



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Análisis del sistema de ventilación de una sala de  
máquinas mediante técnicas de Dinámica de Fluidos  
Computacional

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

AUTOR/A: Tena Salazar, Agustín

Tutor/a: Manzano Juarez, Juan

Cotutor/a: García-Serra García, Jorge

Cotutor/a: Balbastre Peralta, Iban

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIERÍA  
INDUSTRIAL VALENCIA

**TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

# **ANÁLISIS DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN DE UNA SALA DE MÁQUINAS MEDIANTE TÉCNICAS DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL**

AUTOR: Tena Salazar, Agustín  
TUTOR: Manzano Juarez, Juan  
COTUTOR: Balbastre Peralta, Iban  
COTUTOR: García-Serra García, Jorge

**Curso Académico: 2021-22**



## Resumen

En el Centro Nacional de Tecnología de Regadíos (San Fernando de Henares, Madrid) se ha diseñado una instalación para el ensayo de ventosas en condiciones de admisión y expulsión.

Esta instalación requiere un sistema de producción de aire, alojado en una sala de máquinas independiente, compuesto por cuatro máquinas de desplazamiento positivo de diferente potencia, depósitos presurizados y las conducciones y equipamiento de regulación necesario. Las condiciones de ventilación deben estar muy controladas, puesto que de su buen diseño dependerán los flujos de entrada de aire al sistema de ensayo y una refrigeración correcta de los equipos instalados.

La sala de maquinaria, objeto de estudio, tiene unas dimensiones de 158 m<sup>2</sup> en planta y una altura útil de 5 m. Por otro lado, se estudiará el funcionamiento simultáneo de tres soplantes de gran volumen (máxima extracción de aire por máquina de 3500 m<sup>3</sup>/h) más una cuarta máquina de menor capacidad (990 m<sup>3</sup>/h). En la ventilación ha de considerarse la capacidad de succión de aire de cada una de las máquinas a instalar y el mantenimiento de las condiciones térmicas en el local.

En el presente trabajo, se pretende analizar y proponer modificaciones, si fuese necesario, al sistema de ventilación previsto. Para ello se utilizarán técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics – CFD)

**Palabras clave:** Ventilación, CFD, sala de máquinas.



## Resum

En el Centre Nacional de Tecnologia de Regadius (Sant Ferran d'Henares, Madrid) s'ha dissenyat una instal·lació per a l'assaig de ventoses en condicions d'admissió i expulsió.

Aquesta instal·lació requereix un sistema de producció d'aire, allotjat en una sala de màquines independent, compost per quatre màquines de desplaçament positiu de diferent potència, depòsits pressuritzats i les conduccions i equipament de regulació necessari. Les condicions de ventilació han d'estar molt controlades, ja que del seu bon disseny dependran els fluxos d'entrada d'aire al sistema d'assaig i una refrigeració correcta dels equips instal·lats.

La sala de maquinària, objecte d'estudi, té unes dimensions de 158 m<sup>2</sup> en planta i una altura útil de 5 m. D'altra banda, s'estudiarà el funcionament simultani de tres bufadors de gran volum (màxima extracció d'aire per màquina de 3500 m<sup>3</sup>/h) més una quarta màquina de menor capacitat (990 m<sup>3</sup>/h). En la ventilació ha de considerar-se la capacitat de succió d'aire de cadascuna de les màquines a instal·lar i el manteniment de les condicions tèrmiques en el local.

En el present treball, es pretén analitzar i proposar modificacions, si fora necessari, al sistema de ventilació previst. Per a això s'utilitzaran tècniques de Dinàmica de Fluids Computacional (Computational Fluid Dynamics – CFD)

**Paraules clau:** Ventilació, CFD, sala de màquines.

## Abstract

At the National Center for Irrigation Technology (San Fernando de Henares, Madrid) a facility has been designed for testing suction cups under admission and expulsion conditions.

This installation requires an air production system, housed in an independent machine room, made up of four positive displacement machines of different power, pressurized tanks and the necessary piping and regulation equipment. The ventilation conditions must be very controlled, since its good design will result in the inflow of air into the test system and proper cooling of the installed equipment.

The machinery room, object of study, has dimensions of 158 m<sup>2</sup> in plan and a useful height of 5 m. On the other hand, the simultaneous operation of three large-volume blowers (maximum air extraction per machine of 3,500 m<sup>3</sup>/h) plus a fourth machine with a smaller capacity (990 m<sup>3</sup>/h) will be studied. In ventilation, the air suction capacity of each of the machines to be installed and the maintenance of the thermal conditions in the premises must be preferred.

In the present work, it is intended to analyze and propose modifications, if necessary, to the planned ventilation system. For this, Computational Fluid Dynamics (CFD) techniques will be used (Computational Fluid Dynamics – CFD)

**Key words:** Ventilation, CFD, machine room.



# MEMORIA

## ÍNDICE DE LA MEMORIA

1. Introducción.....	1
1.1    Sistemas de ventilación industrial.....	1
1.2    Definición del problema.....	2
1.3    Objetivos del trabajo.....	2
2. Introducción a las técnicas CFD.....	4
2.1    ¿Qué es la mecánica de fluidos?.....	4
2.2    Las técnicas CFD.....	5
2.2.1    Aplicaciones de los CFD.....	5
2.2.2    Ventajas de los CFD.....	5
2.2.3    Limitaciones de los CFD.....	6
2.3    Conceptos básicos y funcionamiento de los CFD.....	7
2.4    Aplicación de los CFD en sistemas de ventilación.....	8
2.5    Estructura del análisis.....	9
3. Desarrollo de la geometría.....	11
3.1    Consideraciones relativas a la geometría.....	11
3.2    Geometría a representar.....	11
3.2.1    Habitación con techo a dos aguas.....	13
3.2.2    Calderines.....	15
3.2.3    Soplantes.....	15
3.2.4    Filtros de admisión y de impulsión.....	16
3.3    Ensamblaje.....	17
4. Software de análisis.....	19
5. Mallado de la geometría.....	21
5.1    Calidad de la malla.....	22
5.2    Estudio de la malla.....	23
5.2.1    Parámetros generales de la malla.....	23
5.2.2    Refinamiento de la malla.....	25
5.2.3    Análisis de la calidad de la malla.....	27
5.2.4    Resultado final de la malla.....	28
5.3    Nombramiento de superficies.....	30
6. Escenarios de modelización.....	32
7. Definición de los parámetros de análisis.....	35
7.1    Configuración de la simulación numérica.....	35
7.2    Modelos de cálculo.....	36
7.3    Condiciones de contorno.....	37
7.3.1    Definición de materiales.....	38
7.3.2    Definición de fronteras.....	38
7.4    Especificación de métodos de cálculo.....	40
7.5    Secuencia de simulación.....	41
7.5.1    Conceptos básicos.....	41
7.5.2    Monitorización de residuos.....	42
7.5.3    Inicialización y simulación.....	42

8. Visualización y análisis de resultados (post-procesado).....	44
8.1    Introducción.....	44
8.2    Análisis de la solución.....	44
8.2.1    Movimiento del aire.....	45
8.2.2    Presiones en la sala de máquinas.....	51
8.2.3    Temperaturas.....	52
9. Recomendaciones y modificaciones.....	55
9.1    Normativa ventilación industrial.....	55
9.2    Refrigeración de las máquinas.....	56
9.3    Alimentación de las soplantes.....	57
9.3.1    Fases iniciales.....	57
9.3.2    Modificaciones.....	58
9.3.3    Propuesta final.....	61
10. Conclusiones.....	62
10.1    Los CFD en sistemas de ventilación.....	62
10.2    Conclusiones del autor.....	62
11. Bibliografía.....	64

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.-	Ejemplo dominio discretizado en pequeños volúmenes.....	7
Figura 2.2.-	Flujograma CFD.....	10
Figura 3.1.-	Distribución definitiva de la habitación.....	12
Figura 3.2.-	Exterior del modelo de la habitación con techo a dos aguas.....	13
Figura 3.3.-	Perfil real previsto para las vigas.....	14
Figura 3.4.-	Interior del modelo de la habitación con techo a dos aguas.....	14
Figura 3.5.-	Forma real deposito presurizado.....	15
Figura 3.6.-	Calderín grande.....	15
Figura 3.7.-	Calderín pequeño.....	15
Figura 3.8.-	Soplante pequeña.....	16
Figura 3.9.-	Soplante grande.....	16
Figura 3.10.-	Filtros de admisión.....	16
Figura 3.11.-	Filtros de impulsión: izquierda (pequeño) y derecha (grande).....	17
Figura 3.12.-	Distribución definitiva realizada en SolidWorks.....	17
Figura 3.13.-	Ensamblaje final.....	18
Figura 4.1.-	Interfaz de Workbench.....	19
Figura 4.2.-	Interior fluido de la habitación.....	20
Figura 5.1.-	Comparación malla estructurada y no estructurada.....	23
Figura 5.2.-	Malla con parámetros por defecto.....	24
Figura 5.3.-	Nodos y elementos con mallado por defecto.....	24
Figura 5.4.-	Detalles generales de la malla.....	25
Figura 5.5.-	Sistemas de coordenadas dispuestos en la geometría.....	25
Figura 5.6.-	Ejemplo mallado Sphere of influence en conducto de ventilación de entrada....	26
Figura 5.7.-	Ejemplo mallado Number of divisions cerca de las vigas del techo.....	26
Figura 5.8.-	Diagrama de barras del grado de asimetría del mallado (Skewness).....	27
Figura 5.9.-	Diagrama de barras del ratio de aspecto del mallado.....	27
Figura 5.10.-	Diagrama de barras Element Quality.....	28
Figura 5.11.-	Diagrama de barras Orthogonal Quality.....	28

Figura 5.12.-	Resultado del mallado final para la simulación.....	29
Figura 5.13.-	Detalle de la malla exterior cerca de las estructuras de la edificación.....	29
Figura 5.14.-	Detalle del mallado final realizado en los filtros de impulsión.....	30
Figura 5.15.-	Nodos y elementos con el mallado final.....	30
Figura 5.16.-	Name Selections.....	31
Figura 5.17.-	Ejemplo Name Selections paredes de las soplantes.....	31
Figura 6.1.-	Grafica funcionamiento del ventilador TBD 15/15.....	34
Figura 7.1.-	Propiedades del fluido a simular.....	38
Figura 7.2.-	Boundary Conditions.....	38
Figura 7.3.-	Ejemplo de condición de contorno Mass-flow-outlet.....	40
Figura 7.4.-	Métodos de cálculo.....	41
Figura 7.5.-	Factores de relajación.....	41
Figura 7.6.-	Criterio de convergencia de los residuos.....	42
Figura 7.7.-	Valores de inicialización.....	43
Figura 7.8.-	Ejemplo de evolución de los residuos modelo Standard.....	43
Figura 7.9.-	Valores de los residuos después de 3500 iteraciones modelo Standard.....	43
Figura 8.1.-	Movimiento general próximo a las paredes, techo y objetos de la habitación.....	45
Figura 8.2.-	Mapa de velocidad en la entrada de ventilación.....	45
Figura 8.3.-	Mapa de velocidad en la entrada de las soplantes (Vectores).....	46
Figura 8.4.-	Mapa de velocidad en la entrada de las soplantes (Contornos).....	46
Figura 8.5.-	Mapas de velocidad en planos perpendiculares a los pórticos (Vectores).....	47
Figura 8.6.-	Mapas de velocidad en planos perpendiculares a los pórticos (Contornos).....	48
Figura 8.7.-	Vista de planta de la sala de máquinas con direcciones de los flujos principales de aire.....	48
Figura 8.8.-	Mapas de velocidad en planos paralelos al pórtico.....	49
Figura 8.9.-	Pathlines 1.....	50
Figura 8.10.-	Pathlines 2.....	50
Figura 8.11.-	Mapa general de presiones relativas totales.....	51
Figura 8.12.-	Mapa de presiones relativas totales en los filtros de admisión.....	52
Figura 8.13.-	Mapa de presiones relativas totales en la ventilación de salida.....	52
Figura 8.14.-	Mapa general de temperaturas en la sala de máquinas.....	53



Figura 8.15.-	Mapa de temperaturas en las soplantes.....	53
Figura 9.1.-	Diseños iniciales del sistema de ventilación.....	58
Figura 9.2.-	Entradas y salidas de aire por los conductos de ventilación.....	59
Figura 9.3.-	Recirculaciones entre pórticos (Pathlines 3).....	60

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.-	Modelos de turbulencia y su aplicación en mecánica de fluidos (Ref. [16]).....	8
Tabla 2.2.-	Comparación ente códigos comerciales de CFD (Ref. [16]).....	9
Tabla 6.1.-	Caudal de aire absorbido por las soplantes en modo impulsión a diferentes presiones.....	32
Tabla 9.1.-	Condiciones de funcionamiento ventilador TBD 15/15.....	56

## 1. INTRODUCCIÓN

El propósito que perseguimos en este trabajo y vemos plasmado en la siguiente memoria es el de, dar a entender la importancia de establecer una ventilación eficiente y adecuada, sobre todo en el caso de instalaciones y locales industriales, y explicar la forma de verificar y cuantificar estos sistemas de ventilación mediante la ayuda de herramientas de cálculo computacional.

Primero de nada resulta interesante conocer una serie de conceptos:

- Denominamos ventilación “al acto de mover o dirigir el movimiento del aire para un determinado propósito”.
- Definimos sistema de ventilación como “el método y el conjunto de elementos empleados para ventilar un recinto cerrado”.

Disponer de un sistema de ventilación eficiente, mediante extracción o inyección de aire, es fundamental en el interior de cualquier tipo de edificación, pero especialmente para aquellas naves industriales que cuenten con maquinaria que requieran unas condiciones óptimas para garantizar su funcionamiento y su seguridad.

Los sistemas de ventilación pueden ser clasificados según la función que desarrolle el local donde este instalado, pudiendo ser:

- Domésticos: cuando se refieren a la ventilación de las viviendas, pisos o casas unifamiliares.
- Terciarios o comerciales: cuando se refieren a locales de ocupación profesional como oficinas, colegios, comercios, etc.
- Industriales: cuando nos referimos a ventilación de fábricas y naves industriales en las que se llevan a cabo procesos de producción o de investigación.

### 1.1 Sistemas de ventilación industrial

En este trabajo nos encontramos ante un caso de ventilación industrial. Las funciones principales de la ventilación industrial es entre otras las de renovar el aire, mejorar la higrometría y la de suprimir la presencia de calor, de humedad, de humo, de polvo, olores, gases y en general de determinadas áreas de patógenos que pudieran penetrar vía aire y llegar a ser perjudiciales en el ambiente industrial, pudiendo ser causantes de golpes de calor, intoxicaciones e incluso pudiendo llegar a ser causantes de enfermedades crónicas afectando a la salud de los empleados. Un buen sistema de ventilación afectara a las condiciones de confort de forma positiva, disminuyendo la temperatura y humedad del interior de la nave, lo que conllevara una mayor comodidad de los trabajadores, pudiendo así mejorar el rendimiento en el trabajo.

También es esencial en sala de máquinas y naves con maquinaria pesada que las instalaciones dispongan de la necesaria ventilación para poder refrigerar la maquinaria dispuesta, ya que la gran mayoría de maquinaria necesita de refrigeración para su correcto funcionamiento, incluso algunas disponen de refrigeración interior la cual, demanda de aire constantemente a su alrededor.

De forma convencional e imprescindible es necesario realizar un cálculo previo de ventilación y extracción de aire. Este estudio debe responder a unas exigencias, analizar determinados factores y contrastar ciertos datos esenciales si queremos que realmente sean fiables para garantizar el bienestar ambiental y el cumplimiento de la normativa vigente. Como son las dimensiones del recinto, el tipo de actividad que se realiza, la maquinaria instalada y las exigencias normativas que regulan las condiciones laborales.

A partir de estos métodos se propuso inicialmente un sistema de ventilación (vea el Anejo 01 y 02), el cual mejoraremos junto al desarrollo de este trabajo.

## 1.2 Definición del problema

No obstante, el caso en el que se centra este trabajo es todavía un poco más exigente. En el centro Nacional de Tecnología de Regadíos (San Fernando de Henares, Madrid) se ha diseñado una sala para el ensayo de ventosas en condiciones de admisión y expulsión, esta requiere de un sistema de producción de aire, la cual alojamos en una sala de máquinas conjunta donde encontraremos la maquinaria y equipamiento necesarios para la regulación de este sistema de aire. Entre esta maquinaria encontraremos diversas máquinas de desplazamiento positivo de diferente potencia denominados sopladores industriales (compresores de aire industriales de lóbulos rotativos), cuya función es la de alimentar de aire la sala adyacente donde se encontrará el sistema de ensayos de ventosas de aire (Centro de investigación definido con mayor detalle en el Anejo 01).

La demanda de aire de estas máquinas, y en consecuencia del sistema de ventilación, será mucho mayor que la demandada en otro tipo de sala de máquinas, ya que el buen desempeño de la sala de ensayos dependerá del flujo de entrada de aire a los conductos del sistema de ensayos, lo que dependerá de la absorción que realizaran las soplantes del propio aire de la sala de máquinas.

El sistema de ventilación industrial será del tipo ventilación general forzada, mediante el uso de un único extractor equipado con ventilador centrífugo (para mayor detalle de la ventilación original vea Anejo 02). En el momento de redacción de este documento la nave de la sala de ensayos está siendo construida, replanteándose algunas de las soluciones constructivas y configuración de la instalación inicial.

## 1.3 Objetivos del trabajo

En resumen, el propósito del presente trabajo es la creación de un modelo de ventilación en CFD con el cuál poder analizar las diferentes condiciones de ventilación que se pueden dar en una sala de máquinas, las cuales serán muy diversas según el número de máquinas de producción de aire que se encuentren en funcionamiento, y de los puntos de ventilación de entrada y salida de aire que presente la habitación, proponiendo modificaciones, si fuese necesario, al sistema de ventilación previsto.

Pudiéndose verificar el buen funcionamiento del modelo mediante técnicas avanzadas de simulación. De forma que nos sea de utilidad para proponer regulaciones, ampliaciones y modificaciones futuras. Sirviéndonos, de igual forma, el modelo para la verificación de estas modificaciones y de otras condiciones de funcionamiento (ver Anejo 03).

Obviamente, estas condiciones de ventilación en la sala de máquinas deben ser lo más óptimas posibles, puesto que el banco de ensayos no funcionara correctamente y no dará resultados validos si no existe un flujo de entrada de aire al sistema de ensayo que ofrezca un caudal suficiente y adecuado para los ensayos, así como dar una refrigeración correcta a los diferentes equipos instalados.

## 2. INTRODUCCIÓN A LAS TÉCNICAS CFD

### 2.1 ¿Qué es la mecánica de fluidos?

La mecánica de fluidos es una rama de la física que encontramos comprendida dentro de la mecánica de medios continuos, la cual podemos definir como “el estudio del comportamiento de medios continuos fácilmente deformables (líquidos y gases) tanto en reposo (estática) como en movimiento (dinámica)”. La característica fundamental que define a los fluidos es su incapacidad para resistir esfuerzos cortantes (Lo que provoca que carezcan de forma definida). También estudia las interacciones entre el fluido y el contorno que lo limita.

Las aplicaciones de la Mecánica de Fluidos ha sido de utilidad desde hace miles de años (evacuación de humos en cavernas, colectores de agua, tornillo de Arquímedes, construcción de acueductos, primeros navegantes, etc.), pero en estas últimas décadas su uso se ha ido extendido en gran medida, pudiendo encontrar su utilidad en múltiples y diversos campos de la ingeniería civil, química y mecánica como, por ejemplo, en:

- Transporte de fluidos por conducciones.
- Maquinaria de trasiego de fluidos.
- Lubricación.
- Flujos en medios porosos.
- Aplicaciones fluviales y marítimas.
- Dispersión de contaminantes.
- Generación de energía.
- Procesos de transmisión de calor.
- Aerodinámica e ingeniería aeronáutica.
- Ingeniería naval, etc.

La mecánica de fluidos es un campo de investigación muy activo, típicamente muy complejo desde el punto de vista matemático. Esto es debido a que, las ecuaciones que describen el movimiento que hace un fluido, en este caso el aire, se basan fundamentalmente en las ecuaciones de cantidad de movimiento y de continuidad, a estas podríamos añadir la ecuación de la conservación de la energía formando así un sistema de ecuaciones diferenciales parciales no lineal. Por lo que, para la mayoría de los problemas que presenten cierta complejidad no será posible de resolver de forma analítica. Dejando de esta forma muchos problemas parcial o totalmente sin resolver, siendo la mejor forma de abordarlos mediante métodos numéricos, normalmente utilizando ordenadores.

Por otra parte, la validación de forma experimental no es una opción viable en este trabajo, existiendo dos posibilidades. Por un lado, la construcción de un modelo a escala que simulara el comportamiento esperado en la sala no sería viable, debido a que conseguir un comportamiento similar al trabajo que realizaran las soplantes sería excesivamente complicado, y tendríamos grandes errores en comparación a la realidad, los cuales no tendríamos con otras metodologías. Y por otro lado el método empírico en este caso, aplicando modificaciones en el laboratorio real mediante prueba y error, llegarían a suponer costes muy elevados, incluso llegar a ser peligroso para las personas cercanas al laboratorio si se producen malas refrigeraciones en los diferentes elementos de la sala de máquinas.

Por ello, en este momento es cuando resulta buena idea hacer uso de la mecánica de fluidos computacional, con la que poder realizar diversos análisis y simulaciones mediante cálculos computacionales, con lo que obtendremos simulaciones y predicciones del flujo muy aproximadas a la realidad, pudiendo así valorar la instalación propuesta y observar si serán necesarias ciertas modificaciones, de forma que haremos la instalación final con seguridad de que esta funcionara correctamente, habiendo modelado y simulado todas las opciones posible sin suponer esto un mayor coste económico.

## 2.2 Las técnicas CFD

Para llevar a cabo el estudio del comportamiento del aire en la habitación se hará uso de técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD*), área de conocimiento que nos permite realizar simulación numérica sobre flujos fluidos combinando la mecánica de fluidos con el cálculo numérico.

### 2.2.1 Aplicaciones de los CFD

La Dinámica de Fluidos Computacional es una herramienta que lleva en auge ascendente desde hace ya bastante tiempo, encontrándose ya ampliamente implementada y utilizada en cientos de diferentes sectores industriales ya que es de gran ayuda en la proyección, modelización y comprensión de múltiples sistemas en cientos de diferentes disciplinas, su uso puede abarcar desde la ayuda en la fabricación de una gran cantidad de productos y servicios, tales como aviones, automóviles, navíos, así como los más diversos tipos de equipamientos industriales, hasta el estudio ambiental en edificios tanto externo, como afecta el viento a un conjunto de rascacielos, como interno ayudando en el diseño de sistemas más eficaces de climatización en el interior de un vehículo.

Por ejemplo, con ayuda de las herramientas de CFD es posible:

- Simular difusión y convección de sustancias fluidas.
- Realizar la planificación y gestión de recursos hídricos
- Analizar la aerodinámica y aerotermodinámica de vehículos
- Evaluar la refrigeración de equipamientos como reactores nucleares, motores, etc.
- Hacer estudios de caracterización de polución ambiental, dispersión de gases, análisis y simulación de lanzamiento de polientas y contaminantes en corriente hídricas
- Simular hidrodinámica y hemodinámica
- Probar y desarrollar proyectos de sistemas propulsivos y de generación de energía en general

### 2.2.2 Ventajas de los CFD

La Mecánica de Fluidos Computacional puede ser utilizada desde la fase conceptual de un proyecto (el caso de este trabajo), ayudando a determinar la viabilidad y la mejor solución, hasta en la etapa de producción, permitiendo representar diversos escenarios, que pueden llevar a dar como resultado diversas modificaciones y mejoras sobre el producto.

La aplicación de los modelos CFD han pasado de ser empleados únicamente en curiosos problemas matemáticos a normalizarse y convertirse en una herramienta esencial en muchos campos de la dinámica de fluidos, centrando la atención de muchos investigadores internacionales, desde el auge de los computadores digitales, debido a las grandes ventajas que estos nos ofrecen:

- Notable ahorro económico y de tiempo, ya que se pueden reducir en gran medida el número de ensayos necesarios, pudiéndose realizar pequeñas modificaciones y cambios en el diseño y estudiar sus consecuencias sin necesidad de realizar estos cambios en la realidad. Pudiendo investigar diferentes sistemas fluidos de una forma económicamente más efectiva y más rápida que mediante procedimientos experimentales.
- Se permiten introducir condiciones que de forma experimental serían complicadas de alcanzar o imposibles, pudiendo someter los modelos a condiciones extremas de temperatura, presión, velocidad de fluido, etc. Pudiendo así modelar una realidad física que no podría ser medida y simulada de forma sencilla mediante experimentación.
- Para llegar a alcanzar resultados muy exactos, con alto nivel de detalle en problemas complejos será necesaria una potencia de cálculo computacional bastante elevada si se espera que el tiempo de cálculo no sea excesivamente elevado, lo que conlleva un gasto elevado en esta tecnología, no obstante, con ensayos experimentales el gasto en la mayoría de casos acabaría siendo más elevado, necesitando instalar más puntos de medidas para alcanzar un mayor grado de detalle y encontrando costes adicionales con cada variación que se haga al modelo.
- Los experimentos tradicionales únicamente permiten obtener datos en un número determinado de puntos del sistema, mientras que los CFD permiten analizar lo ocurrido en un gran número de puntos de la región de interés.

