,74
31	972,97	1143,52	1127,58	937,59	1216,79	1340,33	1133,58	1325,50
32	978,57	1151,98	1135,16	943,90	1224,30	1348,30	1140,68	1334,20
33	985,11	1161,90	1144,05	951,29	1233,10	1357,62	1149,00	1344,38
34	991,45	1171,55	1152,69	958,45	1241,64	1366,68	1157,09	1354,25
35	997,60	1180,95	1161,09	965,40	1249,94	1375,47	1164,96	1363,84
36	1003,57	1190,10	1169,25	972,14	1257,99	1384,01	1172,60	1373,13
37	1009,35	1199,00	1177,20	978,69	1265,81	1392,30	1180,03	1382,16
38	1014,96	1207,66	1184,92	985,04	1273,41	1400,35	1187,26	1390,92
39	1020,40	1216,09	1192,44	991,20	1280,78	1408,17	1194,28	1399,42
40	1025,68	1224,30	1199,74	997,18	1287,95	1415,77	1201,11	1407,67
41	1030,80	1232,28	1206,85	1002,98	1294,90	1423,14	1207,75	1415,68
42	1035,76	1240,05	1213,76	1008,62	1301,66	1430,31	1214,20	1423,46
43	1040,58	1247,61	1220,48	1014,09	1308,22	1437,27	1220,48	1431,00
44	1045,25	1254,96	1227,01	1019,39	1314,59	1444,03	1226,57	1438,33
45	1049,78	1262,12	1233,37	1024,55	1320,78	1450,59	1232,50	1445,44
46	1054,18	1269,09	1239,55	1029,55	1326,79	1456,97	1238,27	1452,34
47	1058,45	1275,86	1245,56	1034,40	1332,63	1463,16	1243,87	1459,04
48	1062,59	1282,46	1251,40	1039,11	1338,30	1469,18	1249,32	1465,54
49	1066,60	1288,87	1257,09	1043,69	1343,81	1475,03	1254,62	1471,86
50	1070,50	1295,12	1262,61	1048,13	1349,16	1480,70	1259,77	1477,99
51	1074,28	1301,19	1267,99	1052,44	1354,35	1486,22	1264,78	1483,94
52	1077,95	1307,10	1273,22	1056,63	1359,40	1491,57	1269,64	1489,71
53	1081,51	1312,85	1278,30	1060,69	1364,30	1496,77	1274,37	1495,32
54	1084,96	1318,44	1283,24	1064,63	1369,06	1501,83	1278,97	1500,76
55	1088,31	1323,88	1288,05	1068,46	1373,68	1506,74	1283,45	1506,05
56	1091,56	1329,18	1292,72	1072,18	1378,17	1511,50	1287,79	1511,18
57	1094,71	1334,33	1297,27	1075,79	1382,53	1516,14	1292,02	1516,16
58	1097,78	1339,34	1301,68	1079,29	1386,77	1520,63	1296,13	1521,00
59	1213,82	922,86	1211,54	1388,33	914,15	1448,98	1471,98	1581,98
60	1268,80	693,19	1286,18	1644,59	931,12	1440,49	1466,10	1637,54
61	1268,80	693,19	1286,18	1644,59	931,12	1440,49	1466,10	1637,54

62	1319,64	700,23	1212,14	1616,02	894,58	1370,67	1435,64	1584,43
63	1287,64	691,55	1190,07	1548,70	845,87	1298,25	1400,74	1513,58
64	1249,52	682,58	1173,62	1490,70	804,93	1244,49	1364,01	1457,43
65	1223,48	675,81	1149,24	1445,87	772,93	1205,98	1330,07	1414,96
66	1200,45	669,53	1123,49	1408,24	748,63	1176,88	1300,81	1381,23
67	1178,80	663,74	1100,06	1376,47	730,27	1154,07	1276,03	1353,72
68	1159,62	658,63	1079,69	1349,75	716,14	1135,91	1254,82	1331,14
69	1143,26	654,22	1062,10	1327,26	704,99	1121,26	1236,35	1312,48
70	1129,29	650,38	1046,78	1308,17	695,97	1109,19	1219,99	1296,85
71	1117,17	647,00	1033,24	1291,67	688,54	1099,05	1205,29	1283,53
72	1106,44	643,97	1021,07	1277,14	682,31	1090,35	1191,98	1271,95
73	1096,77	641,21	1010,00	1264,11	676,99	1082,72	1179,83	1261,71
74	1087,92	638,67	999,84	1252,28	672,37	1075,94	1168,71	1252,51
75	1079,74	636,32	990,48	1241,43	668,30	1069,82	1158,50	1244,16
76	1072,15	634,14	981,83	1231,42	664,67	1064,24	1149,12	1236,52
77	1065,09	632,11	973,83	1222,16	661,39	1059,11	1140,50	1229,50
78	1058,51	630,22	966,43	1213,57	658,41	1054,39	1132,57	1223,01
79	1052,39	628,47	959,60	1205,61	655,69	1050,01	1125,28	1217,01
80	1046,70	626,84	953,31	1198,22	653,18	1045,95	1118,60	1211,46
81	1041,43	625,33	947,51	1191,38	650,88	1042,18	1112,46	1206,31
82	1036,54	623,93	942,17	1185,04	648,75	1038,68	1106,83	1201,55
83	1032,02	622,64	937,27	1179,17	646,78	1035,42	1101,67	1197,13
84	1027,84	621,45	932,77	1173,75	644,96	1032,40	1096,94	1193,04
85	1023,99	620,34	928,65	1168,74	643,27	1029,59	1092,62	1189,26
86	1020,43	619,33	924,87	1164,10	641,71	1026,97	1088,66	1185,76
87	1017,15	618,39	921,41	1159,83	640,27	1024,55	1085,04	1182,53
88	1014,12	617,53	918,24	1155,89	638,93	1022,29	1081,72	1179,53