Como consecuencia de este importante crecimiento y desarrollo de la Dinámica de fluidos computacional y de todos los aspectos relacionado con la dinámica general de los fluidos, existe, cada vez más, una demanda de especialistas en la materia, capaces de aplicar y desarrollar los métodos CFD en compañías de ingeniería y organización de investigación. Existiendo unos gastos mundiales anuales en software y consultoría de decenas de miles de millones de dólares, y anuncios continuos de desarrollo de códigos y paquetes nuevos.

### 2.2.3 Limitaciones de los CFD

También encontraremos ciertas limitaciones/desventajas en el uso de las técnicas CFD:

- Modelos físicos: Las soluciones que obtendremos de los CFD serán tan precisas como los modelos físicos en los que se basan, y estas soluciones dependen de procesos reales de la vida real que se han comprobado (turbulencia, compresibilidad, química, flujo multifásico, etc.), por lo que simular condiciones ideales puede dar lugar a errores.
- Errores numéricos: Inevitablemente la resolución de las ecuaciones en computador introducirá errores numéricos, tanto por redondeo como por truncamiento, aunque en la mayoría de los casos serán pequeños y se reducen conforme el refinamiento de la malla es menor, existen y hemos de tenerlos en cuenta.
- Condiciones de contorno: Al igual que ocurre con los modelos físicos la precisión de una solución mediante CFD será únicamente buena si los son tanto las condiciones iniciales como las condiciones de contorno del modelo numérico.

Aunque no es exactamente parte de las técnicas CFD, debemos señalar que en la mayoría de los casos existirá una simplificación del modelo real a estudiar y supuestos que se hayan adoptado, esto no puede obviarse, y será necesario estudiar estas simplificaciones con tal que los resultados computacionales no disten de la realidad, mediante verificaciones del modelo computacional obtenido con la ayuda de modelos reales ensayados.



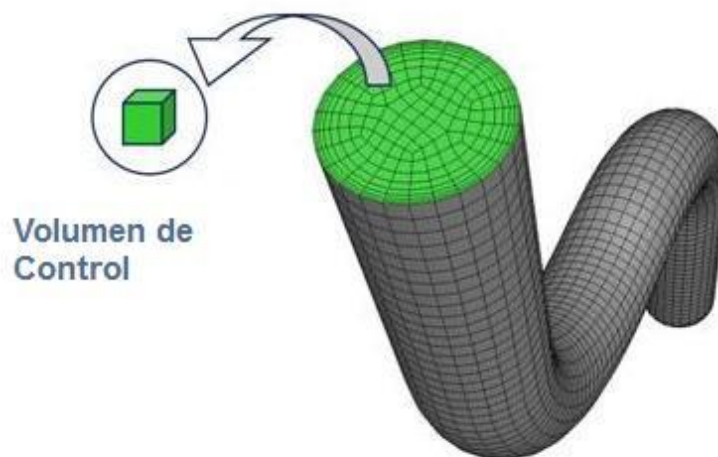
### 2.3 Conceptos básicos y funcionamiento de los CFD

Esta teoría de la Mecánica de Fluidos se ha aplicado en los denominados códigos CFD, mediante la solución de las ecuaciones fundamentales del campo de fluido junto a otras ecuaciones que describen el movimiento de un fluido mediante métodos numéricos. En otras palabras, CFD es la técnica de predecir el flujo de fluidos, su transferencia de masa y energía, sus reacciones químicas y los fenómenos relacionados mediante la resolución de las ecuaciones matemáticas que gobiernan estos procesos con la ayuda de un método numérico. La aplicación de estas leyes permite obtener las denominadas ecuaciones de Navier-Stokes, que de forma simplificada y para flujo compresible son:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0$$

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho \cdot (\vec{V} \cdot \nabla) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \nabla \cdot \tau_{ij}$$

Una vez planteadas y promediadas las ecuaciones, y tras fijar las condiciones de contorno, deben resolverse numéricamente. Hasta el momento se puede afirmar casi prácticamente que no existe solución analítica de estas ecuaciones, por lo que es necesario resolverla con algún método de discretización. Actualmente está generalizado el uso de las técnicas de resolución numérica mediante diferencias finitas y, sobre todo mediante, volúmenes finitos, la cual fue originalmente desarrollada como una formulación especial de las Diferencias Finitas, la cual actualmente está ampliamente extendida y aceptada en todo el ámbito del desarrollo de códigos comerciales.



*Figura 2.1.- Ejemplo dominio discretizado en pequeños volúmenes*

Por tanto, en nuestro programa CFD trabajaremos dividiendo la zona de interés a estudiar en muchos pequeños volúmenes discretos mediante el uso de una malla, y en cada uno de estos volúmenes calcular las propiedades físicas del fluido mediante la resolución de las ecuaciones fundamentales.

En la actualidad existen una gran cantidad de diferentes softwares que nos pueden ayudar a los profesionales de la ingeniería a realizar análisis de Fluidodinámica Computacional. Algunos son paquetes multifísicos, que combinan muchas propiedades: mecánicas, térmicas,

eléctricas, fluido-mecánicas, etc. En una única interfaz, permitiendo así desarrollar un proyecto más completo, desde el diseño hasta la simulación y análisis de resultados.

También existen herramientas más especializadas en la Mecánica de Fluidos Computacional, las cuales permiten realizar diferentes análisis CFD tales como turbulencia, transferencia de calor, aeroacústica, etc. Así como herramientas para modelar el flujo de fluidos. Algunos softwares del mercado que contienen programas de análisis CFD son: *Autodesk®*, *Ansys®*, *SolidWorks®*, etc.

### 2.4 Aplicación de los CFD en sistemas de ventilación

Varias y diferentes alternativas de diseño de sistemas de ventilación han sido investigadas y discutidas en anteriores estudios para la identificación de métodos y técnicas para la evaluación y predicción de la proporción y de los patrones de viento en diferentes edificaciones.

Entre estos métodos encontramos los modelos analíticos, los modelos empíricos y los modelos CFD. En comparación entre los diferentes métodos revisados los modelos CFD son los que predominan entre todos los estudios existentes, por la posibilidad de evaluar diferentes escenarios en un corto periodo de tiempo.

A pesar de encontrarnos ante un proyecto en fase de desarrollo, por lo que no será posible realizar una verificación del modelo hasta la construcción e instalación del centro de investigación. Nos respaldan los muchos estudios que implementan y verifican los métodos y herramientas utilizados para la evaluación de la ventilación en espacios interiores. Indicándonos los métodos que presentan menor coste, mayor efectividad, información y competencia para predecir patrones y relaciones de velocidad del aire en edificios.

Entre los diferentes modelos físicos a elegir en una simulación CFD, en los casos de los sistemas de ventilación, presenta enorme importancia la elección del modelo de turbulencia. En comparación con trabajos similares donde se haya puesto en práctica las técnicas CFD observamos:

Modelo de Turbulencia	Aplicación en Mecánica de Fluidos
k-ε standard	Principalmente aplicable a estudios sobre el flujo de aire en edificaciones.
RNG k-ε	Principalmente aplicable a la atenuación de los puntos de estancamiento.
k-ω	Principalmente aplicable para proporcionar pronósticos muy precisos al inicio y de la cantidad de separación del flujo.
The Reynolds Stress (RSM)	Principalmente aplicable para predecir el flujo de aire en áreas de estancamiento, fuertes gradientes de presión y flujo de separación.

**Tabla 2.1.- Modelos de turbulencia y su aplicación en mecánica de fluidos (Ref. [16])**

Los estudios anteriores concluyeron que los modelos de turbulencia que presentan estas ecuaciones indicadas en la Tabla 2.1, resultan las más relevantes para el análisis de los sistemas de ventilación, presentando el mejor rendimiento con relación a la precisión y el tiempo que se debe invertir en el cálculo.

Respecto a la elección de softwares de simulación comerciales con los que predecir el funcionamiento de la ventilación en edificios, encontramos la siguiente comparación entre los softwares cuyo uso se encuentra más extendido alrededor del mundo, y son considerados como las alternativas más adecuadas para establecer una simulación del sistema de ventilación mediante técnicas CFD:

<b>Software</b>	<b>Facilidad de uso</b>	<b>Modelos de turbulencia</b>	<b>Métodos de discretización</b>	<b>Tipo de malla</b>	<b>Observación</b>
CD-adapco Star-CCM+	Compromiso entre facilidad de uso y precisión	Standard RANS k-ε, Standard 2-layer RNG k-ε, k-ω, LES, Detached Eddy Simulation (DES)	Métodos de volumen finito (VF)	Estructurada y desestructurada malla con ceñido al cuerpo mediante coordenadas	El único con "fluido dinámico con interacción corporal" adecuado para aplicaciones marina
ANSYS FLUENT	Para ingenieros, necesita conocimiento básico sobre mecánica de fluidos	Standard RANS, k-ε, RNG k-ε, k-ω, LES	Métodos de volumen finito (VF)	Estructurada y desestructurada malla con ceñido al cuerpo mediante coordenadas	Código más ampliamente utilizado especialmente en aeroespacial e industria automotriz
PHOENICS	Fácil de usar para ciencias de la construcción	Standard RANS k-ε, Standard 2-layer RNG k-ε,	Métodos de volumen finito (VF)	Estructurada y desestructurada malla con ceñido al cuerpo mediante coordenadas	Ampliamente utilizado por arquitectos para análisis de zona de climatización
FloVent	Fácil de usar para aplicaciones arquitectónicas	Standard RANS k-ε	Métodos de volumen finito (VF)	Malla cartesiana estructurada	Ampliamente utilizado por arquitectos para estudios de ventilación en edificios
FloEFD	La más fácil de usa, diseño de edificios y aplicaciones mecánicas	Standard RANS k-ε	Métodos de volumen finito (VF)	Malla cartesiana estructurada capaz de crear células parciales alrededor de curvas	Utilizado para predicción de ventilación, capaz de predecir flujos de aire 3D, transferencia de calor y comodidad térmica

*Tabla 2.2.- Comparación entre códigos comerciales de CFD (Ref. [16])*

Sin embargo, la selección de estos códigos para un estudio dependerá de la complejidad y características del modelo, el área y el campo de estudio, el modelo de turbulencia deseado y sobre todo del conocimiento y la facilidad de uso del software para el usuario.

### 2.5 Estructura del análisis

A continuación, con el objetivo de llegar a alcanzar los resultados deseados, decidimos seguir el flujo de trabajo que muestro a continuación. Estos procesos los desarrollaremos más profundamente en los siguientes apartados. Con el objetivo general de implementar y validar los estudios en CFDs como un mecanismo competente y eficaz a la hora de simular el comportamiento de los fluidos en una sala de máquinas con un sistema de ventilación implementado.

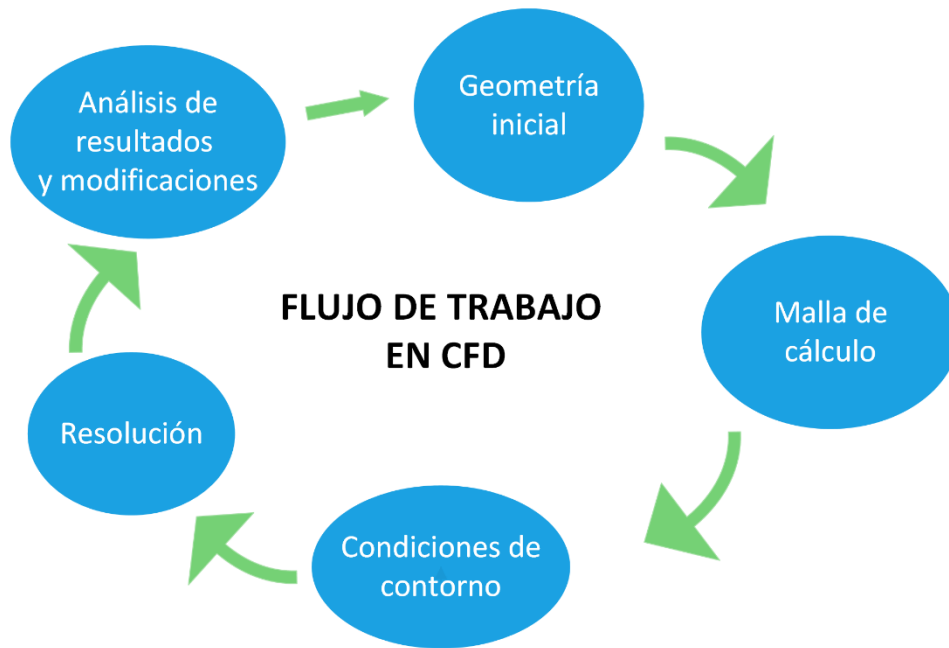


Figura 2.2.- Flujograma CFD

Ahora, la estructura que seguiremos y mostramos en el presente trabajo será:

En primer lugar, se mostrará cual ha sido el desarrollo de la geometría de partida y las modificaciones y simplificaciones realizadas para adecuar la misma al programa *Ansys*<sup>®</sup>.

Los pasos siguientes serán la explicación del software de análisis *Ansys Fluent*<sup>®</sup> y su campo de trabajo, y la realización del mallado del volumen de aire a estudiar.

A continuación, definiremos los parámetros del análisis (*Solver*), desde el tipo de modelo de turbulencia utilizado hasta los criterios de convergencia, e iniciaremos la simulación.

Por último, entraremos en el *post-procesado* donde realizaremos la visualización y el análisis de los resultados obtenidos de la simulación, y a partir de ellos extraeremos las conclusiones y recomendaciones finales.

## 3. DESARROLLO DE LA GEOMETRIA

### 3.1 Consideraciones relativas a la geometría

Para dar comienzo al estudio del problema en el software CFD, primero será necesario conocer la geometría real del sistema que se quiere estudiar, definiendo claramente sus partes, dimensiones y la importancia que tendrán cada una de ellas, con tal de conocer que partes del sistema llegarán a ser modelizadas, y cuáles de ellas no serán necesarias para alcanzar el objetivo que buscamos.

Una vez conozcamos la geometría del sistema que se pretende modelizar, se adoptaran ciertas simplificaciones en las geometrías que simplificaran el modelado, con tal de ayudar en la construcción y reducir considerablemente el mallado posterior, lo que conllevara en su defecto un ahorro del tiempo de cálculo.

Se debe realizar una simplificación que respete el diseño original del sistema eligiendo que partes del sistema son importantes o condicionantes para la solución del problema, pero eliminando el detalle excesivo, ya que este puede complicar e incluso imposibilitar el mallado en ciertos casos. Antes del mallado estudiaremos con detenimiento la geometría, prestando atención en las partes que más influirán en los resultados finales.

Muchos de los softwares de análisis de CFD suelen llevar implementado un programa de modelación, pero también es posible importar dicha geometría de otros programas de dibujo externos. En este caso se ha realizado una reproducción de la habitación a estudio y de varios de los elementos que encontraremos en ella mediante el software de dibujo 3D Inventor. Lo recomendable en estos casos es disponer de los planos originales, tanto de la habitación como de los elementos que se pretenden modelizar, de forma que consigamos una representación lo más cercana posible a la realidad, y así evitar posibles errores de medida.

Hay que añadir que, si existieran planos de simetría, siempre es recomendable reducir el volumen a estudiar a la mitad, representando una de las partes simétricas, y estudiar únicamente esa parte de la geometría, no siendo necesario representar el resto, no obstante, en nuestro caso no existe ningún tipo de simetría, y por lo tanto no es posible obtener ese ahorro de tiempo de cálculo.

### 3.2 Geometría a representar

Como hemos comentado anteriormente, el proyecto de construcción del laboratorio de ensayos de ventosas por aire divide el laboratorio en dos habitaciones diferentes, en una de ellas es donde encontraremos la zona de las ventosas que serán ensayadas, y en la otra encontraremos la sala de máquinas, en la cual realizaremos el estudio que se detalla en el presente trabajo.

Dicha sala de máquina, objeto de estudio, se trata de una habitación rectangular con unas dimensiones de 158 m<sup>2</sup> en planta y una altura útil de 5 m con un techo a dos aguas. En su interior se pretende colocar gran cantidad de diferentes elementos, los cuales tendrán como objetivo final alimentar o drenar el circuito de aire donde se encuentran dispuestas las ventosas de la sala de ensayos conjunta. Los objetos encargados de realizar estas funciones serán depósitos presurizados (calderines), soplantes, compresores y bombas de vacío, pero entre ellos también encontraremos otros elementos como filtros, cuadros eléctricos, silenciadores de la ventilación y la tubería que conecta todos estos elementos (Para más información ver Anejo 01).

Varios de estos elementos no serán necesarios de representar, debido a la poca/nula influencia que tendrán sobre el desarrollo de la ventilación y suponiendo un aumento del tiempo de cálculo y estudio considerable, siendo estos elementos aquellos que se encuentran alejados de los puntos de entrada y salida de masas de aire y del flujo principal de ventilación, y aquellos de dimensiones reducidas.

Por lo tanto, no serán representados:

- Compresor y bomba de vacío: Estos se encuentran en el centro de la habitación pegados al suelo, alejado de los puntos de entrada y salida de aire, y presentan dimensiones pequeñas por lo que no supondrán ningún gran impedimento al flujo de ventilación principal.
- Cuadros eléctricos: Pese a presentar unas dimensiones considerables, se encuentran pegados a la pared, sin sobresalir en exceso y lejos de los flujos principales y puntos de entrada y salida de aire.
- Tuberías: La mayoría de ellas saldrán de las máquinas y se dirigirán directamente a las paredes por donde seguirán su trayecto, por lo que tendrán poco efecto al igual que los cuadros eléctricos, y el resto de tuberías que se encuentren cerca de las máquinas son de dimensiones reducidas, sobre todo las que salen de las soplantes, por lo que supondrían un aumento de tiempo de cálculo muy elevado para el poco error que supondrá su no inclusión.

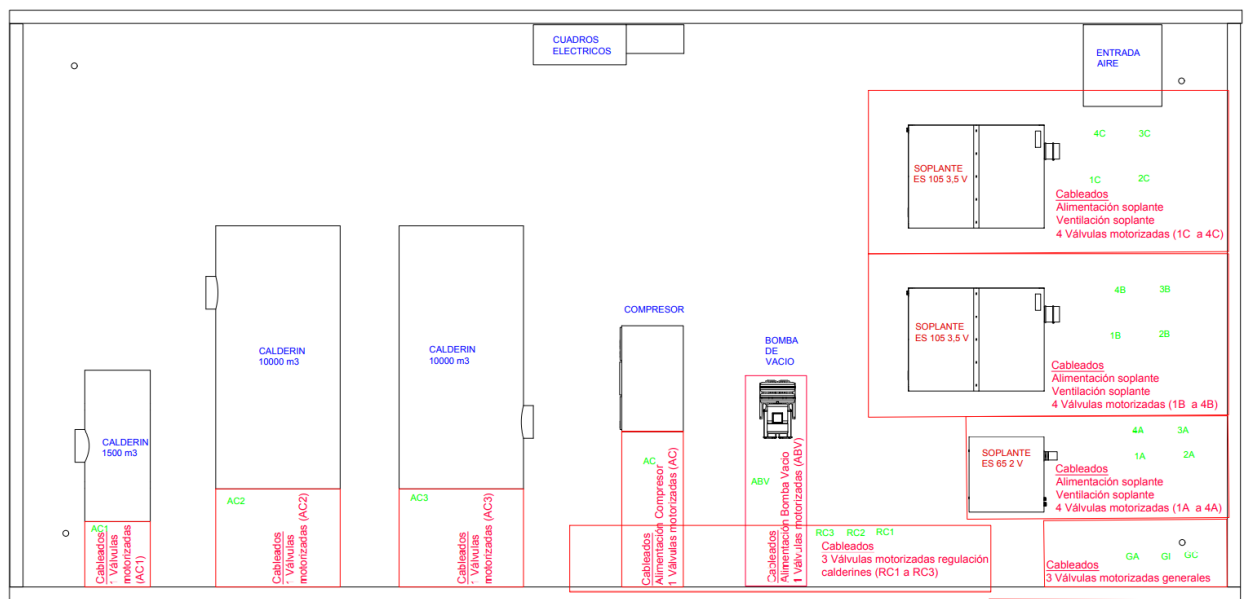


Figura 3.1.- Distribución definitiva de la habitación.

Entonces, con tal de representar la habitación de máquinas a estudiar modelaremos por separado los siguientes elementos:

- Habitación con techo a dos aguas.
- Calderines grande y pequeño.
- Soplantes grande y pequeño.
- Filtro de admisión.
- Filtro de impulsión grande y pequeño.

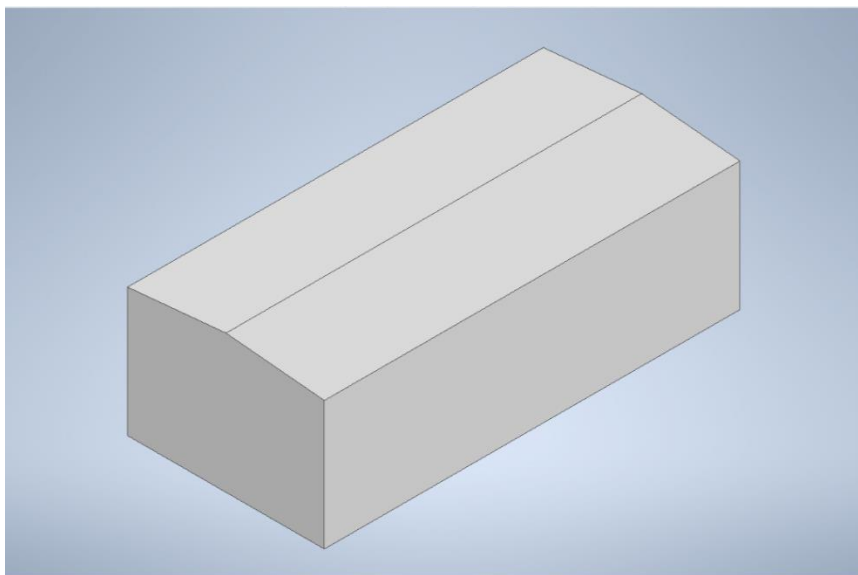
Como hemos explicado, estos no son todos los objetos que se encontraran dentro de la habitación real final, pero se trata de los elementos más grandes y que se encuentran más en medio del desarrollo de la ventilación debido a su disposición dentro de la sala y, por lo tanto, los que más afectaran al flujo de aire en el interior.

Para la modelización 3D de los diferentes elementos que comentamos a continuación hicimos uso de los softwares de diseño 3D *Inventor*<sup>®</sup> y *SolidWorks*<sup>®</sup>, los cuales presentan una combinación eficaz de funciones de diseño paramétrico, directo, de forma libre y basado en reglas que integran herramientas para el diseño de todo tipo de estructuras, y sobre todo permiten la transferencia posterior de la geometría CAD a programas de cálculo CFD.

En nuestro caso la modelización, construcción y ensamblaje se realizaron prácticamente en su totalidad en *Inventor*<sup>®</sup>, sin embargo, ciertas piezas se encontraban ya modeladas en *SolidWorks*<sup>®</sup>, por lo que aprovechando esto realizamos algunas pequeñas modificaciones en *SolidWorks* y después transferimos el modelo CAD a *Inventor* donde acabamos de retocar y donde hicimos el ensamblaje final.

### 3.2.1 Habitación con techo a dos aguas

El elemento habitación contendrá las paredes, suelo y techo del habitáculo, respetando las medidas reales que se indican en los planos. Por la parte exterior la habitación no tendrá ningún tipo de detalle, debido a que no tiene importancia en el estudio.



*Figura 3.2.- Exterior del modelo de la habitación con techo a dos aguas.*

En la parte interior sí que detallamos en mayor profundidad relieves importantes que presentará el interior de la habitación, primero se modelaran las columnas y vigas que forman los 5 pórticos que sustentan la estructura del edificio, sin embargo, en estas partes si se realizaran simplificaciones, eliminando el detalle de las vigas, las cuales en realidad presentan un perfil más complejo, serán simplificadas a un perfil rectangular.

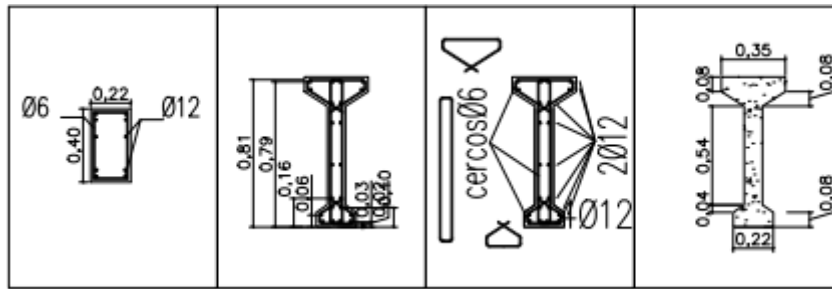


Figura 3.3.- Perfil real previsto para las vigas.

El sistema de ventilación de la habitación también será incluido en la modelización de la habitación, el sistema de ventilación que está previsto instalar se encuentra compuesto por dos entradas de aire del mismo tamaño dispuestas una encima de otra en una pared al lado de las soplantes y una salida de aire que encontraremos en otra pared cerca de los depósitos presurizados.

El flujo de aire que transcurre por dentro de los conductos de ventilación no es fruto de estudio en este trabajo, por esto modelaremos los conductos de forma maciza, las dos entradas de aire presentan únicamente un silenciador que se adentran en la sala, mientras que los conductos de la salida se encuentran compuestos por un silenciador, una conexión y la parte que envuelve al ventilador.

Este sistema de ventilación es del tipo de flujo simple el cual consiste en un extractor del aire de la sala que a través de conductos lo vierte a la calle, mientras que el aire de entrada entra a la habitación de forma natural, producido por una depresión en la sala a causa de la salida de aire.

Se respetarán las medidas exteriores de los silenciadores de las entradas y salidas de aire, así como los demás conductos que forman el sistema de ventilación, y al igual que la disposición que se prevé de estos, todos ellos serán representados como un prisma rectangular macizo.

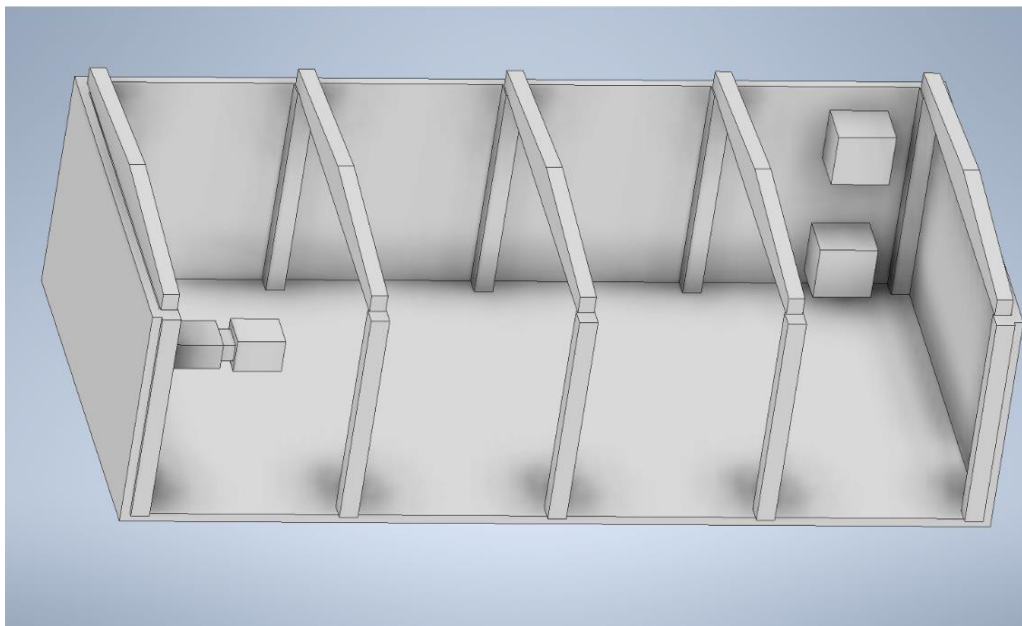


Figura 3.4.- Interior del modelo de la habitación con techo a dos aguas.



### 3.2.2 Calderines

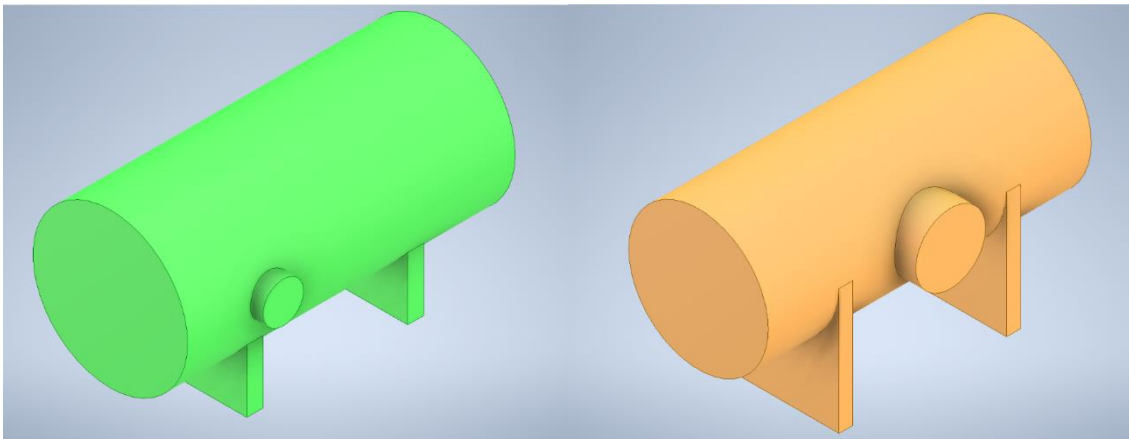
Los calderines, como podemos observar en la imagen de abajo presentan formas muy redondeadas, estas formas resultan muy problemáticas, a la hora de ser malladas, ya que necesitaran de mallas muy refinadas, con gran cantidad de celdas y espacios entre nudos muy pequeños para respetar su forma, esto da como resultado la necesidad de una mayor potencia de cálculo para conseguir un mallado adecuado, el cual no de problemas posteriores en la simulación.



*Figura 3.5.- Forma real deposito presurizado.*

Como hemos comentado anteriormente los calderines pueden llegar a resultar importantes en el flujo de aire de la sala, al encontrarse cerca del flujo principal de ventilación, pero pequeños cambios en su forma no producirán prácticamente cambios en la simulación, por ello se ha decidió modelar los depósitos presurizados eliminado el detalle excesivo y ciertas partes redondeadas.

Los dos tipos de calderines, tanto el pequeño con capacidad para 1500 L como el grande con capacidad para 10000 L serán representados, respetando el tamaño real de estos, pero simplificados como cilindros macizos, con dos patas rectangulares.



*Figura 3.6.- Calderín grande.*

*Figura 3.7.- Calderín pequeño.*

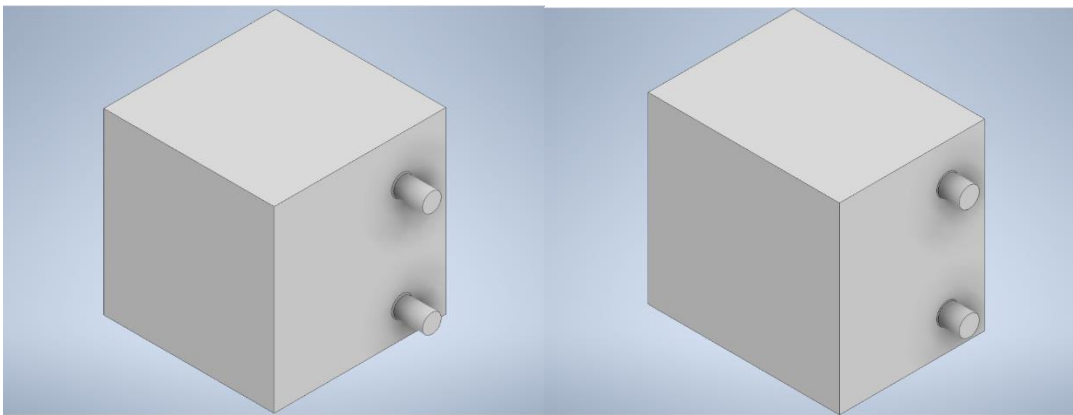
### 3.2.3 Soplantes

Tanto la soplante grande como la soplante pequeña posiblemente sean las partes para representar que presentan mayor complejidad de construcción. Las soplantes no contienen únicamente las máquinas de desplazamiento positivo, junto a estas se instalará un complejo sistema de refrigeración, formado por ventiladores, disipadores, conductos refrigerantes de aceite, etc. Todos estos elementos no se encontraran a simple vista en la sala de máquinas, sino

que serán instalados dentro cajas metálicas que ayudaran a disminuir el ruido y calor generado, así como proteger la maquinaria de polvo o fluidos que puedan dañarla.

Estas cajas contienen una gran cantidad de relieve, debido sobre todo al sistema de refrigeración, lo que supondría el diseño de las rejillas, conductos y piezas del interior de los soplantes (Para ver los planos reales de las soplantes ver el Anejo 01). Ahora bien, el gasto y emisión de aire que supone la refrigeración de estas máquinas no supondrá un gasto de aire relevante frente al gasto que realizan los soplantes alimentando la sala de ensayos, y el estudio de la refrigeración no entra dentro de este trabajo.

En consecuencia, serán modelados como prismas rectangulares macizos sin relieve ni detalle, del mismo tamaño que los reales y con dos cilindros en una de las caras siendo estos los conductos de admisión e impulsión de las soplantes, a partir de las cuales se conectarán con los filtros de admisión (conducto de arriba) y de impulsión (conducto de abajo).

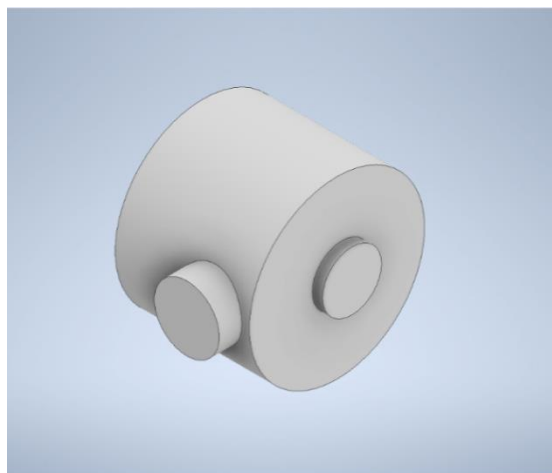


*Figura 3.8.- Soplante pequeña.*

*Figura 3.9.- Soplante grande.*

### 3.2.4 Filtros de admisión y de impulsión

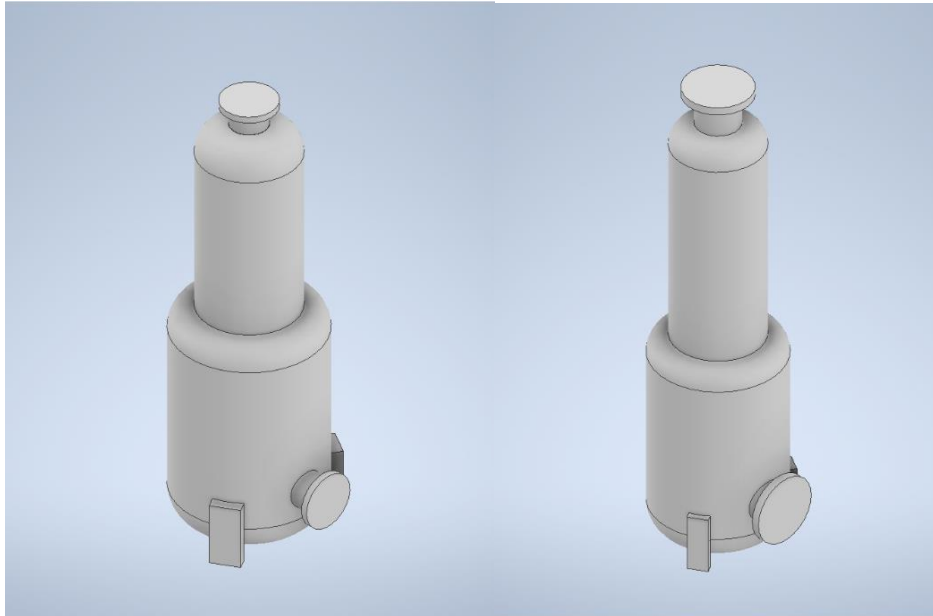
Por último, se modelarán los filtros de admisión e impulsión de ambos tipos de soplantes, los filtros de admisión son iguales para las máquinas de desplazamiento positivo grandes y pequeñas, estos son bastantes pequeños y no interfieren mucho en el flujo de aire, pero resulta importante modelarlos, ya que en ellos se establecerán los puntos de absorción de aire de los soplantes.



*Figura 3.10.- Filtros de admisión.*

El filtro de impulsión será diferente para cada tipo de soplante, estos también serán simplificados reduciendo algunos pequeños detalles exteriores, pero presentarán mayor detalle que los calderines, debido a su cercanía a los puntos de absorción de las soplantes

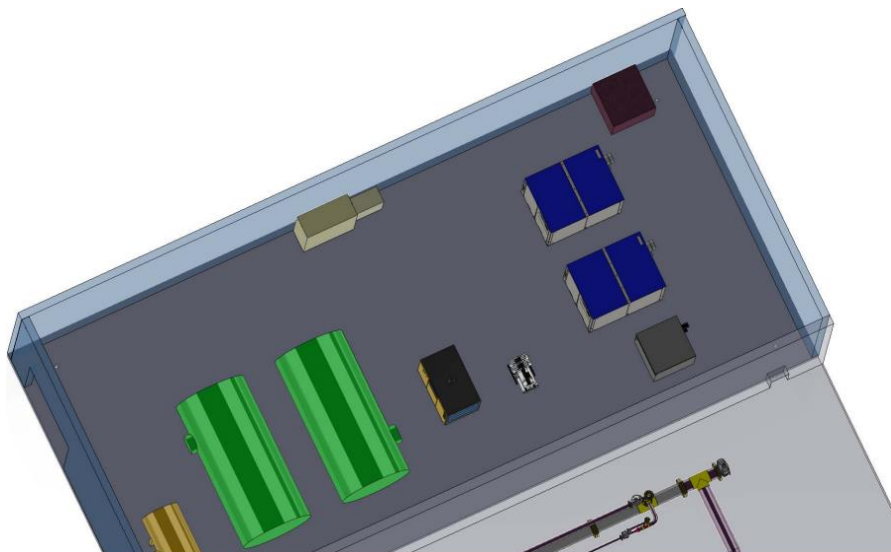
Ambos tipos de filtros se modelizarán sin huecos interiores, ya que el flujo interior a presión de estos y del resto de tuberías de la sala no resultarán de interés en la simulación para nuestro caso de estudio.



*Figura 3.11.- Filtros de impulsión: izquierda (pequeño) y derecha (grande).*

### 3.3 Ensamblaje

Como hemos observado en los planos anteriores, disponemos de la distribución definitiva que deberían tener los diferentes elementos en la sala. A excepción de los filtros de admisión e impulsión de las soplantes, donde todavía no existe una disposición totalmente exacta en planos que indique donde se localizaran estos dentro de la sala, ya que aun podrían sufrir de cierta variación.

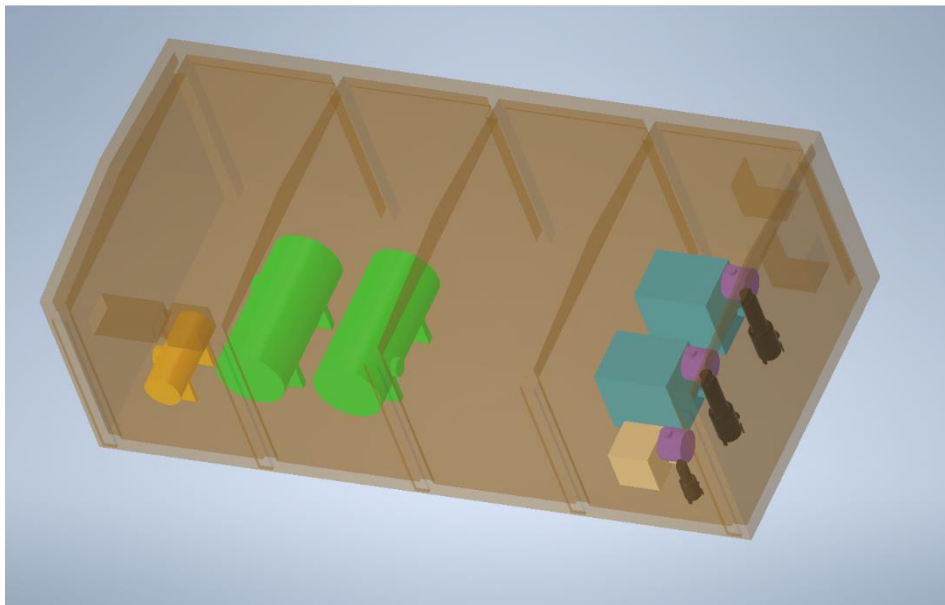


*Figura 3.12.- Distribución definitiva realizada en SolidWorks.*

Por ello, realizaremos el ensamblaje en *Inventor* a partir de las diferentes piezas que hemos modelado, y las colocaremos en la sala respetando la distribución que ha sido propuesta, conociendo exactamente su localización, mientras que para la colocación de los filtros de impulsión y admisión.

Primero, decidimos modelar una serie de tuberías simples, las cuales conectarán los filtros de impulsión a las soplantes, y de esta forma nos ayudaran a colocar los filtros de impulsión de una forma lo más similar posible a lo que será en la realidad, estas tuberías se retiraran a posterior ya que no serán fruto de estudio, pero nos serán de ayuda para conocer en qué posición y altura deberían colocarse los filtros.

Por otra parte, los filtros de admisión podrían ser conectadas a las soplantes a través de una tubería que llevara el filtro junto a una pared, ya que sería necesaria un apoyo para mantenerse a cierta altura, debido a que estos filtros no estarán a ras de suelo y se deberá soportar el peso de estos filtros (130Kg), no obstante se optó por la otra opción, la cual es colocarla junto a la soplante sin la necesidad de tubería, ya que esta situación sería más desfavorable al encontrarse el punto de salida de aire más cerca de las soplantes, lo que podría afectar más al flujo de aire.



*Figura 3.13.- Ensamblaje final.*

## 4. SOFTWARE DE ANÁLISIS

Una vez realizado el ensamblado en el programa de modelado *Inventor*, es momento de pasar al programa de cálculo CFD, en nuestro caso utilizamos un programa de *Ansys*, la plataforma *Workbench* en su versión 2021 R1. *Ansys* es el software líder de simulación multifísico para análisis y simulación por elementos finitos (FEA). Incluyendo las fases de pre-proceso, resolución y post-proceso en una única plataforma de trabajo. *Workbench* es la plataforma de software desde donde se crean los proyectos de análisis CAE en diferentes disciplinas, *Workbench* despliega gráficamente la simulación en ingeniería y se establecen las relaciones entre fenómenos físicos y sus módulos

Dentro de la interfaz de *Workbench* el procedimiento se ha dividido en tres fases, cada una de ellas realizadas en un módulo diferente, permitiéndonos así modificar cada etapa del proceso y que el programa actualice la nueva información en los módulos que la proceden. En la Figura 4.1 vemos un ejemplo de cómo están entrelazadas las distintas etapas.

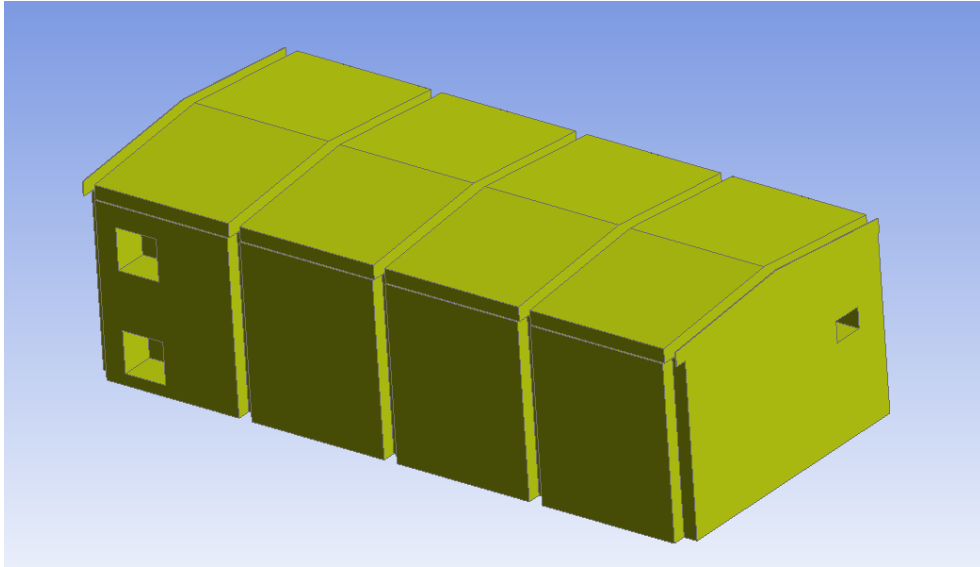


Figura 4.1.- Interfaz de *Workbench*.

Con tal de pasar la geometría final al programa de análisis CFD será necesario exportar el archivo del ensamblaje a otra extensión que sea aceptada por el software de CFD. En nuestro caso será exportado a formato ACIS (\*.sat) para poder importarlo al módulo de *Ansys* encargado de la geometría, en nuestro caso decidimos utilizar el *DesignModeler* (DM) y así poder seguir trabajando la geometría.

Una vez importada la geometría final a *Ansys*, es importante destacar, que será necesario indicar si la geometría se trata de un fluido o un sólido, en nuestro caso es aire por lo que será un fluido, y establecer el modelo computacional definiendo si se trata de flujo bidimensional o tridimensional, en nuestro caso realizaremos un análisis tridimensional, problema que conllevará una mayor complejidad que un caso bidimensional, debido a que será necesario un mayor tiempo para la definición del problema y sus condiciones (pre-procesado), en el cálculo y en el análisis de las soluciones obtenidas (post-procesado).

En este momento, no tenemos la geometría que queremos estudiar, ya que lo que queremos modelar es el interior fluido de la habitación, entonces, mediante las herramientas de dibujo que ofrece el propio programa. Gracias, en concreto, al uso de la herramienta *Fill* de *Ansys DM* se consigue extraer la geometría del interior de la habitación restando el volumen de las partes sólidas de los elementos que hemos modelado, generando como resultado lo que sería la parte de volumen que recorrerá el aire que ocupa la habitación.



*Figura 4.2.- Interior fluido de la habitación.*

Después de obtener la geometría, el siguiente paso es realizar el mallado, fase que pertenece también a la fase de preprocesado, y se centra en la creación de la malla, es decir, las celdas en las cuales se van a subdividir o simplificar el cálculo de cada una de las variables discretizadas.

## 5. MALLADO DE LA GEOMETRÍA

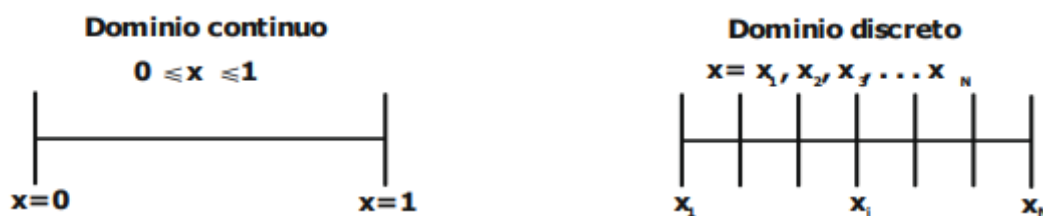
El mallado es uno de los puntos más sensibles y significativos del trabajo, por lo tanto, se ha de intentar buscar una solución lo más adecuada posible al problema que se nos plantea, con una malla lo más eficiente posible, que dé resultados lo más fiable posible y tarde el menor tiempo posible en converger hacia estos resultados.

La función de la malla básicamente es la de convertir el dominio continuo que presenta el problema en un dominio discreto. En el dominio discreto las variables del problema se definen únicamente en los puntos de la malla. Por ejemplo, si únicamente necesitáramos la variación de una propiedad en una única dimensión, en el dominio continuo se definiría de la siguiente forma:

$$Q = Q(x), 0 < x < 1$$

Mientras que, en el dominio discreto, cada variable se definiría únicamente en cada punto de la malla, por lo que nuestra propiedad estaría definida solamente en  $N$  puntos, los correspondientes a la malla:

$$Q = Q(x_i), i = 1, 2, 3, 4, \dots, N$$



Por lo tanto, el problema se resuelve únicamente en los puntos de la malla, obteniendo las variables deseadas únicamente en estos lugares. Los demás valores, entre medias, se obtendrán por interpolación de los valores en los puntos de la malla.

La malla que buscamos será aquella que consuma los recursos óptimos necesarios, ni más ni menos, de esta forma conseguiremos ahorrar tiempo y encontrar una solución precisa y fiable, ya que un número de nodos (número de vértices que existen en la malla, y donde se calcula la solución) muy elevados, puede llevar a tiempos de simulación muy elevados, y un número pequeño a resultados imprecisos, que den lugar a futuros errores.

Una lista aproximada que nos indica un orden de magnitud del número de celdas del que debería disponer nuestra malla según el tamaño del problema que vamos a estudiar sería:

- $10^4$ : problemas de tamaño pequeño.
- $10^5$ : problemas de tamaño intermedio.
- $10^6$ : problemas grandes. Pueden resolverse con computación en paralelo, pero la generación de la malla y el post-procesado pueden ser lentos.
- $10^7$ : problemas enormes a evitar en la medida de lo posible. Comunes en aplicaciones aeroespaciales y de automoción.
- $10^8$  y superiores: aplicaciones militares.

Señalar que el propio software de *Ansys* en la versión educativa impone un límite. La cual restringe la simulación posterior, que se va a realizar con *Ansys Fluent* a una malla con una

cantidad máxima de elementos de 512.000 unidades, lo que significa que a partir de ese número no será posible obtener una solución. En nuestro caso, se trata de un problema de tamaño intermedio, pero disponemos de suficiente capacidad de cálculo para acercarnos a la cantidad máxima de celdas.

### 5.1 Calidad de la malla

La composición y la calidad de la malla son de vital importancia en la estabilidad y la convergencia de la solución de las ecuaciones. Con tal de realizar un buen mallado, hay que tener en cuenta varios parámetros que nos indicaran la calidad de la malla:

- Asimetría (*Skewness*): este parámetro tiene en cuenta la desviación que tiene la malla con la figura geométrica que representa la malla, fijándose en los ángulos de los vértices. Cuanto menor sea el parámetro, mejor será la malla. Siendo aceptable por debajo de 0,8 y excelente por debajo de 0,25.