**ANEXO 6 Tabla 3. Datos recogidos en ppm de CO<sub>2</sub> para los sensores de la zona “entrada” de la sala. Fuente: elaboración propia.**

<b>flow-time [min]</b>	<b>C10</b>	<b>C6</b>	<b>C7</b>
1	679,00	679,00	679,00
2	632,17	701,74	650,41
3	627,00	691,66	623,52
4	637,88	673,86	633,94
5	655,46	677,93	654,53
6	676,44	695,23	679,09
7	697,92	717,20	705,01
8	720,73	742,25	732,59
9	743,88	768,39	759,93
10	767,21	794,81	786,69
11	790,59	821,06	812,67
12	812,88	845,80	836,74

13	835,89	871,03	861,00
14	858,57	895,59	884,40
15	880,86	919,43	906,97
16	902,71	942,55	928,75
17	924,09	964,96	949,79
18	944,99	986,68	970,11
19	965,38	1007,71	989,76
20	985,27	1028,09	1008,75
21	1004,64	1047,82	1027,12
22	1023,49	1066,94	1044,89
23	1041,82	1085,45	1062,09
24	1059,65	1103,37	1078,73
25	1076,96	1120,74	1094,83
26	1093,77	1137,55	1110,42
27	1110,10	1153,83	1125,52
28	1125,94	1169,60	1140,13
29	1141,30	1184,88	1154,27
30	1156,21	1199,67	1167,97
31	1170,67	1214,00	1181,23
32	1182,35	1225,56	1191,94
33	1196,00	1239,07	1204,44
34	1209,25	1252,15	1216,55
35	1222,09	1264,83	1228,28
36	1234,54	1277,11	1239,64
37	1246,60	1289,00	1250,64
38	1258,30	1300,53	1261,30
39	1269,63	1311,69	1271,62
40	1280,62	1322,50	1281,62
41	1291,26	1332,97	1291,31
42	1301,58	1343,12	1300,69
43	1311,58	1352,95	1309,78
44	1321,28	1362,48	1318,58
45	1330,67	1371,70	1327,11
46	1339,78	1380,65	1335,38
47	1348,60	1389,31	1343,38
48	1357,15	1397,70	1351,14
49	1365,45	1405,84	1358,66
50	1373,48	1413,72	1365,94
51	1381,27	1421,36	1373,00
52	1388,82	1428,76	1379,83
53	1396,14	1435,93	1386,46
54	1403,23	1442,88	1392,88
55	1410,10	1449,62	1399,10
56	1416,77	1456,15	1405,13
57	1423,23	1462,47	1410,97

58	1429,49	1468,61	1416,63
59	1790,90	1097,20	1734,56
60	2579,35	624,48	1325,34
61	2579,35	624,48	1325,34
62	2818,88	589,46	1293,09
63	2952,48	578,62	1276,94
64	3024,07	572,87	1264,77
65	3059,48	569,26	1254,69
66	3073,65	566,37	1245,53
67	3076,04	563,86	1236,61
68	3071,71	561,54	1227,90
69	3063,43	559,34	1219,47
70	3052,91	557,25	1211,39
71	3041,15	555,26	1203,70
72	3028,71	553,39	1196,47
73	3015,95	551,63	1189,70
74	3003,07	549,99	1183,39
75	2990,20	548,47	1177,53
76	2977,46	547,06	1172,11
77	2964,92	545,76	1167,08
78	2952,64	544,56	1162,42
79	2940,66	543,46	1158,11
80	2929,04	542,44	1154,12
81	2917,79	541,50	1150,41
82	2906,94	540,62	1146,96
83	2896,50	539,82	1143,76
84	2886,49	539,07	1140,78
85	2876,90	538,38	1138,00
86	2867,74	537,73	1135,41
87	2858,99	537,13	1133,00
88	2850,67	536,57	1130,74