Skewness	Calidad Malla
0÷0.25	Excelente
0.25÷0.50	Buena
0.50÷0.80	Aceptable
0.80÷0.95	Pobre
0.95÷0.99	Inadecuada
0.99÷1	Deteriorada

- Cambio en tamaño (*Smoothness*): parámetro que tiene en cuenta el cambio de tamaño, cambio que ha de ser de forma gradual, de forma que no haya cambios bruscos. El cambio máximo en el espaciado de la malla ha de ser como máximo del 20%.



**Cambio de tamaño gradual**

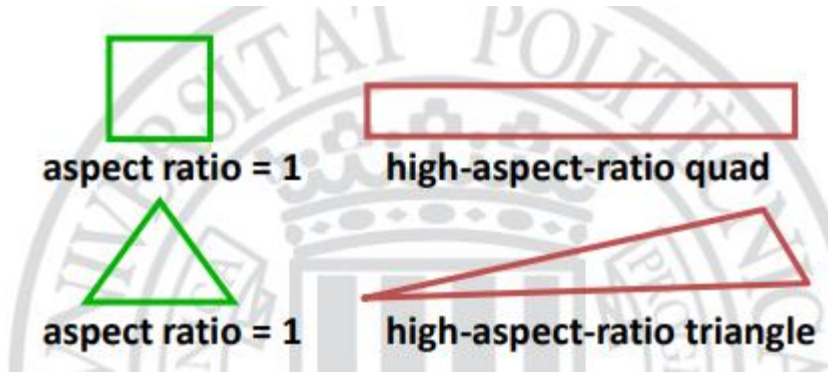


**Cambio de tamaño brusco**



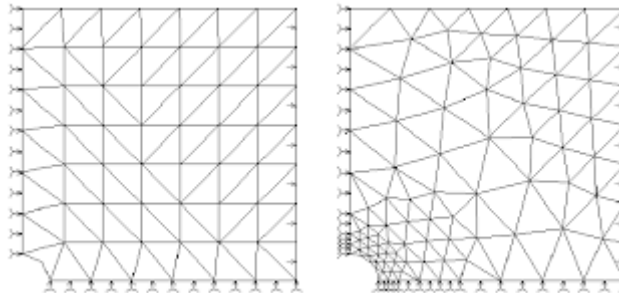
- Ratio de aspecto: parámetro que indica la relación entre la longitud del lado más largo y el más corto. Siendo su valor igual a 1 para un triángulo equilátero o un cuadrado. El ratio de aspecto (ancho/alto) debe estar próximo a 1 cuando el flujo es multidimensional. Sin embargo, las celdas Quad/Hex pueden llegar a estirarse cuando el flujo es completamente desarrollado y unidimensional.





La forma en las mallas en 2D suelen ser triángulos o cuadriláteros, mientras que en 3D las celdas suelen ser tetraedros o hexaedros.

Podemos encontrar casos de mallas estructuradas o no estructuradas. Normalmente las mallas estructuradas se gastan en métodos de elementos finitos mientras que las no estructuradas se utilizan para métodos de volúmenes finitos. En una malla estructurada las celdas están formadas por rectángulos o paralelepípedos colocados dentro de la geometría analizada de una manera más o menos ordenada, mientras que el mallado no estructurado está formado por tetraedros, lo que permite ajustarse mejor a formas complejas.



**Figura 5.1.- Comparación malla estructurada y no estructurada.**

Las ventajas que encontramos en el uso de mallas no estructuradas para la modelización de geometrías más complejas son evidentes y la mayoría de algoritmos para generar mallas tridimensionales a base de tetraedros, ya se encuentran perfectamente implementados en la mayoría de software comercial de CFDs. No obstante, las mallas estructuradas, formado por celdas hexaédricas, aportan una convergencia más estable y rápida.

## 5.2 Estudio de la malla

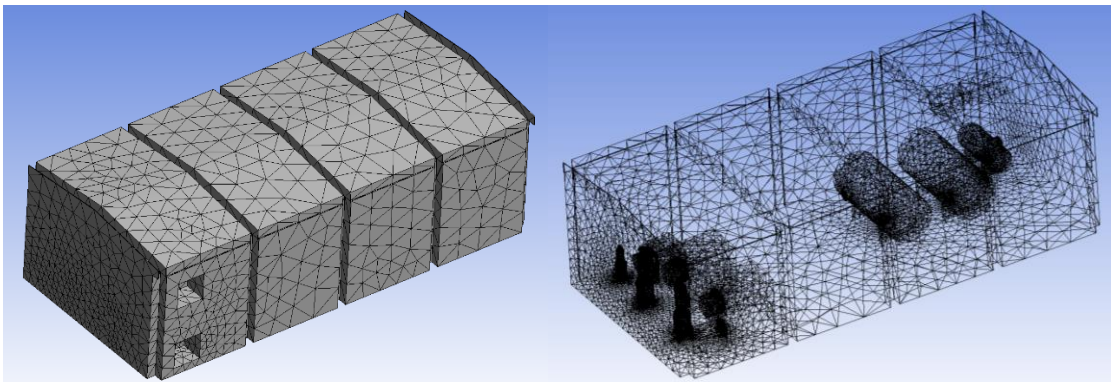
### 5.2.1 Parámetros generales de la malla

El estudio de la malla comienza con la importación de la geometría al programa de mallado. Una vez se comprueba que la importación es correcta, se procede con la parametrización del cálculo de la malla.

El módulo de *Ansys* encargado del mallado es el de *Meshing*, esta herramienta de mallado nos permite elegir para que tipo de estudio físico estamos realizando el mallado, pudiendo ser para análisis mecánico, electromagnético, explícito, etc. En nuestro caso elegimos las preferencia físicas del tipo CFD. Con esto, las demás opciones de configuración de la malla se

adaptarán a valores que por defecto son considerados los óptimos por el programa para la geometría de diseño y el tipo de análisis físico que se va a realizar.

Si decidimos mallar con estos valores, nos darían como resultado una malla que cumpliría de sobra con los parámetros de calidad que nombramos anteriormente, y que, sería aceptable para realizar el cálculo, dándonos una solución aceptable con poco error frente a la realidad. No obstante, esta solución únicamente tendrá en cuenta la geometría a mallar, por lo que centra la mayoría de sus recursos en los lugares de la geometría que presentan mayor complejidad, como es el caso de los filtros de impulsión y los calderines, dándole menor importancia a otras partes de la geometría, como son las zonas cercanas a la pared o los conductos del sistema de ventilación.



*Figura 5.2.- Malla con parámetros por defecto.*

Este mallado nos da como resultado un numero de celdas muy cercano al límite establecido por la versión educacional.

Statistics	
Nodes	95349
Elements	501851

*Figura 5.3.- Nodos y elementos con mallado por defecto.*

No obstante, en vez de quedarnos y seguir trabajando con esta malla, con el objetivo de construir una malla con mayor grado de refinamiento para nuestro trabajo en concreto, se decidió realizar las siguientes modificaciones.

Por defecto, el orden de los elementos es lineal, con tal de mejorar el cálculo en los lugares más complejos decidimos elegir la opción de que el programa decidiera cambiar entre cuadrática y lineal según el lugar a mallar, con ello conseguimos que en las superficies más complejas el orden de los elementos sea cuadrático, pero evitamos que la totalidad de la malla sea cuadrática lo que aumentaría demasiado los recursos computacionales necesarios.

Además del orden, lo único que cambiamos en la parte general del mallado (lo que afecta a la malla en su totalidad) es el tamaño de los elementos, cambiando el valor por defecto de 1,1326 m a 10 m, este tamaño de elemento no se llega a alcanzar debido a que el programa comienza mallando en las zonas con un tamaño de elemento mucho menor y después por defecto tiene establecido un ratio de crecimiento de 1.2, por lo que no dispone de espacio "plano" en la geometría para alcanzar esos tamaños.

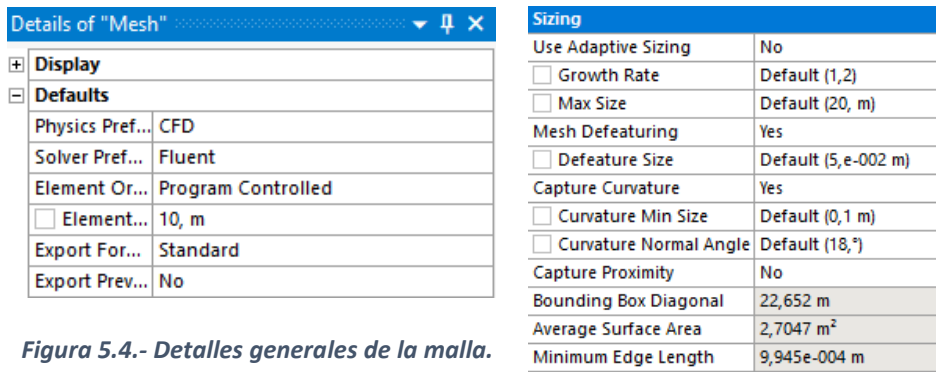


Figura 5.4.- Detalles generales de la malla.

Con este cambio, conseguimos evitar utilizar cierta cantidad de recursos, los cuales dispondremos en otras posiciones que nos resultan más interesantes para nuestro trabajo con el uso de la herramienta *Sizing*.

### 5.2.2 Refinamiento de la malla

Primero estableceremos sistemas de coordenadas en los lugares de mayor interés para el cálculo de la solución. En nuestro caso, son los lugares y superficies cercanas a las entradas y salidas de caudales de aire, dispondremos seis: tres en los filtros de admisión de las soplantes, dos en los conductos de entrada del sistema de ventilación y uno en el conducto de salida del sistema de ventilación al lado del ventilador. Con estos sistemas de coordenadas y la herramienta *Sizing* haremos un mallado del tipo esfera de influencia.

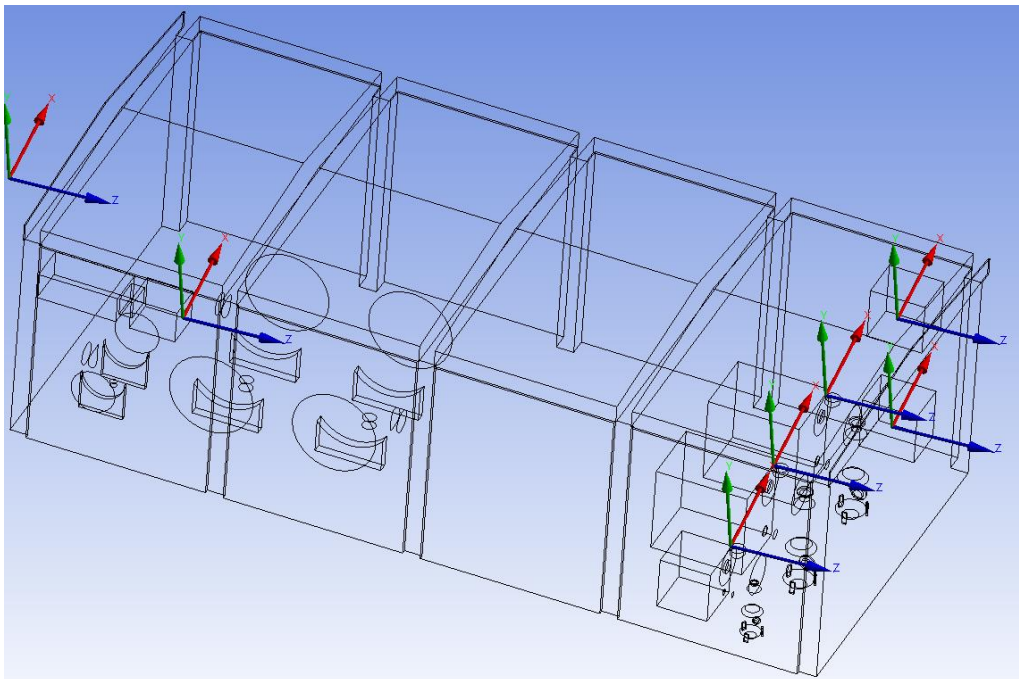


Figura 5.5.- Sistemas de coordenadas dispuestos en la geometría.

Este tipo de mallado nos pide establecer un radio de esfera y un tamaño de elemento, de modo que creamos una esfera, con centro en el sistema de coordenadas, dentro de la cual realizaremos un mallado de mayor grado de refinamiento. De forma que conseguiremos una mejor malla, que obtendrá errores menores en el cálculo, en estos lugares de interés y sus alrededores.

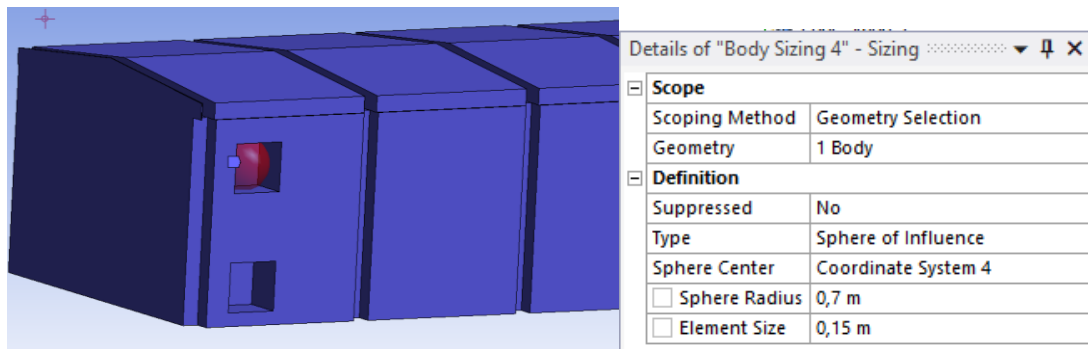


Figura 5.6.- Ejemplo mallado Sphere of influence en conducto de ventilación de entrada.

Los lugares cercanos a la pared, el techo y las zonas más amplias y alejadas de las soplantes y los calderines, no necesitan de ese detalle de mallado, no obstante, aún es posible mejorarlo, y sobre todo, en las zonas cercanas a las vigas y columnas donde existe cierto relieve, que podría afectar al avance del aire, por lo que se decidió hacer uso de la herramienta Sizing en las aristas que forman están columnas y vigas, y forzar un número mínimo de divisiones que debe tener la malla cerca de estas aristas.

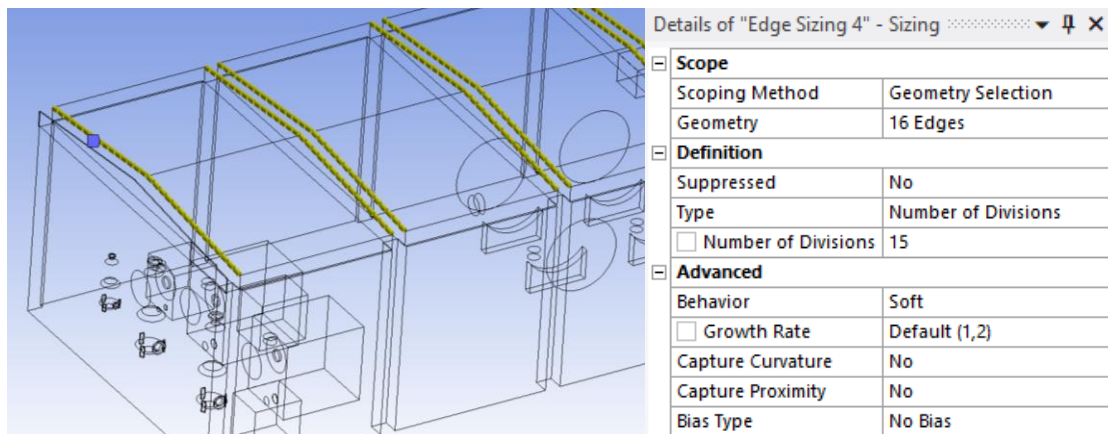


Figura 5.7.- Ejemplo mallado Number of divisions cerca de las vigas del techo.

Una vez establecido todos los parámetros de nuestra malla e insertar adecuadamente todos los Sizings es el momento de generarla, y una vez disponemos de la malla terminada haremos uso de las herramientas del sistema para analizar la calidad de la malla.

### 5.2.3 Análisis de la calidad de la malla

En este apartado analizaremos la calidad de la malla diseñada para garantizar que la simulación del flujo sea correcta, a partir de los parámetros comentados anteriormente.

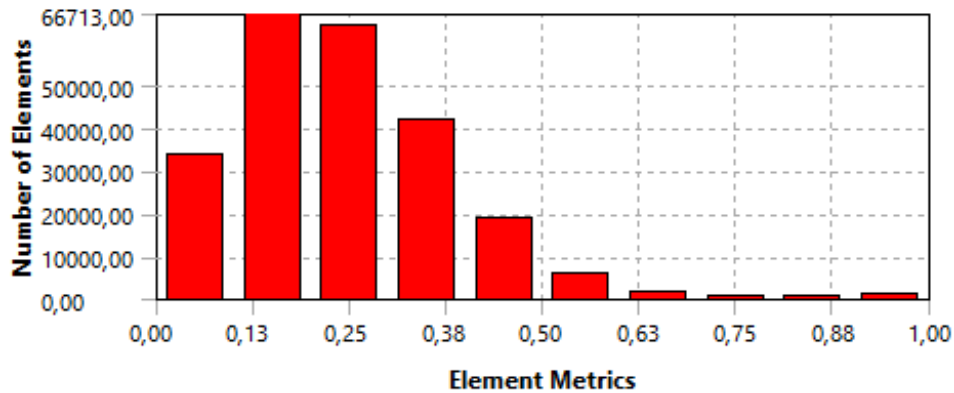


Figura 5.8.- Diagrama de barras del grado de asimetría del mallado (*Skewness*).

En la Figura 5.8 se puede observar como la gran mayoría de las celdas, aproximadamente un 70% de elementos, tienen un grado de asimetría *Skewness* con un valor por debajo o igual a 0.25 lo que es una calidad excelente y el resto por lo menos se encuentra por debajo de 0.5 lo que es una calidad de malla buena, siendo menos del 4% de celdas las que tienen una calidad de malla aceptable y mucho menos del 1% las celdas que tienen calidad peor.

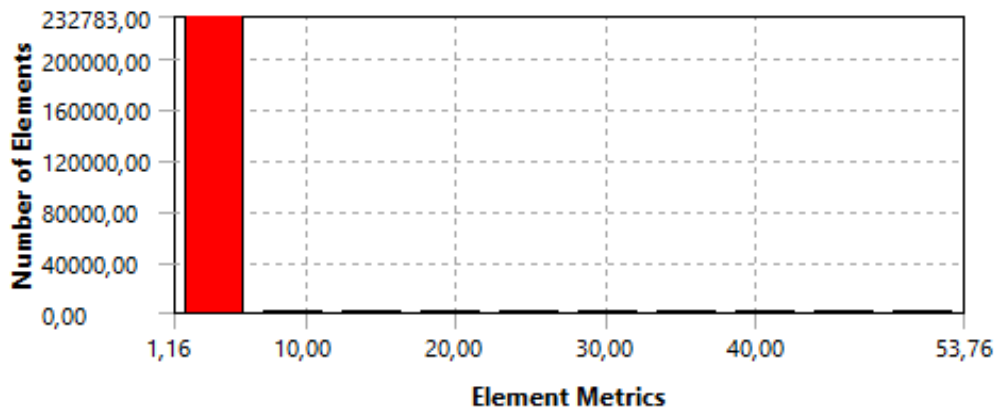


Figura 5.9.- Diagrama de barras del ratio de aspecto del mallado.

Respecto al ratio de aspectos observamos que prácticamente el 100% de las celdas presentan un valor muy cercano a 1, lo que en nuestro caso donde el flujo es multidimensional y no conocemos todavía si estará desarrollado completamente es lo correcto y lo que buscamos.

El parámetro cambio de tamaño *Smoothness* será menor del 20%, ya que como hemos comentado anteriormente en los propios parámetros del mallado indicamos un ratio de crecimiento de 1.2 como máximo lo que equivaldría a un aumento del 20%. No obstante, para comprobar este parámetro disponemos de los dos siguientes diagramas.

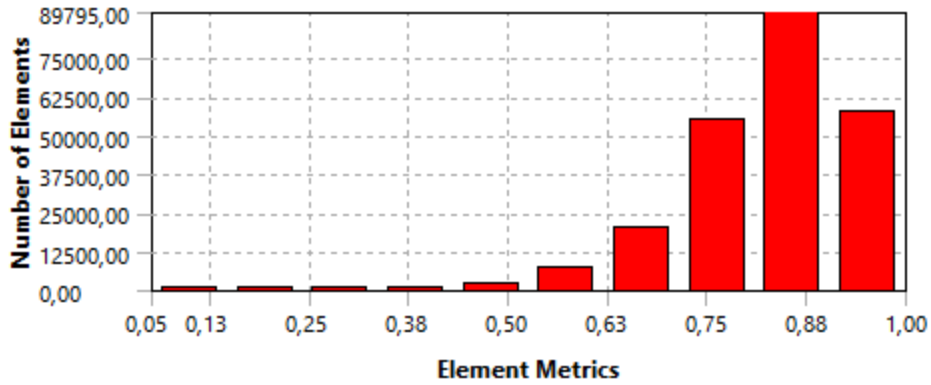


Figura 5.10.- Diagrama de barras Element Quality.

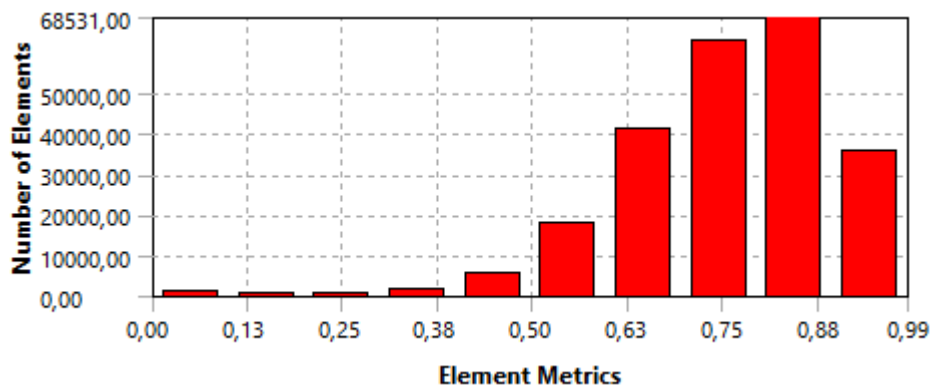


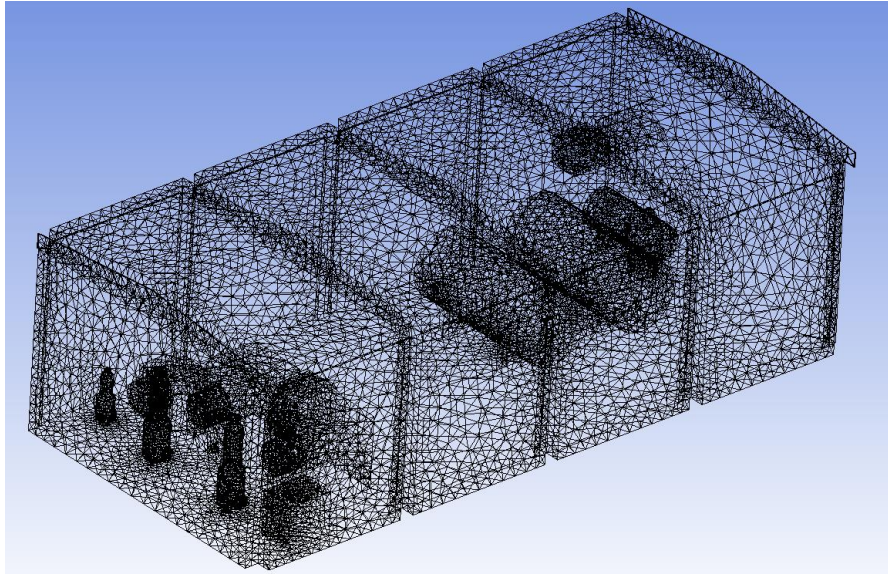
Figura 5.11.- Diagrama de barras Orthogonal Quality.

Ambos diagramas nos muestran una métrica de calidad siendo 0 la peor y 1 la mejor calidad posible. La primera respecto a la similitud a una pirámide o cubo perfecto que tengan los elementos de la malla, y en la segunda, dependiendo de la ortogonalidad que tengan las diferentes celdas. En ambos diagramas encontramos valores que son correctos, siendo la mayoría cercanos a 1.

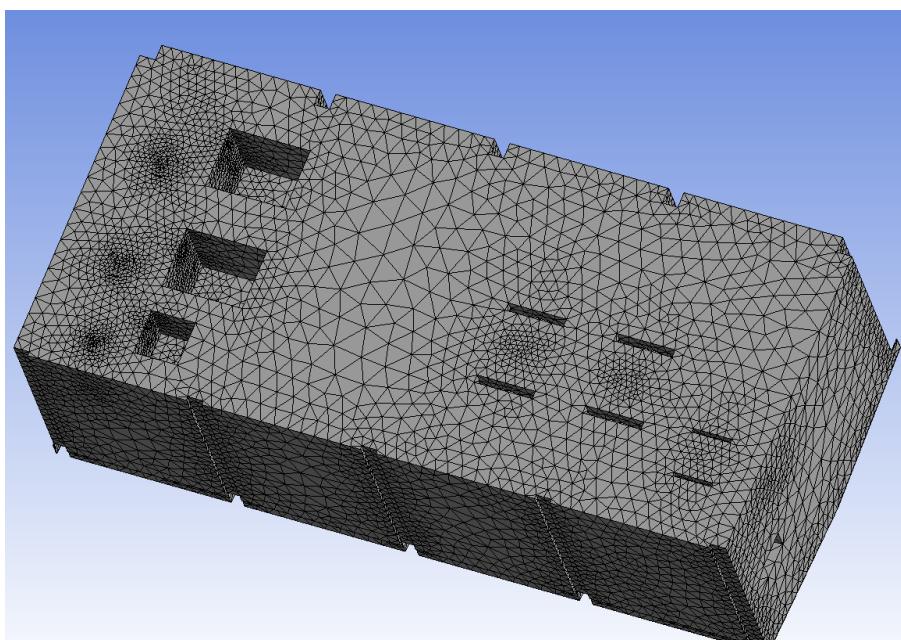
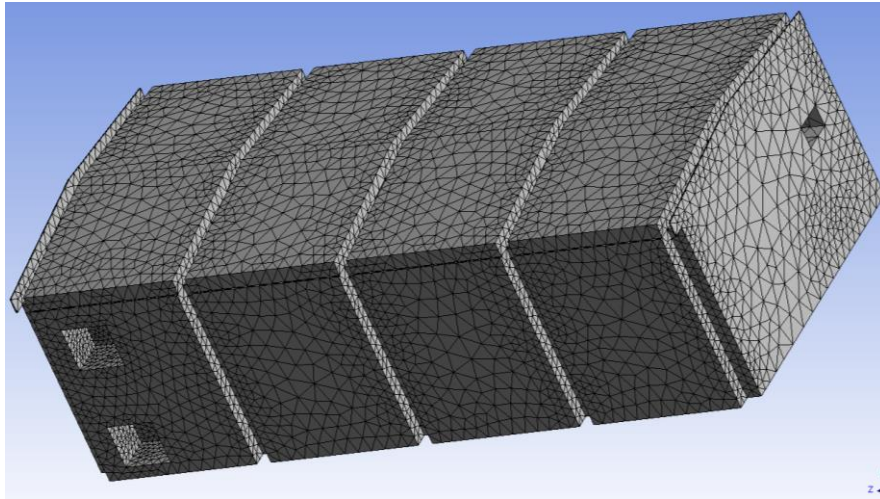
#### 5.2.4 Resultado final de la malla

Finalmente, tras comprobar y verificar que la calidad obtenida es suficiente, se presenta como resultado final de la malla, la mostrada en las imágenes que encontramos en las figuras 5.12, 5.13 y 5.14. Esta malla será la que emplearemos en todas las diferentes simulaciones que llevemos a cabo.





*Figura 5.12.- Resultado del mallado final para la simulación.*



*Figura 5.13.- Detalle de la malla exterior cerca de las estructuras de la edificación.*

En las imágenes de la figura 5.13 podemos observar el mayor grado de refinamiento conseguido en las paredes, suelo y techo mediante el uso de la herramienta *Sizing*, y en la figura 5.14 se nos muestra en detalle el mallado que tendrán los filtros de impulsión y admisión, el cual seguirá siendo igual de preciso que con el mallado por defecto.

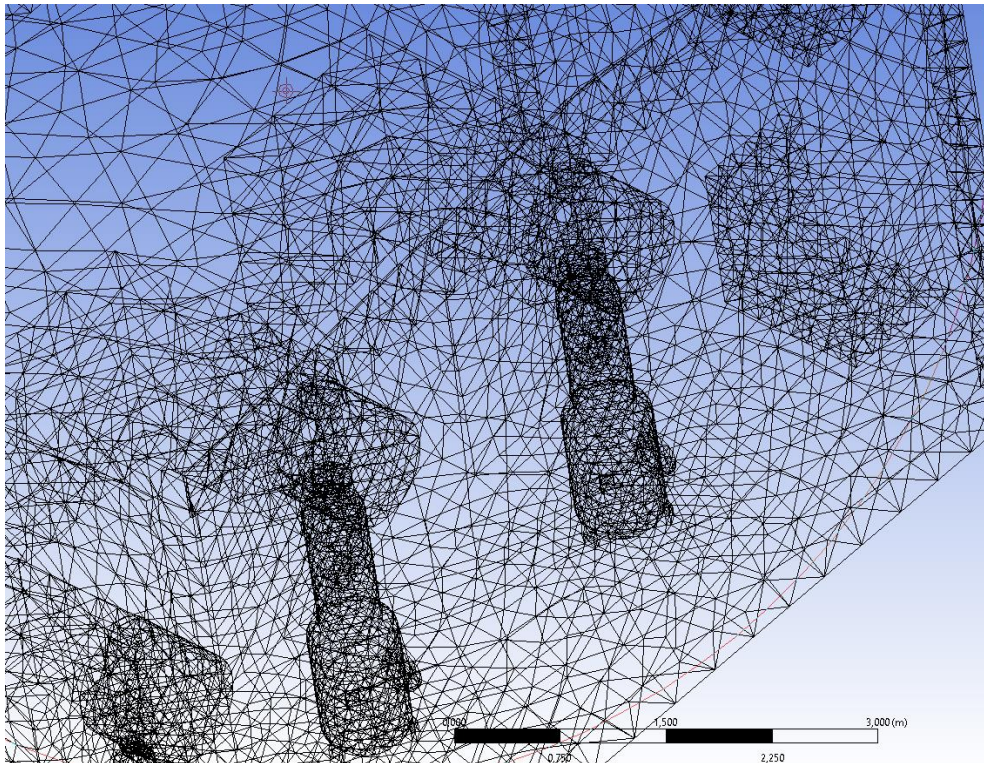


Figura 5.14.- Detalle del mallado final realizado en los filtros de impulsión.

Comparado con las estadísticas que obtuvimos con el mallado por defecto observamos que el número de celdas lo hemos conseguido reducir, sin embargo, el número de nodos se ha visto aumentado, esto es debido a que el orden de algunos de los elementos ha pasado a ser cuadrático debido al cambio que hemos comentado anteriormente.

Por último, señalar que se realizaron y fueron puestas a prueba diversas mallas intermedias hasta finalmente alcanzar esta malla final. También es cierto que tanto la primera malla realizada como esta final nos dieron tiempo de cálculos similares y soluciones prácticamente idénticas, pero esta malla final se encuentra más adaptada a nuestro problema.

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	337778
<input type="checkbox"/> Elements	234183

Figura 5.15.- Nodos y elementos con el mallado final.

### 5.3 Nombramiento de superficies

Este apartado, a pesar de no corresponderse exactamente al desarrollo o estudio de la malla, se debe realizar en este preciso momento ya que las herramientas de asignación se encuentran dentro del propio módulo *Mesh* donde realizamos el mallado.



Dentro del módulo de mallado, también hemos de indicar y nombrar las diferentes superficies que tendrán entradas y salidas de caudales de aire, y otras partes las cuales presentarán condiciones especiales, con tal de posteriormente en el módulo de *Fluent*, poder aplicar de manera correcta las condiciones de contorno que tendrán en estos lugares.

Para nombrar una superficie es necesario seleccionarla y a continuación crear una *Name Selection*. Las superficies que definiremos serán las 3 entradas desde el filtro de admisión a las 3 soplantes, las 2 entradas de ventilación desde el exterior a la habitación, la salida de ventilación al exterior, donde encontramos el ventilador, y las paredes de la envolvente de las soplantes en contacto con el fluido, todas ellas por separado. En total definiremos 7 *Name Selections* con los nombres mostrados en la figura 5.16.

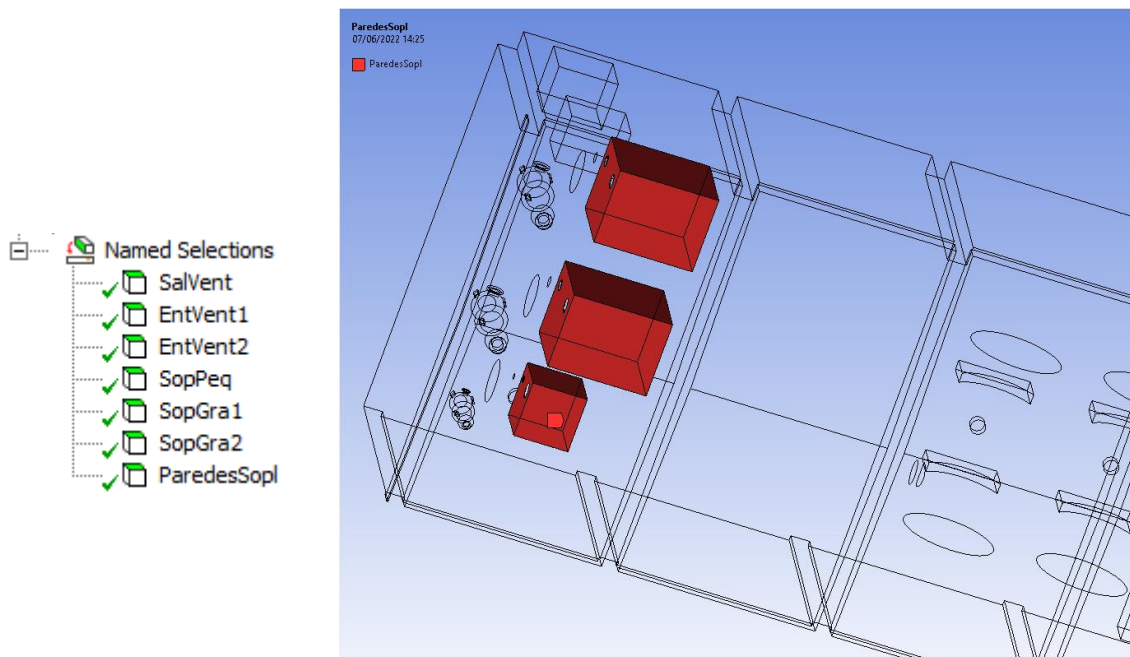


Figura 5.16.- Name Selections.

Figura 5.17.- Ejemplo Name Selection paredes de las soplantes.

En la figura 5.17 mostramos un ejemplo de cómo quedaría la asignación de la *name selection* en las paredes de las soplantes.

## 6. ESCENARIOS DE MODELIZACIÓN

No siempre encontraremos las mismas condiciones de funcionamiento en la sala de máquinas, ya que todo depende de que número y tipo de soplantes se encuentren en funcionamiento, el modo de ensayo que se esté estudiando en el laboratorio, a que potencia se encuentren las soplantes y que cantidad de aire este moviendo el ventilador que controla el sistema de ventilación de la habitación, condicionado por las variables ambientales diarias. Por lo tanto, será necesario establecer que escenarios resultarán más desfavorables y deberán ser estudiados.

Por un lado, existen dos posibles modos de trabajo en la sala de ensayos. En el modo de succión, el objetivo es drenar el aire que encontraremos dentro del circuito de las ventosas a ensayar, y en modo impulsión, deberemos suministrar de aire al circuito. De forma que podremos estudiar el funcionamiento de las ventosas tanto en llenado como en vaciado del circuito de aire.

Sin embargo, respecto al estudio que estamos llevando en este trabajo, el modo de ensayo en succión no será relevante, ya que en este caso el aire que es drenado del circuito de ensayos es llevado directamente al exterior a través del interior del filtro de impulsión y de unas tuberías que conectan la pared con el exterior del laboratorio, por lo que no supone ningún tipo de entrada ni salida de aire de la sala de máquinas, por lo que serán unas condiciones mucho menos exigentes que las que se presentarían con el modo de ensayo en impulsión, donde las soplantes alimentaran el circuito de ensayo obteniendo el aire de la sala de máquinas.

Por otra parte, encontramos que el sistema de ensayos puede imponer diferentes presiones de funcionamiento al circuito de ensayos, y en cada rango de presiones las soplantes pueden llegar a absorber de la sala de máquinas diferentes caudales de aire.

	P2 (mbar)	1037 1037	1137 1137	1237 1237	1337 1337	1437 1437
	(Nm <sup>3</sup> /h)	Q <sub>max</sub> Q <sub>min</sub>	Q <sub>max</sub> Q <sub>min</sub>	Q <sub>max</sub> Q <sub>min</sub>	Q <sub>max</sub> Q <sub>min</sub>	Q <sub>max</sub> Q <sub>min</sub>
1P	ES65/2V	862 257	845 236	831 220	818 207	807 195
1G	ES105/3.5V	3041 921	2986 861	2942 815	2905 776	2871 742
2G	2X ES105/3.5V	6082 1842	5972 1722	5884 1630	5810 1552	5742 1484
1P+1G	ES105/3.5V+ES65/2V	3903 1178	3831 1097	3773 1035	3723 983	3678 937
2G+1P	2X ES105/3.5V+ES65/2V	6944 2099	6817 1958	6715 1850	6628 1759	6549 1679

*Tabla 6.1.- Caudal de aire absorbido por las soplantes en modo impulsión a diferentes presiones.*

Como podemos observar en la tabla 6.1 se ha realizado un estudio del caudal de aire que absorbe cada tipo de soplante según la presión de funcionamiento a máxima y menor potencia de los soplantes (P2 hace referencia a la presión de salida de la soplante, siendo P1 la presión atmosférica en el interior de la sala) y de todas las posibles combinaciones de soplantes funcionando a la vez. La situación más desfavorable será aquella en la que los soplantes absorban mayor caudal de aire, esto se dará en el caso en el que la presión de trabajo sea la menor posible y las soplantes se encuentren trabajando a su mayor potencia moviendo la mayor cantidad de masa de aire.

De igual forma, la tabla nos indica que el escenario más desfavorable se dará cuando las 3 soplantes se encuentren funcionando a la vez, absorbiendo la mayor cantidad de caudal posible (Para ver otros escenarios simulados de funcionamiento ver Anejo 03).

En cuanto al sistema de ventilación de la habitación, las dos entradas de aire del exterior serán por ventilación natural, mientras que en la salida de aire dispondremos de un ventilador el cual expulsará el aire al exterior mediante ventilación forzada.

El ventilador dispone de variador de frecuencia por lo que podrá cambiar el número de revoluciones por minuto al que funciona, y por lo tanto variar la cantidad de caudal de aire que expulsará al exterior, este variador se verá controlado por sensores de temperatura o de presión, ajustándose de esta manera automáticamente a las condiciones que se presenten en la habitación.

La sala de máquinas dispondrá de sensores de temperatura y de presión instalados, la prioridad que tendrá cada uno todavía no está totalmente definido en el proyecto. Pero conocemos que la peor situación, la cual es la más probable que se implante al final, es que el variador de velocidad priorice la temperatura de la habitación, y que la habitación se encuentre a una temperatura elevada, que ponga el ventilador a funcionar a su máxima potencia, con ello se producirá la mayor cantidad de salida de aire de la habitación de forma forzada.

En estos momentos aun se esta terminando de ajustar y definir el sistema de ventilación. Se han tanteado la viabilidad entre diversas alternativas, pero la opción que contemplan los técnicos responsables del Centro de investigación es la de colocar un ventilador de alta capacidad de extracción, que desplazara la mayor cantidad de caudal de aire de entre las diferentes alternativas. De esta forma estarían cubiertas todas las opciones presentes y posibles ampliaciones futuras.

El modelo de ventilador que instalaremos para realizar la simulación será el modelo TBD 15/15 1.5KW H-D de la marca *Airsum*. El flujo de aire que desplazará este ventilador los podemos encontrar en las propias curvas de funcionamiento que nos proporciona el fabricante, para el caso de este ventilador su curva de funcionamiento será la mostrada en la figura 6.1.

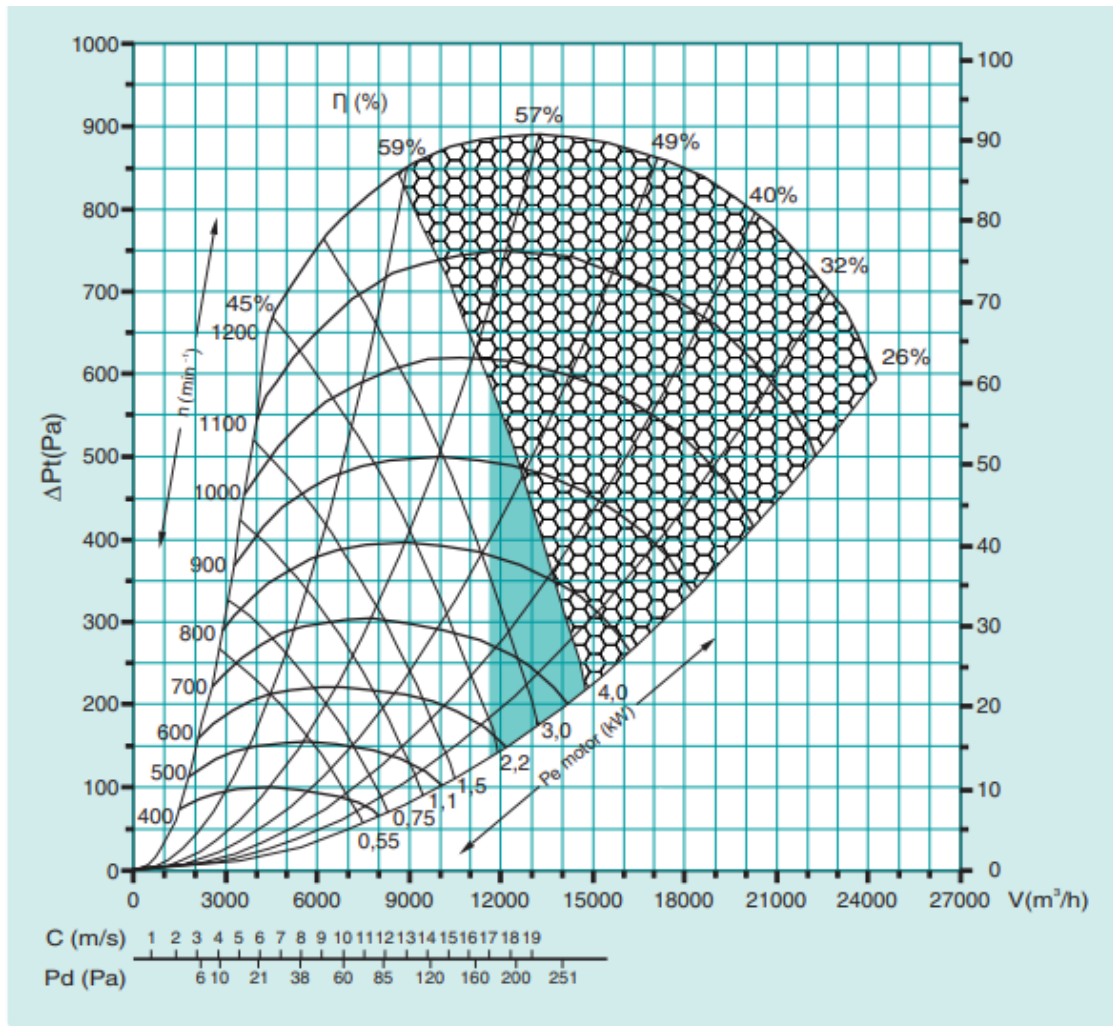


Figura 6.1.- Grafica funcionamiento del ventilador TBD 15/15.

El valor que buscamos es el que tendrá funcionando a 50 Hz (frecuencia de red en España) y girando a máxima velocidad posible, para la potencia motor de nuestro ventilador, lo que da un flujo de aire de unos 10500  $m^3/h$ .

A parte, con tal de comprobar que la refrigeración de la sala de máquinas, y por lo tanto el ventilador instalado, es suficiente para preservar la salud y confort de las personas, en épocas del año con temperaturas muy elevadas, y con la maquinaria funcionando y generando calor. Se han establecido en las paredes de la envolvente de las soplantes la temperatura máxima que nos indica el fabricante que estas pueden llegar a alcanzar a máxima potencia, 40 grados (313 Kelvin) y se ha decidido que la temperatura del aire de entrada a la sala sea de 30 grados (303 Kelvin).

## 7. DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS DE ANÁLISIS

En este apartado del trabajo procederemos a realizar la simulación del caso que hemos ido exponiendo en los apartados anteriores. El módulo de *Ansys* encargado de realizar esto es *Fluent*, dentro del programa, como iremos explicando más en detalle en los siguientes apartados, encontraremos diferentes modelos físicos que habilitaremos según el tipo de análisis que realizamos, los cuales definiremos de forma independiente de la malla e independientemente de las regiones existentes en la geometría modelada. Algunos de los modelos físicos habilitados por el software *Fluent* son:

- Definición de los materiales objeto del análisis: sólido, líquido o gas.
- Establecimiento de la variación temporal del análisis, estacionario en el tiempo o transitorio.
- El tipo de modelo turbulencia aplicado en el caso de flujo turbulento.
- Las características térmicas del fluido y de los contornos en el caso de requerir incluir la ecuación de la energía y los efectos térmicos en el análisis.
- Encontraremos muchos otros parámetros y características específicas del análisis.

### 7.1 Configuración de la simulación numérica

Lo primero que haremos al importar la malla al programa de cálculo *Fluent*, en la ventana emergente de ajustes antes de iniciar el programa será marcar la casilla de cálculo de doble precisión, esta opción habilita el almacenamiento del doble de valores decimales calculados, lo que dará como resultado una mejor precisión en cada iteración, eso sí, consumiendo más memoria del ordenador. También marcaremos la opción de 3 procesos en paralelo, los cuales se ejecutarán en núcleos diferentes del procesador, reduciendo así significativamente el tiempo de cálculo al aprovechar los diferentes núcleos de los que disponemos en el ordenador.

Actualmente la mayoría de los programas existentes de simulación por iteración, permiten lanzar procesos a varios ordenadores al mismo tiempo. Un mayor número de procesos simultáneos implica más capacidad de cálculo, lo que supone más velocidad en la obtención de resultados. El tiempo, es uno de los recursos más valiosos a gestionar, es por ello, que consultorías y grandes empresas de ingeniería, disponen de clústeres de ordenadores, en los que poder lanzar un mayor número de procesos, incluso muchas grandes empresas han optado por la subcontratación de granjas de ordenadores con gran potencia computacional y especializadas en esta parte del trabajo, en las que resolver geometrías mucho más complejas que la expuesta en este trabajo.

Una vez ya dentro del software *Fluent*, encontramos en el apartado *General*, en la sección de *Mesh* la opción de verificar la calidad de la malla vinculada entrante (*Check*), de forma que obtendremos información referente a la calidad de la malla, señalándonos si será posible realizar la simulación con ella. Y en el caso que detectara algún parámetro incorrecto, nos recomendaría revisar el proceso de mallado para mejorar su calidad. Podríamos omitir esta recomendaciones, sin embargo, hacerlo podría suponer la obtención de resultados incorrectos o divergencias en el cálculo. Es necesario realizar la verificación para que se nos permita realizar la simulación.

Dentro de *General*, también hemos de determinar los siguientes aspectos importantes de cara a la obtención de la solución:

- *Type*: escogeremos la opción *Pressure-Based* esta opción es escogida principalmente en aquellos casos en los que consideramos el fluido a estudiar como incompresible, esta suposición se da en aquellos problemas en los que el fluido no adquiere una velocidad excesivamente elevada, la opción *Density-Based*, se emplea fundamentalmente en casos de fluidos que alcanzan altas velocidades, y sufren de expansiones y/o compresiones que cambian su densidad durante el proceso.
- *Velocity Formulation*: debemos elegir entre formulación absoluta o relativa. La formulación absoluta está indicada para problemas en los que el dominio del fluido estudiado es no rotacional, mientras que la relativa se emplea cuando el dominio del fluido es rotacional. En el modelo simulado, el aire básicamente adquiere trayectorias rectilíneas viajando de las entradas hacia las salidas de aire, por lo que a grandes rasgos no forma ningún tipo de trayectoria rotacional, por ello se ha optado por la formulación *Absolute*.
- *Time*: esta opción hace referencia a que tipo de régimen temporal realizamos la simulación, estacionario (*Steady*) o transitorio (*Transient*). El trabajo se centra en una situación que alcanza un punto de estabilidad y se alarga indefinidamente en el tiempo, por tanto, hemos seleccionado la opción *Steady*.

Dentro de “General” por último deberíamos habilitar la gravedad estableciendo en el vector Y de la aceleración gravitacional el valor de  $-9.81 \text{ m/s}^2$ , habilitar esta opción no cambiará la solución final de la simulación, ya que el fluido al tratarse de aire, debido a su densidad, no tendrá en cuenta los efectos gravitacionales

## 7.2 Modelos de cálculo

A continuación, en el apartado *Models* encontraremos un amplio conjunto de características de modelado físico necesario para modelar el flujo, la turbulencia, la transferencia de calor y muchas otras reacciones de aplicación industrial, por lo tanto, seleccionaremos aquellos modelos que se desean tener en cuenta en la simulación computacional. Puede ser que el diseño presente transferencia de calor, exista radiación, el fluido se encuentre en diferentes fases, o se dispongan de diferentes fluidos en el sistema a solucionar.

Pueden crearse muchos conjuntos físicos en una misma simulación, cada uno con su propio nombre, modelos y propiedades. Cada región debe de estar asociada con un conjunto físico, y por el contrario cada conjunto físico puede estar asociado con una o más regiones. En el caso de este trabajo, únicamente se generaba un conjunto físico por haber importado solo la parte fluida de la sala de máquinas. En caso de importar el resto de las partes sólidas de la habitación (paredes, soplantes, filtros, calderines, etc.) se deberían haber creado tantos conjuntos físicos como materiales estén incluidos, estableciendo sus características físicas.