**ANEXO 6 Tabla 4. Cálculo de medias totales, de las zonas “entrada”, “centro” y “fondo”. Los datos EXP son los datos facilitados por LIFTEC (datos experimentales). Fuente: elaboración propia.**

flow-time [min]	MEDIA	MEDIA ENTRADA	MEDIA CENTRO	MEDIA FONDO	Media EXP	Entrada EXP	Centro EXP	Fondo EXP
1	615,23	679,00	647,82	572,09	624,00	679,00	648,00	572,00
2	656,35	676,07	693,22	623,49	652,00	683,00	705,00	590,00
3	689,87	657,59	746,40	653,80	675,00	698,00	740,00	604,00
4	713,57	653,90	768,61	684,87	714,00	719,00	800,00	634,00
5	738,42	666,23	790,03	715,23	742,00	753,00	825,00	659,00
6	764,52	687,16	811,04	746,84	761,00	801,00	833,00	685,00
7	789,52	711,11	830,42	777,00	798,00	841,00	852,00	741,00

8	814,81	737,42	849,92	807,15	826,00	858,00	874,00	769,00
9	839,58	764,16	868,94	836,54	858,00	858,00	903,00	779,00
10	863,77	790,75	887,38	865,29	887,00	874,00	918,00	816,00
11	887,34	816,87	905,20	893,40	904,00	891,00	922,00	842,00
12	909,33	841,27	921,71	919,72	933,00	893,00	942,00	882,00
13	931,64	866,02	938,33	946,56	952,00	904,00	963,00	900,00
14	953,31	889,99	954,36	972,74	965,00	910,00	979,00	913,00
15	974,34	913,20	969,80	998,28	981,00	920,00	994,00	930,00
16	994,77	935,65	984,69	1023,19	1008,00	937,00	1022,00	955,00
17	1014,59	957,38	999,05	1047,47	1026,00	961,00	1035,00	976,00
18	1033,84	978,40	1012,91	1071,14	1040,00	989,00	1056,00	978,00
19	1052,54	998,74	1026,29	1094,22	1056,00	1006,00	1070,00	997,00
20	1070,70	1018,42	1039,22	1116,72	1067,00	1022,00	1087,00	998,00
21	1088,35	1037,47	1051,72	1138,65	1082,00	1036,00	1099,00	1013,00
22	1105,50	1055,91	1063,81	1160,03	1096,00	1064,00	1117,00	1020,00
23	1122,16	1073,77	1075,52	1180,87	1112,00	1072,00	1125,00	1039,00
24	1138,37	1091,05	1086,86	1201,17	1130,00	1097,00	1140,00	1057,00
25	1154,12	1107,78	1097,85	1220,97	1138,00	1107,00	1148,00	1069,00
26	1169,44	1123,99	1108,50	1240,26	1147,00	1118,00	1159,00	1068,00
27	1184,34	1139,67	1118,83	1259,06	1168,00	1145,00	1173,00	1093,00
28	1198,83	1154,87	1128,85	1277,38	1183,00	1155,00	1184,00	1119,00
29	1212,92	1169,58	1138,58	1295,23	1203,00	1163,00	1208,00	1134,00
30	1226,63	1183,82	1148,02	1312,63	1206,00	1164,00	1218,00	1130,00
31	1239,97	1197,62	1157,18	1329,59	1214,00	1219,00	1219,00	1130,00
32	1250,78	1208,75	1164,60	1343,36	1233,00	1232,00	1231,00	1154,00
33	1263,46	1221,75	1173,28	1359,53	1242,00	1245,00	1251,00	1153,00
34	1275,80	1234,35	1181,72	1375,29	1264,00	1265,00	1251,00	1194,00
35	1287,80	1246,56	1189,91	1390,65	1281,00	1287,00	1281,00	1193,00
36	1299,48	1258,38	1197,87	1405,61	1298,00	1301,00	1299,00	1209,00
37	1310,84	1269,82	1205,59	1420,19	1309,00	1292,00	1310,00	1223,00
38	1321,89	1280,91	1213,10	1434,39	1325,00	1315,00	1332,00	1234,00
39	1332,64	1291,66	1220,40	1448,23	1336,00	1315,00	1341,00	1249,00
40	1343,10	1302,06	1227,48	1461,72	1347,00	1332,00	1364,00	1249,00
41	1353,28	1312,14	1234,37	1474,85	1352,00	1335,00	1358,00	1263,00
42	1363,18	1321,91	1241,05	1487,65	1368,00	1370,00	1380,00	1266,00
43	1372,82	1331,37	1247,55	1500,12	1381,00	1381,00	1396,00	1276,00
44	1382,19	1340,53	1253,86	1512,26	1384,00	1395,00	1378,00	1302,00
45	1391,30	1349,41	1259,99	1524,09	1392,00	1412,00	1385,00	1301,00
46	1400,17	1358,01	1265,95	1535,61	1406,00	1418,00	1397,00	1319,00
47	1408,80	1366,35	1271,73	1546,84	1413,00	1429,00	1408,00	1323,00
48	1417,20	1374,42	1277,36	1557,77	1418,00	1440,00	1409,00	1334,00
49	1425,36	1382,25	1282,82	1568,42	1427,00	1449,00	1424,00	1335,00
50	1433,30	1389,83	1288,13	1578,79	1441,00	1450,00	1438,00	1352,00
51	1441,03	1397,18	1293,28	1588,90	1447,00	1446,00	1440,00	1363,00
52	1448,55	1404,30	1298,29	1598,74	1447,00	1458,00	1442,00	1355,00