En nuestro caso, los únicos modelos que se han empleado y modificado han sido el de energía y el de viscosidad del fluido, donde se ha optado entre todos los disponibles por los modelos  $k-\epsilon$ , de los cuales hay numerosas variantes de estos según el modelo de turbulencia empleado. Este modelo presenta 2 ecuaciones de transporte separadas de modelos de turbulencia, las cuales permiten la determinación de una escala de tiempo y de una longitud turbulenta.

Durante el desarrollo del presente trabajo se ha estudiado la influencia en los resultados finales del uso de diferentes modelos de turbulencia, realizando una comparación entre el modelo estándar de cálculo (*Standard k-epsilon (2 eq)*) y la variación *RNG k-epsilon*, la cual se propuso como una mejora al modelo estándar.

El *Standard k-ε* modelo en *Ansys Fluent* se ha convertido en uno de los principales modelos de cálculo prácticos de flujos en ingeniería desde que fue propuesto por Launder y Spalding, debido a su gran robustez, rentabilidad y precisión razonable para un gran rango de simulaciones de flujos de aire o agua en multitud de regímenes turbulentos. Este es un modelo semi-empírico, donde la derivación de las ecuaciones del modelo se basa en consideraciones fenomenológicas y empíricas.

Este modelo ha demostrado ser muy preciso a la hora de describir la transición del flujo laminar a turbulento, y predice muy bien el comportamiento cerca de las paredes de la geometría. Actualmente muy usado en flujos que no se encuentran sometidos a grandes presiones.

El modelo *RNG k-ε* propuesto por Yakhot y Orzag, es obtenido a partir de la aplicación de una técnica estadística rigurosa, de forma que finalmente adopta la misma forma que el modelo *k-ε* estándar, pero incluyendo ciertas modificaciones:

- El modelo *RNG* incluye un término adicional en la ecuación de  $\epsilon$ , el cual mejora la precisión en flujos rápidos con tensiones viscosas de importancia.
- El modelo incluye el efecto de torbellinos sobre la turbulencia, resultando adecuado para flujos con verticidades (remolinos).
- La teoría *RNG* recoge una formulación analítica de los números de Prandtl de la turbulencia, mientras que en el modelo estándar dichos parámetros son constantes y definidos por el usuario.
- El modelo *standard k-epsilon* es efectivo para flujos con elevados números de Reynolds, mientras que la teoría *RNG* también resulta válida para flujos con bajos números de Reynolds, siempre que se realice un adecuado tratamiento de los efectos de la capa límite cerca de las paredes.

Todas estas características hacen que el modelo *RNG k-ε* sea más preciso y fiable para un mayor número de clases de flujo que el modelo *standard k-ε*.

Reforzar el hecho de que el resto de modelos de turbulencia que pueden llegar a resultar interesantes en la simulación de sistemas de ventilación, como es el caso *k-omega (k-ω)* y de *The Reynolds Stress (RSM)* también fueron estudiados y presentados en un principio como una posibilidad, no obstante, en el caso del *RSM* la capacidad de cálculo y el tiempo necesario para hacer converger y hacer válidos estos modelos resultaban excesivamente elevados por lo que fueron descartados. Mientras que el modelo *k-omega* presentaba problemas de convergencia y se trata de un modelo más simple que *k-ε* por lo que también fue descartado.

### 7.3 Condiciones de contorno

La configuración de las condiciones de contorno es de elevada importancia para el análisis. En este apartado indicaremos todas las condiciones que hemos de incluir para realizar la simulación.



### 7.3.1 Definición de materiales.

Para la parametrización del aire simulado de dentro de la habitación tomaremos los valores que se corresponderían a aire seco a presión atmosférica estándar al nivel de mar y a 30 grados de temperatura, los cuales son, una densidad de  $1.164 \text{ Kg/m}^3$ , una viscosidad dinámica de  $1.8872 \cdot 10^{-5} \text{ Kg/(m}\cdot\text{s)}$ , un calor específico de  $1006.43 \text{ J/(Kg}\cdot\text{K)}$  y una conductividad térmica  $0.02588 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , todas ellas con valores constantes durante la simulación, logrando de esta forma que el fluido sea incompresible. Este tipo de material deberemos indicarlo en el apartado *Materials* en la sección de fluidos, escribiendo los valores de densidad y viscosidad directamente o buscando el fluido en concreto en la base de datos del programa.

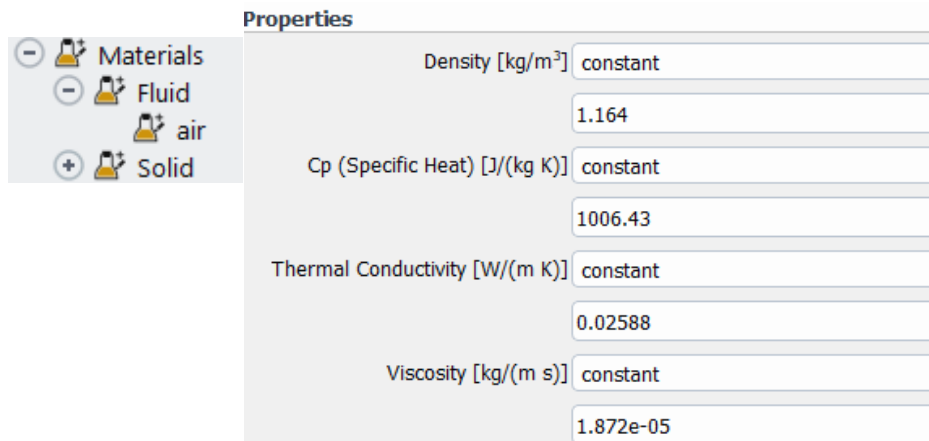


Figura 7.1.- Propiedades del fluido a simular.

El material de las paredes, techos, soplantes, calderines, ... Se definen en la sección de "Solid", no obstante, no es necesario variar el material que se encuentra por defecto (aluminio), ya que este no influirá en la simulación, al no haberse transferido ninguna geometría sólida al módulo *Fluent* que vaya a ser simulado.

### 7.3.2 Definición de fronteras

Gracias al nombramiento de las superficies que hemos realizado en el apartado anterior, ya disponemos de estas partes definidas, y únicamente tendremos que indicarle al programa de simulación, cual es el propósito de cada una de ellas. Para ello tendremos que acceder al apartado de fronteras (*Boundary Conditions*) del dominio de control donde encontraremos todas las superficies que definimos en las *Names Selections* y además encontraremos por defecto los nombres *Wall*, donde encontraremos el resto de las fronteras que no hemos marcado en una *Named Selection* e Interior, que se refiere a todo el volumen que se encuentra recogido dentro de la sala.

```

entvent1
entvent2
interior-solid
paredessopl
salvent
sopgra1
sopgra2
soppeq
wall-solid
    
```

Figura 7.2.- Boundary Conditions.



Las condiciones de contorno controlan el valor de las variables o sus relaciones en las fronteras del volumen de control analizado. Básicamente consiste en fijar los valores de presión, velocidad o caudal de aire en cada una de estas fronteras. Estas serán las variables conocidas dentro del problema a resolver y por lo tanto son componentes críticas en la simulación y deben especificarse correctamente.

Por defecto *Interior* y *Wall* tienen sus propias condiciones de contorno con el mismo nombre, básicamente en este caso a la región *Wall*, no se le cambiará ningún parámetro, por lo que esta hará el efecto de una pared donde no se puede producir un intercambio de masa, calor, ni de ningún tipo, y la región "Interior" la única condición que tendrá es que desde un principio esa zona se encuentra llena de aire.

Las zonas de entrada de ventilación se han definido como *Pressure-Inlet*, manteniendo la presión por defecto que proporcionaba el programa de 0 pascales, de esta forma estamos definiendo un conducto de ventilación abierto al exterior, el cual no genera ningún tipo de diferencia de presión entre el exterior y el interior por sí mismo que vaya a formar una corriente de aire, y en la pestaña *Thermal*, la cual hemos habilitado al activar en modelos la opción de las ecuaciones de energía, asignaremos el valor de temperatura del aire de entrada a 303 Kelvin.

En este momento también será necesario especificar un método de turbulencia, escogeremos la opción *Intensity and Hydraulic Diameter* como medida del flujo de retorno de la turbulencia de las diferentes simulaciones.

El porcentaje de intensidad turbulenta hace referencia a la desviación típica de la velocidad del viento dividida por la velocidad media del viento, en este caso este factor de intensidad controlaría la cantidad de energía cinética turbulenta que habría en la corriente de entrada a la sala por los conductos de ventilación. Por dar un orden de magnitud, una intensidad turbulenta del 1% o menor se considera turbulencia baja, mientras que una intensidad mayor del 10% se considera alta

Idealmente, este valor debería ser medido por medio de experimentos o ensayos, ya que esta es función de las características que tenga el elemento que contiene el fluido, en este caso de las características que tenga la sala de ventilación. También existe la posibilidad de estimar el valor de la intensidad turbulenta en el seno de un flujo totalmente desarrollado con la siguiente fórmula empírica para flujos en conductos:

$$I = \frac{u'}{u_{avg}} = 0.16(Re_{Dh})^{-1/8}$$

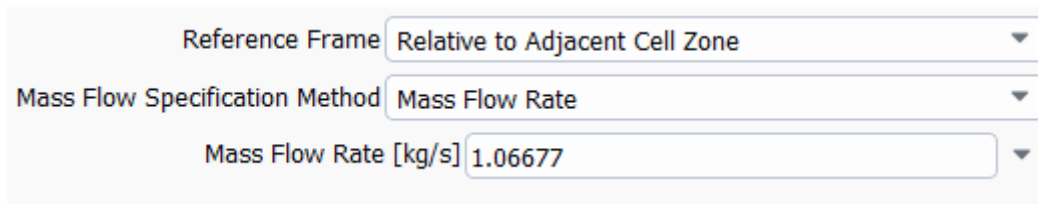
Llegar a conocer la intensidad turbulenta exacta nos costaría excesivamente y resulta muy poco relevante para la simulación que vamos a realizar, por ello se ha optado por establecer su valor por defecto 5%, ya que en nuestra simulación no encontraremos velocidades muy elevadas, por lo que el flujo turbulento será reducido.

Por su parte, el diámetro hidráulico se corresponde con el doble del radio hidráulico, el cual se calcula según la fórmula siguiente:

$$\text{Diámetro Hidráulico} = \frac{4 * \text{Area mojada}}{\text{Perímetro mojado}}$$

Donde el perímetro mojado se corresponde con el perímetro de entrada de aire y el área mojada, al área de la superficie de entrada. Este cálculo nos ayuda cuando trabajamos con conductos o tuberías de sección no circular, pudiendo utilizar este término para estudiar el comportamiento del flujo de la misma forma como si fuera una tubería de sección circular. Para ambos conductos de ventilación de entrada, al tener las mismas dimensiones, el diámetro hidráulico será de 1.25 m.

Las superficies del conducto de ventilación de salida y las tres zonas de entrada de aire en los filtros de admisión a las soplantes que faltan por definir, serán del tipo *Mass-flow-outlet*, esta condición de contorno nos permite definir directamente un caudal de masa de aire en Kg/s que saldrá de la sala de máquinas, como hemos comentado anteriormente en el apartado 6 se ha realizado un estudio del cual obtuvimos una tabla que nos muestra el caudal volumétrico (en m<sup>3</sup>/h) que absorben las soplantes, al igual que el caudal de aire que moverá el ventilador del sistema de ventilación de la sala. Con estos datos y la densidad del aire podemos calcular el caudal másico (en Kg/s) que hemos de colocar en las condiciones de contorno.



Reference Frame: Relative to Adjacent Cell Zone

Mass Flow Specification Method: Mass Flow Rate

Mass Flow Rate [kg/s]: 1.06677

Figura 7.3.- Ejemplo de condición de contorno *Mass-flow-outlet*.

Las superficies de las paredes de las soplantes serán definidas como *Wall*, y en la pestaña de *Thermal* seleccionaremos la condición térmica por temperatura donde asignaremos una temperatura de 313 Kelvin, y en materiales pondremos aluminio. Las soplantes en realidad se encuentran formadas por chapa de aluminio, y recubiertas de pinturas para evitar la transferencia de calor, no obstante, no conocemos exactamente el material de estas pinturas, por lo tanto, dejaremos como material el aluminio, lo que no cambia excesivamente el comportamiento y en todo caso transmitirá una mayor cantidad de calor que en la realidad, por lo que será una situación más desfavorable y nos encontraremos del lado de la seguridad.

#### 7.4 Especificación de métodos de cálculo

Una vez definido las condiciones de contorno, el siguiente paso es definir las especificaciones de los métodos de cálculo. La precisión que obtenemos de un software de simulación, como es el caso de *Fluent*, vendrán determinados por los métodos resolutivos, operaciones y algoritmos internos que estén configurados en el programa de cálculo utilizado. Durante la simulación del problema en *Ansys Fluent*, en los modelos de turbulencias *Standard* y *RNG*, necesitaremos resolver las ecuaciones de presiones, momentos, energía, y de la energía cinética y el ratio de disipación turbulentos.

Para estas cuatro últimas, utilizaremos los *Upwind schemes* los cuales consisten en un tipo de métodos de discretización numérica para resolver ecuaciones en derivadas parciales de tipo hiperbólico. El método utiliza el incremento de los valores de cálculo en el contorno de las celdas de la malla, para después almacenarlos y obtener el valor en su centro. Por defecto se encuentran seleccionadas las ecuaciones de primer orden, sin embargo, utilizaremos las ecuaciones de segundo grado, aumentando así la cantidad de valores que tomamos del

contorno de las celdas, lo que nos permitirá que la simulación converja en una menor cantidad de interacciones, respecto a las ecuaciones de primer orden.

Mas adelante tendremos el apartado *Controls* donde encontraremos los denominados factores de relajación. Los factores de relajación son también conocidos como relajación implícita. Se usan principalmente para estabilizar el comportamiento no convergente en iteraciones no lineales. Mediante el uso de este método, la solución se calculará más lentamente, pero tendremos una seguridad mayor de obtener una solución válida.

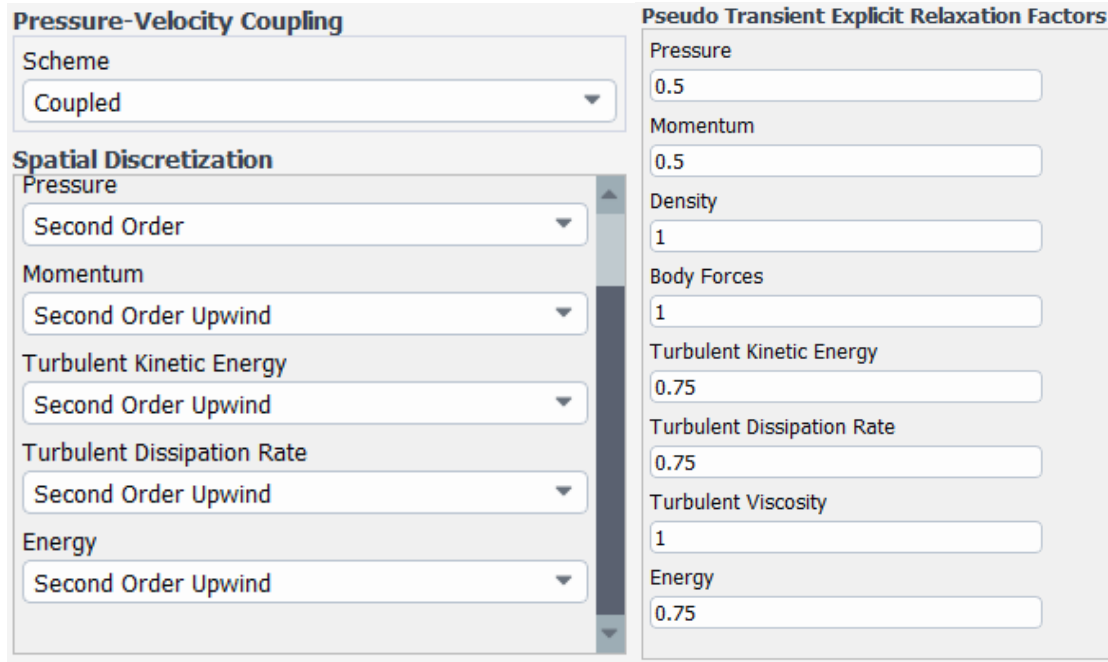


Figura 7.4.- Métodos de cálculo.

Figura 7.5.- Factores de relajación.

## 7.5 Secuencia de simulación

### 7.5.1 Conceptos básicos

Primero es necesario comprender cual es el criterio de convergencia del programa de simulación. En un modelo idílico, alcanzaríamos la solución final cuando el valor de todos los residuos fuera 0, siendo el residuo la medida de lo bien que la solución actual cumple las ecuaciones de gobierno discretizadas. No obstante, los problemas planteados a resolver son tan complejos, que obtener el valor 0 para cada residuo es prácticamente casi imposible, por ello, establecemos unos criterios de convergencia individual para cada uno de los residuos. Se considera que el cálculo ha convergido, cuando los valores residuales de las ecuaciones de cálculo se encuentran por debajo de un valor el cual definimos. A partir de esto es importante tener en cuenta que, se considerara que el modelo converge cuando esta condición se cumpla para todos y cada uno de los residuos al mismo tiempo si no se cumple esta condición, se considera que el modelo no converge, y se continúa iterando.

Entonces, el proceso de cálculo puede finalizar por diferentes razones, o bien porque la solución haya convergido, es decir el valor de los residuos sea inferior al fijado como aceptable, o bien porque se haya realizado un número máximo de iteraciones, fijadas por usuario, las cuales sean consideradas como necesarias para aceptar el modelo definido como no convergente.

### 7.5.2 Monitorización de residuos

Para definir los valores de cada residuo en el criterio de convergencia, se debe considerar el orden de magnitud del trabajo, en función de los valores de resultado esperados. Durante las iteraciones, el programa nos permite elegir que variables queremos monitorizar, por defecto, se nos muestran los residuos obtenidos al resolver las ecuaciones. En el caso de este trabajo la ecuación de continuidad (conservación de la masa), ecuación de la velocidad, en su componente vertical (y), horizontal (x) y perpendicular al plano XY (z) y los parámetros de los modelos de cálculo escogido k, épsilon y energía.

Por lo tanto, la solución que hemos optado para escoger el valor de los criterios de convergencia de los residuos es el de definir unos valores lo suficientemente reducidos para que no sea alcanzables, de esta forma gracias a la monitorización de los residuos podemos observar cómo los residuos comenzaran a estabilizarse y oscilar en cierto punto. Si esta oscilación tiene un rango lo suficientemente bajo, podemos considerar que el modelo converge, parar la simulación y pasar a analizar la solución.

Con esto en mente, y después de muchas simulaciones decidimos que el valor que tomaremos para el criterio de convergencia de todos los residuos es de 0.00001, valor muy reducido, el cual no logramos alcanzar en la mayoría de los residuos, pero después de realizar las suficientes iteraciones los residuos comenzaran a oscilar, como se observa en la Figura 7.8, dando como resultado una simulación valida pese a no alcanzar el criterio de los residuos.

Residual	Monitor	Check Convergence	Absolute Criteria
continuity	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00001
x-velocity	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00001
y-velocity	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00001
z-velocity	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00001
energy	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1e-06
k	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00001
epsilon	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00001

Figura 7.6.- Criterio de convergencia de los residuos.

### 7.5.3 Inicialización y simulación

Por último, falta inicializar unos valores para el campo de flujo en todo el dominio, deben introducirse valores iniciales a las diferentes variables que se van a calcular, es decir, los valores a partir de los cuales va a comenzar la iteración. Inicializarlo con unos valores próximos a las condiciones del estado estacionario que buscamos, ayudaran a acelerar el proceso hacia la convergencia, no obstante, en un principio no conocemos estos valores, por ello lo inicializaremos con los valores por defecto.

Initial Values	
Gauge Pressure [Pa]	0
X Velocity [m/s]	0
Y Velocity [m/s]	0
Z Velocity [m/s]	0
Turbulent Kinetic Energy [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	1
Turbulent Dissipation Rate [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	1

Figura 7.7.- Valores de inicialización.

Con todo esto establecido podemos proceder a la simulación establecemos un número suficientemente elevado de iteraciones, en nuestro caso establecimos unas 3500 iteraciones, y damos comienzo al cálculo.

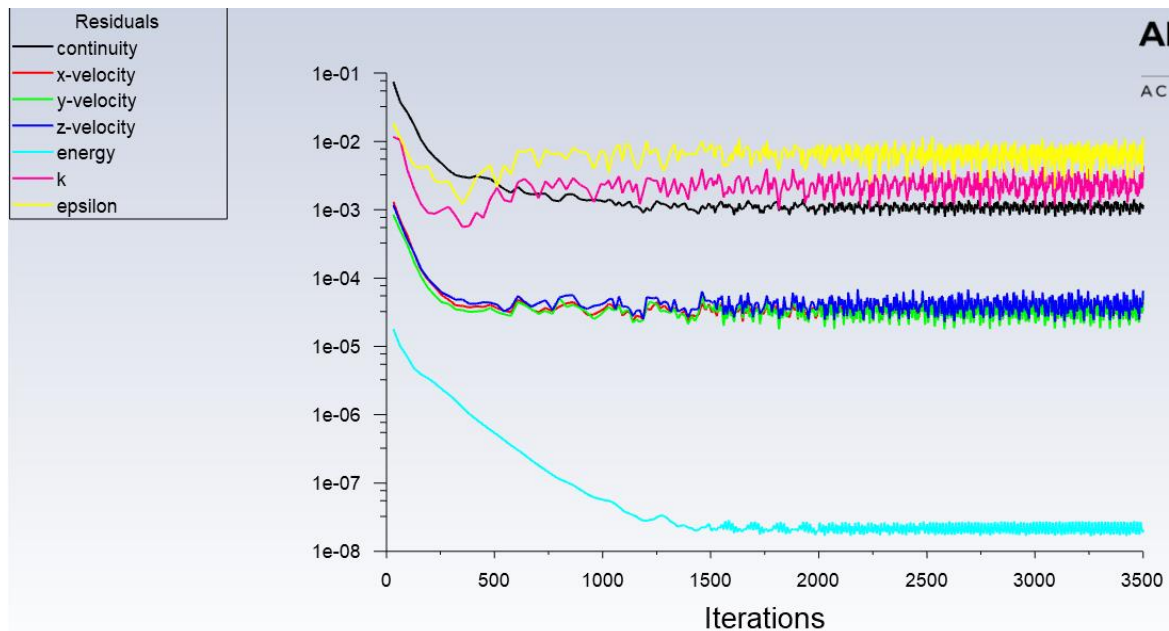


Figura 7.8.- Ejemplo de evolución de los residuos modelo Standard.

Como se puede observar en la gráfica de residuos estos se estabilizarán bastante antes de las 3500 iteraciones, aproximadamente desde las 1800-2000 iteraciones, comenzando a oscilar repetidamente, momento en el que ya consideramos que la solución converge.

iter	continuity	x-velocity	y-velocity	z-velocity	energy	k	epsilon	time/iter
3499	1.0507e-03	3.5354e-05	3.8665e-05	5.2559e-05	1.8894e-08	3.1122e-03	9.3001e-03	0:00:01
turbulent viscosity limited to viscosity ratio of 1.000000e+05 in 2 cells								
3500	1.1742e-03	4.3283e-05	5.5781e-05	6.5284e-05	2.0968e-08	4.3149e-03	1.1432e-02	0:00:00

Figura 7.9.- Valores de los residuos después de 3500 iteraciones modelo Standard.

## 8. VISUALIZACIÓN Y ANÁLISIS DEL RESULTADOS (POST-PROCESADO)

### 8.1 Introducción

El post-procesado consiste en la interpretación de la solución obtenida una vez las ecuaciones de gobierno han convergido. Todos los programas comerciales cuentan con gran cantidad de herramientas de visualización de los valores de las variables buscadas, desde mapas de colores, gráficos, informes de texto, animaciones, impresiones de vectores, etc.

Como hemos comentado en apartados anteriores existen, y son conocidos, cierta cantidad de errores de cálculo numérico (debidos a las soluciones numéricas de las ecuaciones matemáticas) como errores en el modelo representado (debidos a la representación matemática de la realidad física) en los programas CFD, por ello deberemos tener en cuenta cierto grado de incertidumbre en los resultados con tal de asegurar una alta calidad en las soluciones propuestas.

Por ello, debe ser el usuario quien ha de decidir finalmente si el resultado obtenido se trata de una solución válida próxima a la realidad. Como en la mayoría de software utilizado en aplicaciones de ingeniería para facilitar el cálculo de problemas complejos, éste no puede ser tratado como una caja negra en la que se introducen una serie de parámetros o datos para obtener unos resultados, sino que hay que verificar y estar seguro del modelo empleado y los parámetros introducidos.

Después de haber realizado la simulación con ambos modelos de turbulencia comentados, el modelo estándar y el RNG, y observar las soluciones, nos damos cuenta de que las soluciones no difieren prácticamente una de la otra, al menos al nivel que nos es de interés para este trabajo, en el cual buscamos conocer el comportamiento del flujo de ventilación en toda la sala de máquinas, sin que las soplantes y el ventilador del sistema de ventilación extraigan un caudal de aire excesivo, el cual no permita a los conductos de entrada reponer esta escasez de aire en la habitación lo suficientemente rápido, de forma que se perjudicarían los flujos de entrada de aire en los compresores lo que provocaría el mal funcionamiento del sistema de ensayo de la sala conjunta.

Por ello, a pesar de las mejoras que introduce el modelo RNG respecto al modelo estándar, para nuestro caso de estudio, resulta indiferente que modelo de los dos utilicemos.

### 8.2 Análisis de la solución

Al tratarse de una geometría en 3D, con tal de poder observar el comportamiento del fluido en el interior de la habitación en zonas que no se encuentren pegadas a la pared, estableceremos diferentes planos que cortaran la sala de máquinas de diferentes formas cerca de las zonas de interés.

Estos planos se deben crear dentro de la sección *Surfaces* en el apartado de resultados, con estos planos sobre todo buscaremos cortar la habitación en la misma trayectoria que debería seguir el flujo de aire principalmente, esto será desde las entradas de ventilación, la trayectoria de entrada a las soplantes y la trayectoria hacia la salida del conducto de ventilación, también se colocarán otros planos que corten la trayectoria del aire de forma transversal de forma que podamos conocer a que altura y en qué lugar se desplaza mayor cantidad de aire, así



como llegar a conocer el ciclo de movimiento que seguirá el aire, y colocaremos planos que corten las soplantes, los cuales nos ayudaran a conocer cómo evoluciona la temperatura del aire al tocar las paredes de las soplantes.

### 8.2.1 Movimiento del aire

Para poder visualizar y conocer el movimiento del aire, haremos uso de mapas de vectores que nos muestren la velocidad y dirección del aire en puntos de la habitación, y de los denominados *Pathlines*, los cuales nos mostraran la trayectorias que siguen ciertas partículas de aire dentro de la sala de máquinas.

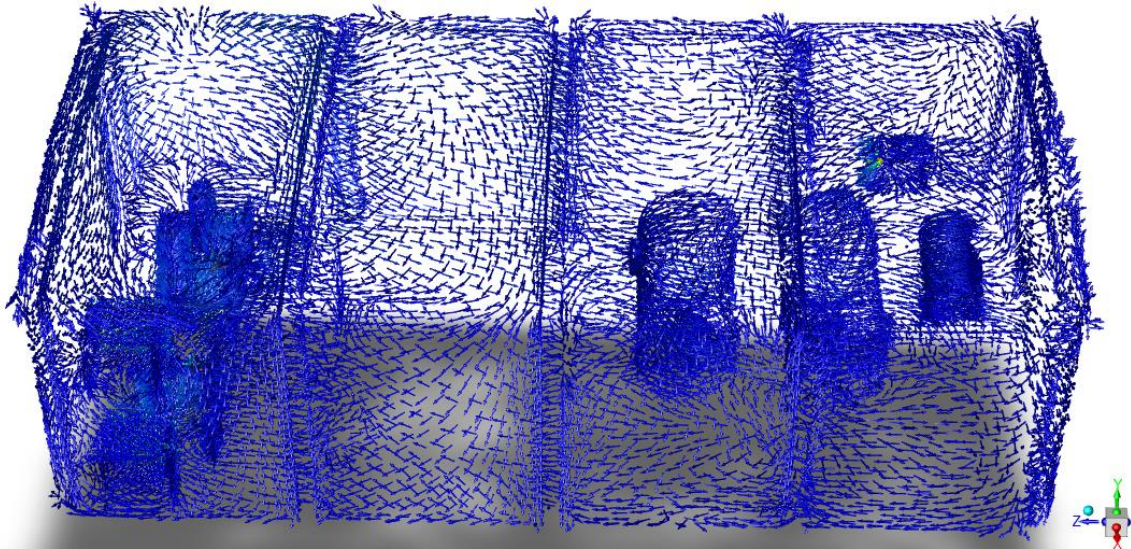


Figura 8.1.- Movimiento general próximo a las paredes, techo y objetos de la habitación.

En la Figura 8.1 se puede observar una vista general de la trayectoria que sigue el fluido (aire), a partir de vectores de la velocidad del flujo, en zonas pegadas a las paredes, columnas, vigas, techo, los conductos de ventilación, calderines, etc. Ahora haremos uso de los diferentes planos que hemos creados para entender mejor la ventilación, en el centro de la sala.

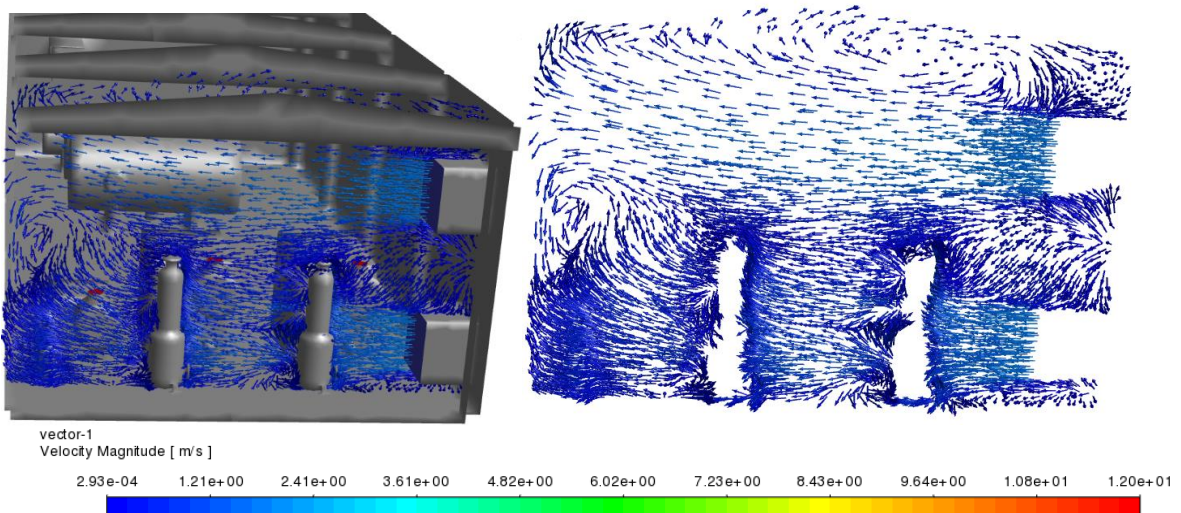


Figura 8.2.- Mapa de velocidad en la entrada de ventilación.

Las imágenes de la Figura 8.2 nos ayudan a ver como se produce la entrada de aire, con cierta velocidad desde los conductos de ventilación, envolviendo y sobrepasando los filtros de impulsión que se encuentran enfrente de los conductos.

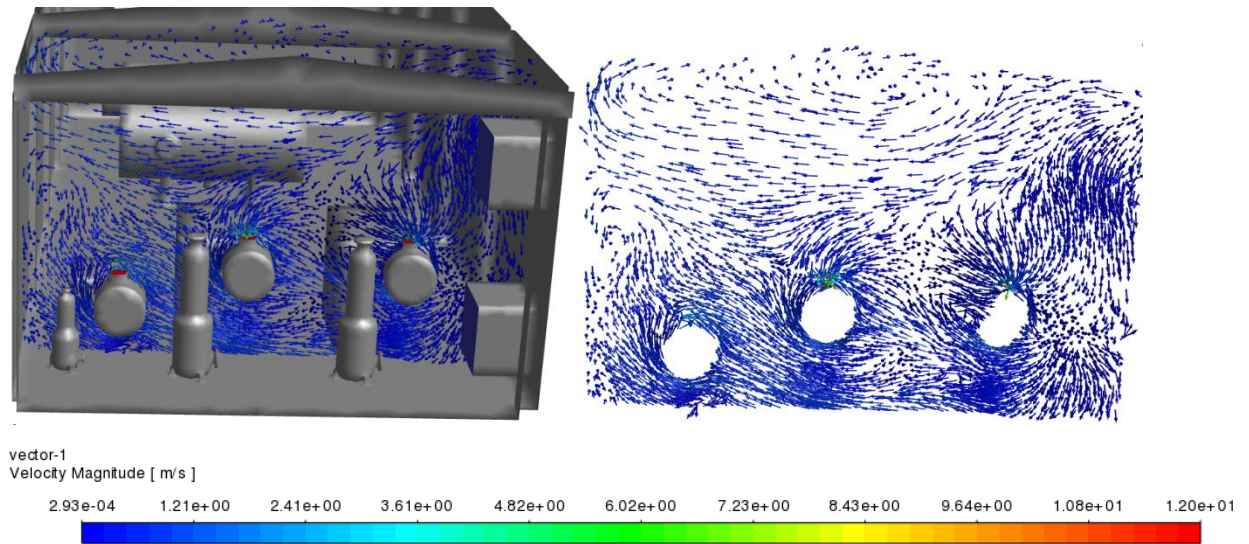


Figura 8.3.- Mapa de velocidad en la entrada de las soplantes (Vectores).

Las imágenes de las Figuras 8.3 y 8.4 nos muestran cómo se está produciendo la absorción de aire por parte de las soplantes.

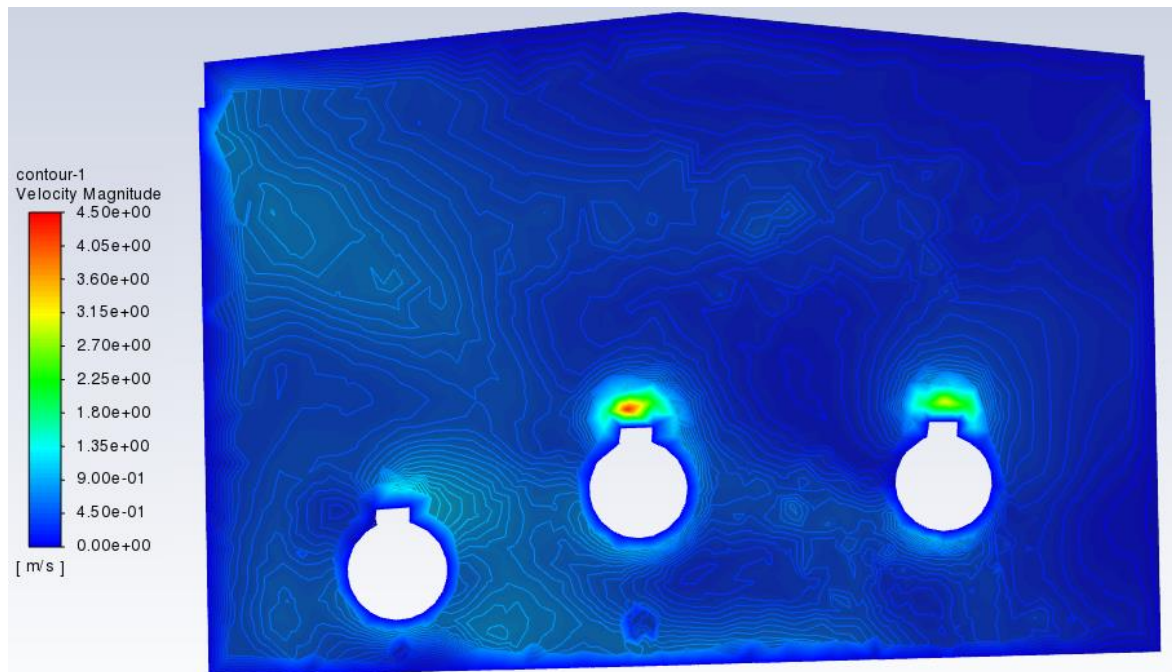


Figura 8.4.- Mapa de velocidad en la entrada de las soplantes (Contornos).



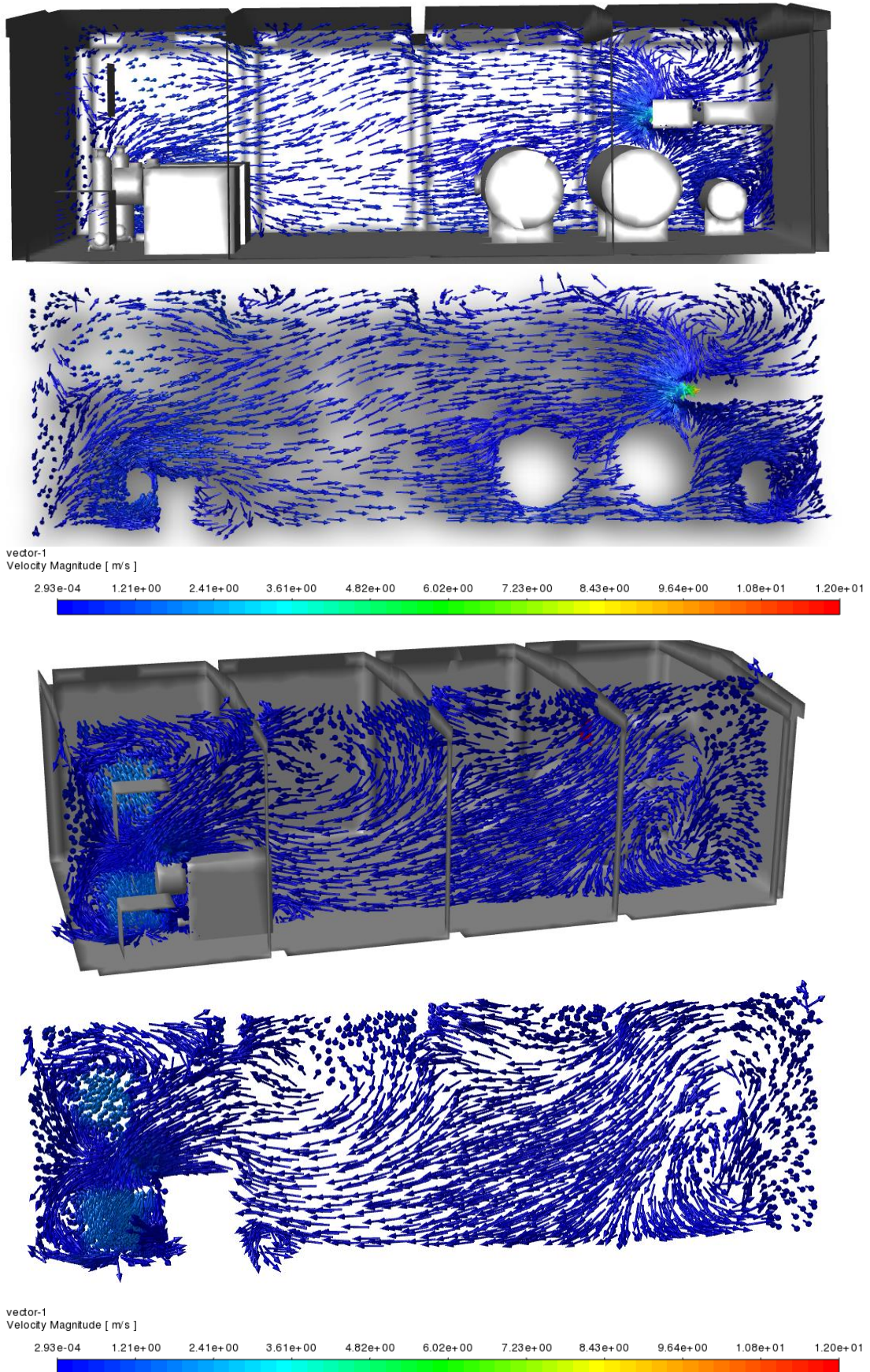
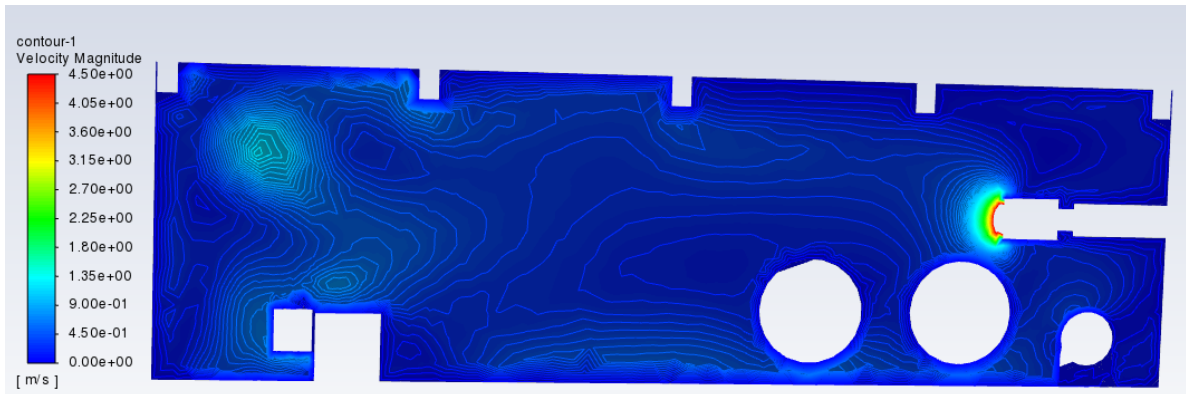


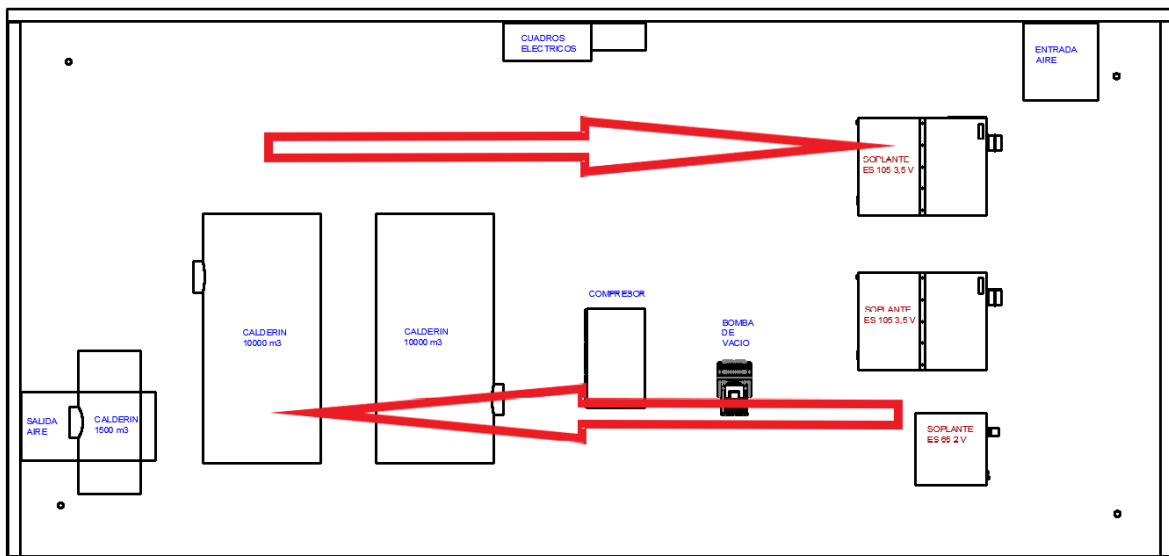
Figura 8.5.- Mapas de velocidad en planos perpendiculares a los pórticos (Vectores).

En las Figuras 8.5 y 8.6 mostramos cómo se produce el desplazamiento del aire a lo largo de la habitación con planos perpendiculares a los pórticos, en la Figura 8.5 en las imágenes de arriba nos encontramos con un plano que corta el conducto de salida de ventilación, donde podemos observar cómo se produce un aumento de la velocidad cerca de la salida, y podemos destacar como los calderines son envueltos por el aire, produciendo una pequeña aceleración en este.



**Figura 8.6.- Mapas de velocidad en planos perpendiculares a los pórticos (Contornos).**

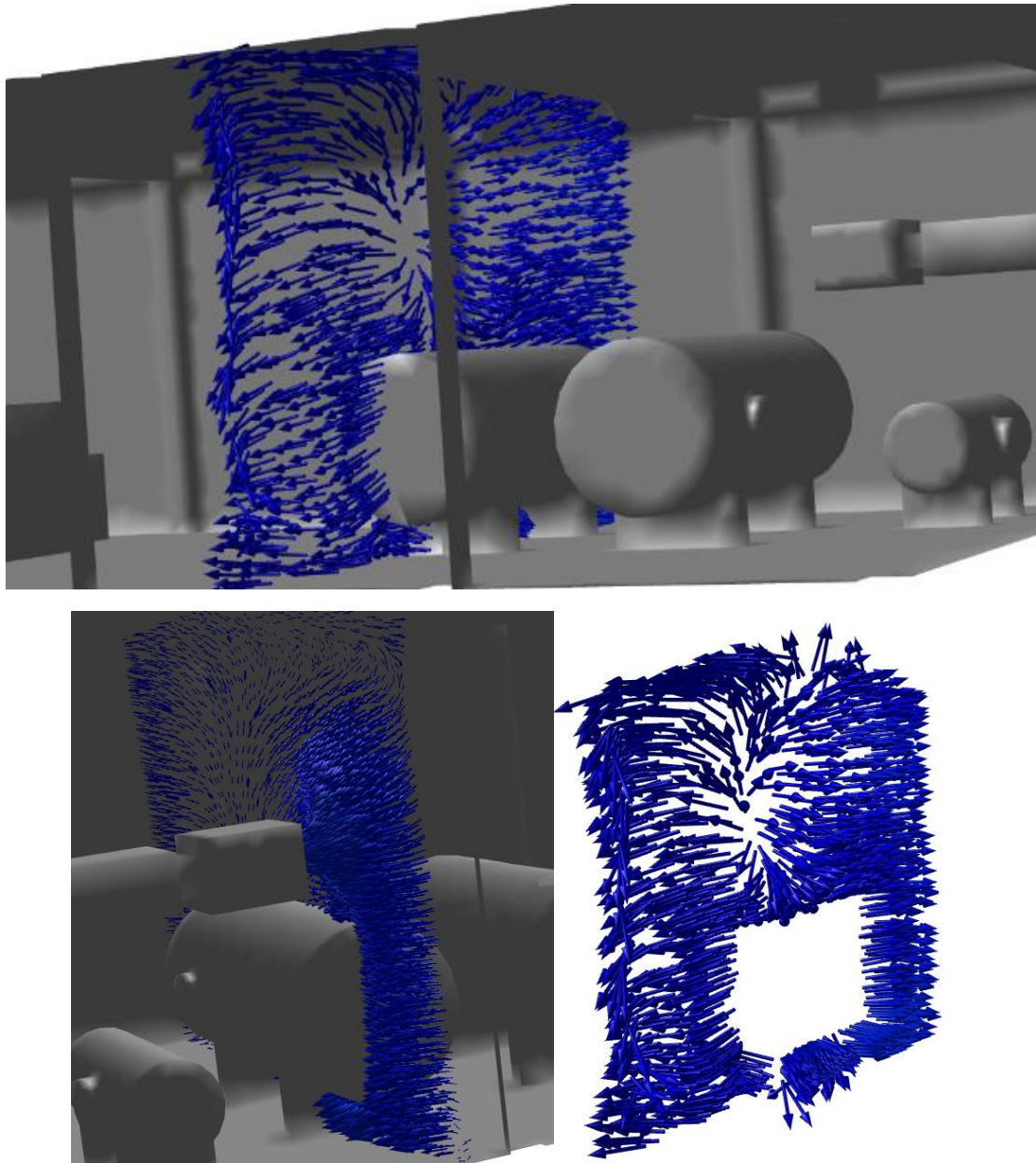
A partir de estos mapas también podemos comenzar a comprender el ciclo de movimiento que sigue el aire. En la zona donde se encuentra la salida de ventilación (parte de abajo si nos fijamos en la Figura 8.7) el flujo de aire avanza en dirección desde los filtros y las soplantes hacia la salida de ventilación y los calderines, mientras que, en la otra parte (parte de arriba en la Figura 8.7), la trayectoria principal del aire es contraria desplazándose desde la zona de calderines hacia las soplantes de vuelta. Realizando un giro horario alrededor de la sala de máquinas.



**Figura 8.7.- Vista de planta de la sala de máquinas con direcciones de los flujos principales de aire.**

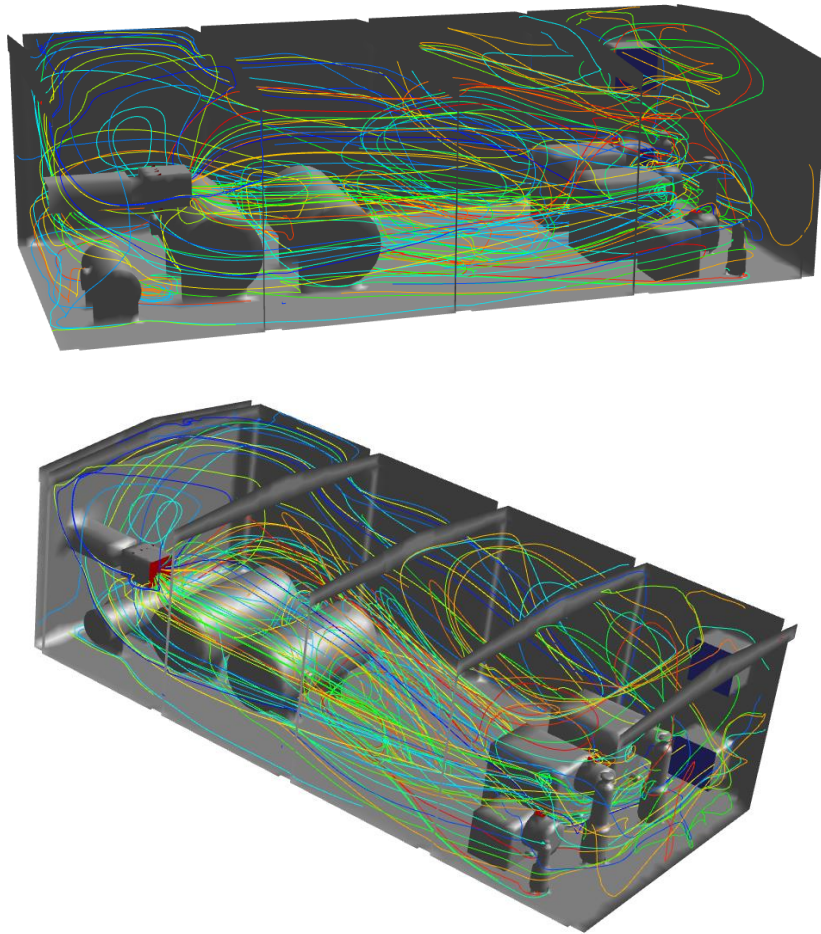
Este comportamiento lo comprenderemos mejor con el uso de los siguientes planos paralelos a los pórticos y los *Pathlines*.