53	1455,86	1411,20	1303,16	1608,32	1457,00	1465,00	1457,00	1369,00
54	1462,97	1417,88	1307,88	1617,65	1463,00	1479,00	1467,00	1372,00
55	1469,89	1424,36	1312,48	1626,74	1476,00	1484,00	1470,00	1409,00
56	1476,62	1430,64	1316,94	1635,59	1480,00	1498,00	1471,00	1410,00
57	1483,17	1436,72	1321,28	1644,21	1456,00	1491,00	1452,00	1395,00
58	1489,54	1442,62	1325,49	1652,60	1421,00	1444,00	1423,00	1360,00
59	1468,42	1415,88	1269,20	1657,17	1395,00	1380,00	1409,00	1331,00
60	1411,47	974,91	1296,00	1611,13	1363,00	1350,00	1386,00	1298,00
61	1411,47	974,91	1296,00	1611,13	1343,00	1351,00	1373,00	1268,00
62	1372,45	941,28	1266,67	1562,29	1319,00	1319,00	1336,00	1263,00
63	1330,58	927,78	1222,05	1516,56	1301,00	1322,00	1325,00	1233,00
64	1293,64	918,82	1183,41	1474,91	1281,00	1314,00	1298,00	1215,00
65	1261,95	911,98	1152,29	1437,19	1259,00	1284,00	1278,00	1202,00
66	1233,68	905,95	1126,16	1402,08	1244,00	1269,00	1261,00	1189,00
67	1208,15	900,23	1104,15	1369,02	1228,00	1272,00	1242,00	1169,00
68	1185,14	894,72	1085,71	1338,05	1214,00	1254,00	1237,00	1152,00
69	1164,43	889,41	1070,24	1309,28	1206,00	1244,00	1234,00	1145,00
70	1145,79	884,32	1057,08	1282,75	1186,00	1242,00	1219,00	1116,00
71	1128,97	879,48	1045,69	1258,44	1172,00	1235,00	1198,00	1107,00
72	1113,74	874,93	1035,65	1236,23	1165,00	1189,00	1214,00	1097,00
73	1099,94	870,66	1026,67	1216,01	1152,00	1149,00	1202,00	1089,00
74	1087,38	866,69	1018,53	1197,63	1147,00	1142,00	1199,00	1083,00
75	1075,96	863,00	1011,09	1180,95	1141,00	1153,00	1193,00	1073,00
76	1065,56	859,58	1004,26	1165,81	1136,00	1135,00	1205,00	1062,00
77	1056,06	856,42	997,96	1152,08	1127,00	1145,00	1176,00	1067,00
78	1047,41	853,49	992,14	1139,62	1113,00	1154,00	1159,00	1050,00
79	1039,50	850,78	986,76	1128,32	1105,00	1139,00	1140,00	1060,00
80	1032,29	848,28	981,78	1118,07	1091,00	1123,00	1123,00	1050,00
81	1025,70	845,95	977,18	1108,76	1074,00	1096,00	1104,00	1036,00
82	1019,68	843,79	972,94	1100,31	1053,00	1078,00	1080,00	1017,00
83	1014,18	841,79	969,01	1092,63	1033,00	1043,00	1091,00	977,00
84	1009,15	839,93	965,39	1085,65	1005,00	1042,00	1061,00	944,00
85	1004,56	838,19	962,06	1079,31	985,00	1037,00	1057,00	907,00
86	1000,36	836,57	958,98	1073,55	969,00	1025,00	1042,00	888,00
87	996,53	835,06	956,14	1068,30	958,00	1026,00	1034,00	867,00
88	993,02	833,65	953,53	1063,53	943,00	1035,00	1017,00	847,00