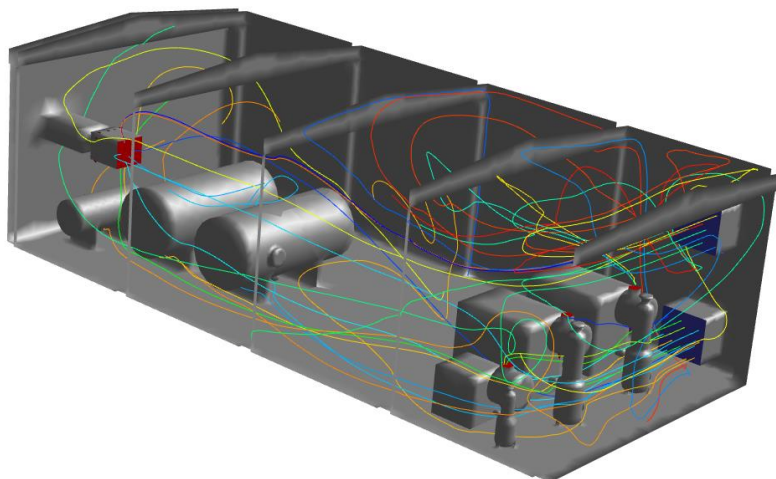
*Figura 8.8.- Mapas de velocidad en planos paralelos al pórtico.*

En las imágenes de la Figura 8.8 podemos distinguir de forma mucho más clara como una parte de la habitación contiene el flujo de aire que se mueve en dirección a la salida de ventilación y como la otra parte, la cual es menos ancha que la primera, contendrá mayoritariamente flujo de aire que se dirigirá de vuelta hacia las soplantes.



*Figura 8.9.- Pathlines 1*

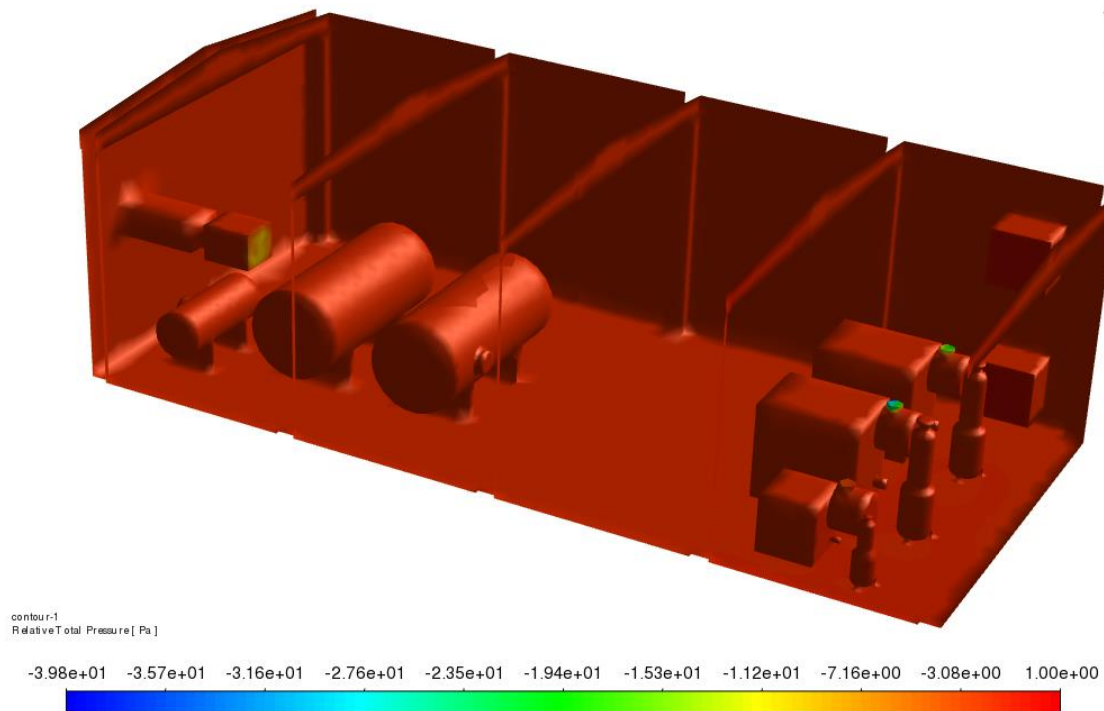
Por último, gracias a los *Pathlines* de las Figuras 8.9 y 8.10 podemos acabar de observar y conocer los principales trayectos que seguirá el flujo de aire, de forma continua y completa, viajando de las entradas a las salidas de ventilación o de las entradas a los filtros de admisión de las soplantes. Y como el resto de flujo que no es absorbido por la ventilación o el sistema de ensayos, la mayoría de este describe una trayectoria circular en sentido horario alrededor de toda la sala, pero también existe otra cantidad menor, la cual se queda “encajada” entre los bloques que forman las vigas y columnas de dos pórticos, formando remolinos.



*Figura 8.10.- Pathlines 2*

### 8.2.2 Presiones en la sala de máquinas

Una forma adecuada de conocer que en estas condiciones de funcionamiento no se produce una escasez de aire en la habitación, es mediante los mapas de presión.



*Figura 8.11.- Mapa general de presiones relativas totales.*

La presión total es la presión debida al grado de compresión del aire y a su movimiento. Es la suma algebraica de la presión dinámica y de la presión estática en un punto. Así el aire está en reposo, la presión total será igual a la presión estática. Y la presión relativa total es la resta entre la presión total pero relativa a la presión atmosférica.

En la imagen de la Figura 8.11 se observa que la presión es prácticamente la atmosférica (color rojo) en toda la habitación, a excepción de las zonas de admisión de las soplantes y de la salida de ventilación, donde se encuentra instalado el ventilador del sistema de ventilación, zonas donde existirán presiones menor que la atmosférica (colores verdes y azules). Esto es normal ya que estas máquinas funcionan generando una depresión en su interior, la cual sirve para poder producir la absorción del flujo.

No obstante, para conocer si el funcionamiento de estas partes es correcto y no generan una absorción excesiva del aire de la sala, hacemos uso de los mapas de colores de las Figuras 8.12 y 8.13.

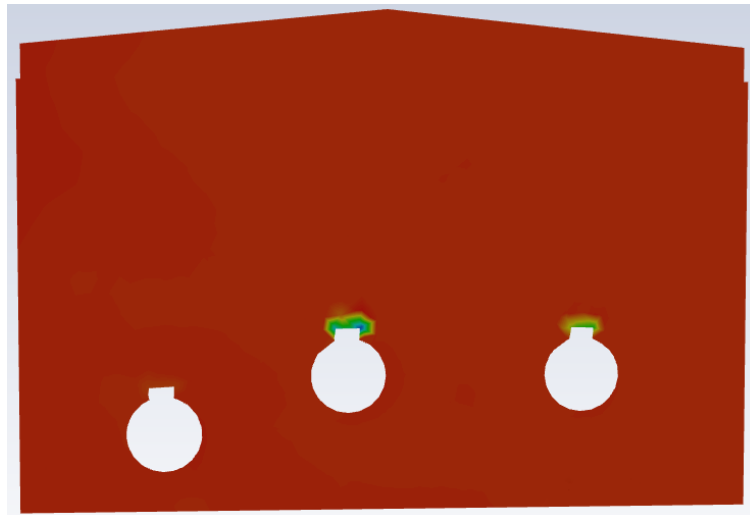


Figura 8.12.- Mapa de presiones relativas totales en los filtros de admisión.

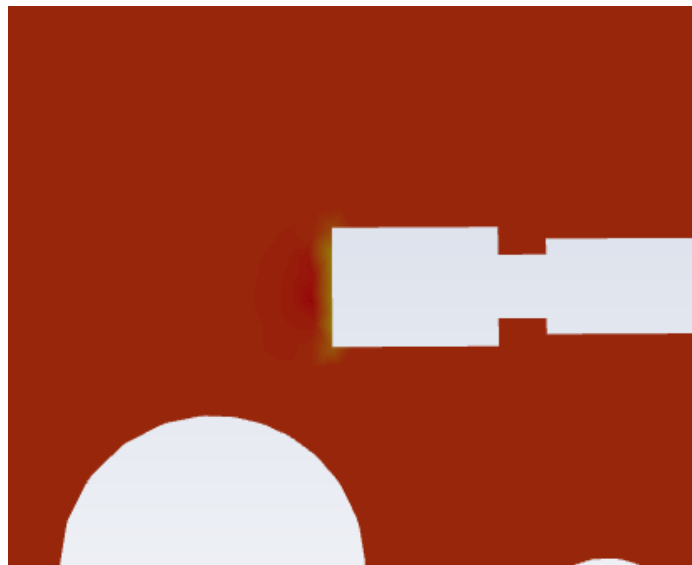


Figura 8.13.- Mapa de presiones relativas totales en la ventilación de salida.

El funcionamiento no sería el buscado, si las zonas de depresión generadas por las maquinas se prologarían excesivamente lejos alrededor de estas, como podemos observar estas zonas son prácticamente inexistentes en la soplante pequeña y el conducto de ventilación, y muy reducidas en las soplantes grandes, el lugar más desfavorable lo tendremos en la soplante grande que se encuentra más alejada de los conductos de entrada de aire, colocada en medio de la habitación. No obstante, este efecto tan cerca de las soplantes es esperado, pero no afectara al caudal de absorción de las soplantes al ser tan reducido.

### 8.2.3 Temperaturas

Por último, se realizó el análisis de la temperatura del aire en la sala, con tal de comprobar si la refrigeración del sistema de ventilación es suficiente para garantizar unas condiciones seguras de trabajo en la sala.

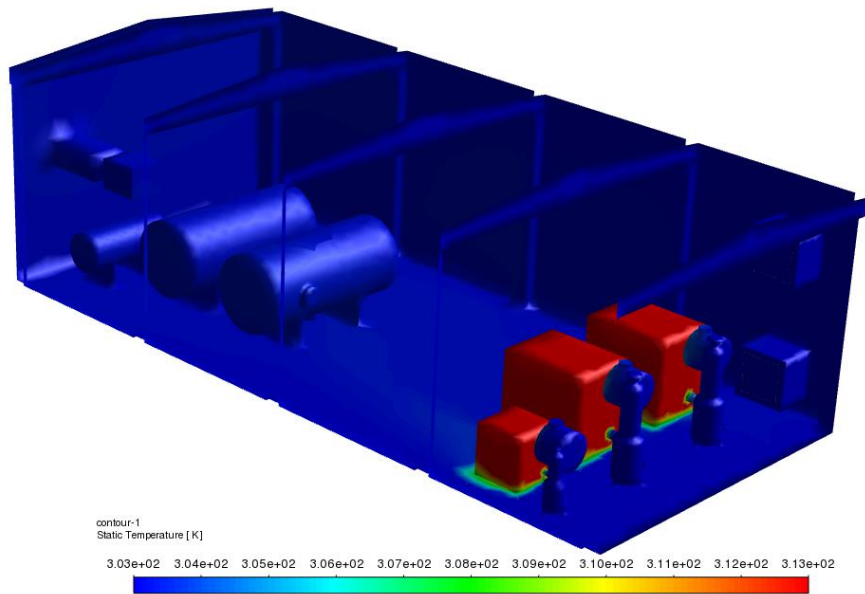


Figura 8.14.- Mapa general de temperaturas en la sala de máquinas.

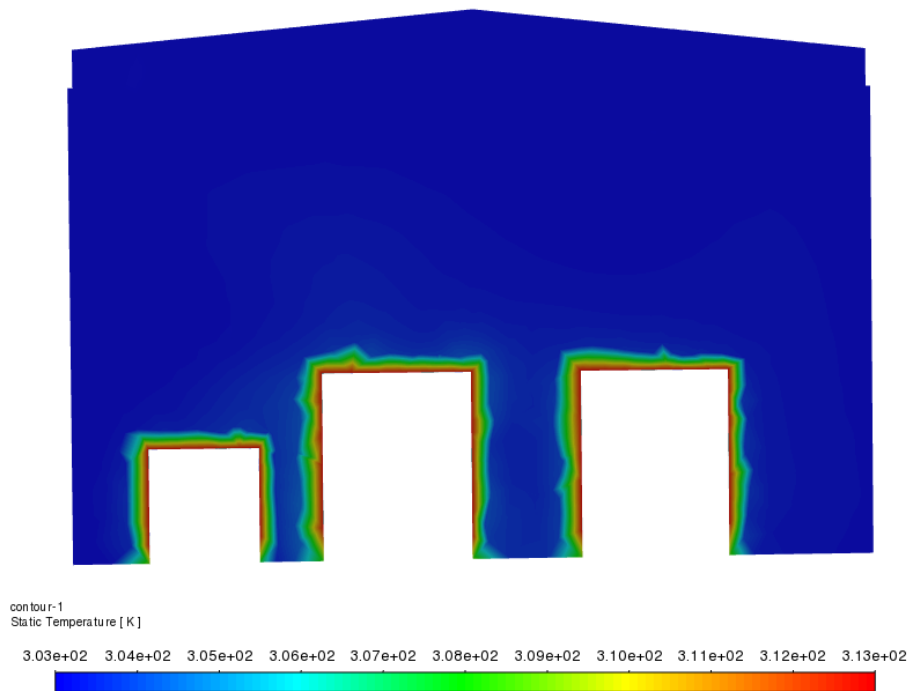


Figura 8.15.- Mapa de temperaturas en las soplantes.

Como nos muestra la Figura 8.15, la temperatura superior de las paredes de las soplantes, calienta el aire cercano mediante conducción y convección, aunque este rápidamente es enfriado por el resto del flujo volviendo a la temperatura que se encuentra el aire del resto de la sala.

Estas temperaturas del aire de unos 30 grados no alcanzan a ser peligrosas para la salud de los trabajadores, no obstante, sí que suponen una situación de incomodidad, situación que solventaríamos con aparatos de climatización (aires acondicionados), pero al tratarse de una sala de máquinas cuyo acceso debería ser esporádico y limitarse únicamente a actividades de mantenimiento, no se plantea el gasto en la instalación de un sistema de aire acondicionado.



## 9. Recomendaciones y modificaciones

Como consecuencia del trabajo realizado, el cual se ha intentado plasmar y dejar reflejado en la presente memoria, podemos extraer una serie de observaciones y conclusiones interesantes relacionadas con los sistemas de ventilación industriales y el uso de técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional para el análisis y caracterización de los sistemas de ventilación previo a su instalación final. Estas conclusiones se analizan por separado en cada uno de los apartados siguientes.

### 9.1 Normativa ventilación industrial

En España respecto a la normativa de ventilación industrial, es cierto que no existe un reglamento claro respecto a las naves industriales, aunque debemos de saber que la calidad del aire es algo esencial y que debe respetar unos mínimos para que el trabajador respire un aire adecuado dentro de las posibilidades del habitáculo.

El Decreto RD-427, es el único que contempla las naves industriales y regula la ventilación en este tipo de naves. En este decreto se detalla y exige que el aire de tu nave industrial se renueve ciertas veces por hora por trabajador, estableciendo una renovación mínima de 30 m<sup>3</sup>/h por trabajador, y en el caso de que exista problemas de humo en la nave industrial, la renovación tiene que ser de 50 m<sup>3</sup>/h.

Como podemos observar en esta situación normativa que el Decreto presenta cierta antigüedad al tener presencia de humos presente en interiores. Si atendemos a nuestra realidad industrial diaria, la ventilación propuesta por esta normativa suele ser cuantitativa y cualitativamente insuficiente, puesto que solo tiene en cuenta la renovación por persona, sin especificar nada sobre el tamaño del recinto, la capacidad de contaminación o las necesidades especificadas en cada tipo de sector o trabajo. Por ejemplo, en el caso de recintos que pueden tener miles de metros cuadrados y trabajen únicamente unas pocas personas, lo que sería legal sería drásticamente insuficiente para garantizar el confort en el puesto de trabajo.

Obviamente en nuestro caso, al tratarse de una sala de máquinas libre de humos, cuyo acceso se limitaría casi exclusivamente al mantenimiento, y que como mucho podríamos encontrar 4 trabajadores a la vez en la habitación, las exigencias que impondría la normativa serían muy fáciles de cumplir, siendo en este caso una renovación de al menos 120 m<sup>3</sup>/h.

Por ello más allá de la normativa, para que la calidad del aire de una nave industrial sea saludable, es recomendable tener en cuenta el volumen del recinto y las condiciones. Considerándose óptimo y recomendable que se den entre 4 a 10 renovaciones por hora de todo el aire contenido en la habitación. De este modo, es necesario realizar un número de renovaciones cada hora en función del volumen a ventilar, teniendo así en cuenta el tamaño de la zona industrial y no solo el número de trabajadores.

Nuestra sala de máquinas tiene aproximadamente un poco menos de 800 m<sup>3</sup>, para que esté ventilada esta habitación debería tener una renovación de aire de entre 3200 a 8000 m<sup>3</sup> por hora, lo que es mucho más que lo requerido por la normativa de ventilación en naves industriales.

La renovación del aire en la estancia la mediremos a través del caudal de aire que moverá el sistema de ventilación. En el escenario que hemos estudiado, establecimos la condición de que el ventilador funcionara a la máxima potencia posible, suponiendo unas

condiciones de temperaturas elevadas, en este caso el caudal de aire desplazado por el ventilador es de 10500 m<sup>3</sup>/h, cumpliendo de sobra las recomendaciones de renovación de aire (sin añadir el gasto de aire que tendrán las soplantes en funcionamiento que aumentarían aún más la cantidad de aire renovado). Por ello, nos debemos situar en las condiciones que sean más desfavorables respecto a la renovación de aire.

Estas condiciones se darán cuando ninguna soplante se encuentre trabajando y las condiciones de temperatura y presión sean poco exigentes y hagan al ventilador funcionar a su mínima velocidad posible, la cual podrá ser elegida por el propio usuario.

El propio fabricante de las cajas de ventilación nos ofrece una serie de tablas para sus diferentes modelos, mostrándonos ciertas condiciones de funcionamiento que resultan recomendadas. Para nuestro modelo, el TBD 15/15, el fabricante nos proporciona la Tabla 9.1.

Tamaño	Caudal		Vel.Imp.	Pres.Din(Pd)	Potencia	Presión Estática Pst (Pa)												
	V(m <sup>3</sup> /h)	V(m <sup>3</sup> /s)	C(m/s)	Pd(Pa)	rpm	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
TBD-S-15/15	6.190	1,72	9,0	49	Pe motor(kW)	0,75	0,75	1,1	1,1	1,5	1,5	2,2	2,2	2,2	2,2	3,0	3,0	3,0
					n (min <sup>-1</sup> )	480	550	620	690	750	810	870	920	980	1030	1080	1130	1180
	6.880	1,91	10,0	60	Pe motor(kW)	0,75	1,1	1,1	1,5	1,5	2,2	2,2	2,2	2,2	3,0	3,0	3,0	3,0
					n (min <sup>-1</sup> )	500	570	630	700	760	810	870	920	970	1020	1070	1120	1180
	7.570	2,10	11,0	73	Pe motor(kW)	1,1	1,1	1,5	1,5	2,2	2,2	2,2	3,0	3,0	3,0	3,0	4,0	4,0
					n (min <sup>-1</sup> )	520	590	650	710	760	820	870	920	970	1020	1060	1110	1150
	8.260	2,29	12,0	87	Pe motor(kW)	1,1	1,5	1,5	2,2	2,2	2,2	3,0	3,0	3,0	3,0	4,0	4,0	4,0
					n (min <sup>-1</sup> )	550	610	670	720	770	830	880	920	970	1020	1060	1110	1150
	8.940	2,48	13,0	101	Pe motor(kW)	1,5	1,5	2,2	2,2	2,2	3,0	3,0	3,0	3,0	4,0	4,0	4,0	4,0
					n (min <sup>-1</sup> )	570	630	680	740	790	840	880	930	980	1020	1060	1110	1150
	9.630	2,68	14,0	118	Pe motor(kW)	2,2	2,2	2,2	3,0	3,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	---
					n (min <sup>-1</sup> )	600	650	710	760	800	850	900	940	980	1030	1070	1110	---
	10.320	2,87	15,0	135	Pe motor(kW)	2,2	2,2	3,0	3,0	3,0	3,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	---	---
					n (min <sup>-1</sup> )	630	680	730	780	820	870	910	950	990	1030	1070	---	---
	11.010	3,06	16,0	154	Pe motor(kW)	3,0	3,0	3,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	---	---	---	---
					n (min <sup>-1</sup> )	660	710	750	800	840	880	930	970	1010	---	---	---	---

Selección Silenciosa
  Selección Estandar
  Selección Industrial

Tabla 9.1.- Condiciones de funcionamiento ventilador TBD 15/15.

Para un modelo de 1.5 KW observamos que un funcionamiento en condiciones silenciosas, por ejemplo, a 300 revoluciones por minuto nos ofrece un caudal volumétrico de aire de 6190 m<sup>3</sup> cada hora, de forma que cumpliríamos las recomendaciones mínimas de renovación de aire casi por el doble de lo recomendado. Por lo tanto, la selección del ventilador sería correcta. Podría llegar a ser posible disminuir el tamaño del ventilador, con tal de conseguir un ahorro económico, no obstante, se debería llevar a cabo un estudio con este cambio, y observar si en todas las demás condiciones el funcionamiento sigue siendo el esperado.

### 9.2 Refrigeración de las máquinas.

Las máquinas de desplazamiento positivo (compresores de lóbulos) son las máquinas que tienen una mayor generación de calor de entre todas las que nos encontramos dentro de la sala máquinas, y por ello son la máquinas que necesitan de una mejor refrigeración, tanto para mantener el buen funcionamiento de estas, como para evitar que se genere un calor excesivo en la sala que afecte a otras máquinas y a las condiciones de confort de los trabajadores.

El conjunto del compresor más refrigeración, lo que denominamos soplante, es prediseñado y montado por el propio fabricante/proveedor de soplantes. Por lo que nosotros obtendremos directamente las cajas metálicas, con todo el resto de los componentes en su

interior. De esta manera, el estudio del buen funcionamiento de la refrigeración de estas máquinas no queda en nuestra manos y es el propio fabricante quien nos indica las temperaturas máximas que podrán alcanzar las paredes de las envolventes de las soplantes.

La temperatura de 40 grados centígrados que pueden llegar a alcanzar las paredes de las envolventes no es muy elevado, y como hemos observado los sistemas de ventilación son más que suficientes para evitar la acumulación del aire a alta temperatura en la sala, gracias en concreto a la disposición y cercanía de los conductos de entrada de ventilación, sobre todo del conducto que se encuentra más abajo, a la altura de las soplantes, el cual en las primeras propuestas del proyecto no estaba prevista su instalación y fue incluido a posterior como una mejora en el sistema de ventilación.

No obstante, hemos de indicar que existirá cierta generación de calor por radiación en las soplantes, que podría producir un aumento de la sensación térmica cerca de estas. Esta radiación en su mayoría se verá mitigada gracias a los recubrimientos y protecciones térmicas que formaran las cajas que envuelven a las soplantes, pero se puede llegar a aumentar en 2 o 3 grados centígrados la sensación térmica cerca de las soplantes en condiciones de máxima potencia, lo cual no será prácticamente perceptible y no afectara de forma excesiva al confort térmico de aquellos que entren en la sala.

### 9.3 Alimentación de las soplantes

#### 9.3.1 Fases iniciales

Cuando procedemos al diseño de un sistema de ventilación de naves industriales es vital tener en cuenta la instalación del sistema de ventilación. Para que cualquier sistema de ventilación funcione de forma correcta, aparte de determinar el tipo de ventilador a instalar y el caudal necesario que debe mover, debemos estudiar y hay que prever un punto o puntos por donde debe de penetrar el aire exterior que será el encargado de substituir al interior, y por que punto o puntos deberemos instalar los conductos de salida del aire al exterior.

De forma general, estos deben ser situados de tal manera que la corriente de aire que creemos entre los conductos de entrada y los de salida consiga “barrer” por completo toda la zona afectada, evitando formar posibles recirculaciones dentro del habitáculo.

En fases iniciales del proyecto del laboratorio de ensayos de ventosas, se tuvieron en consideración otros tipos de distribuciones previas del sistema de ventilación, hasta llegar a la distribución propuesta en el presente trabajo.

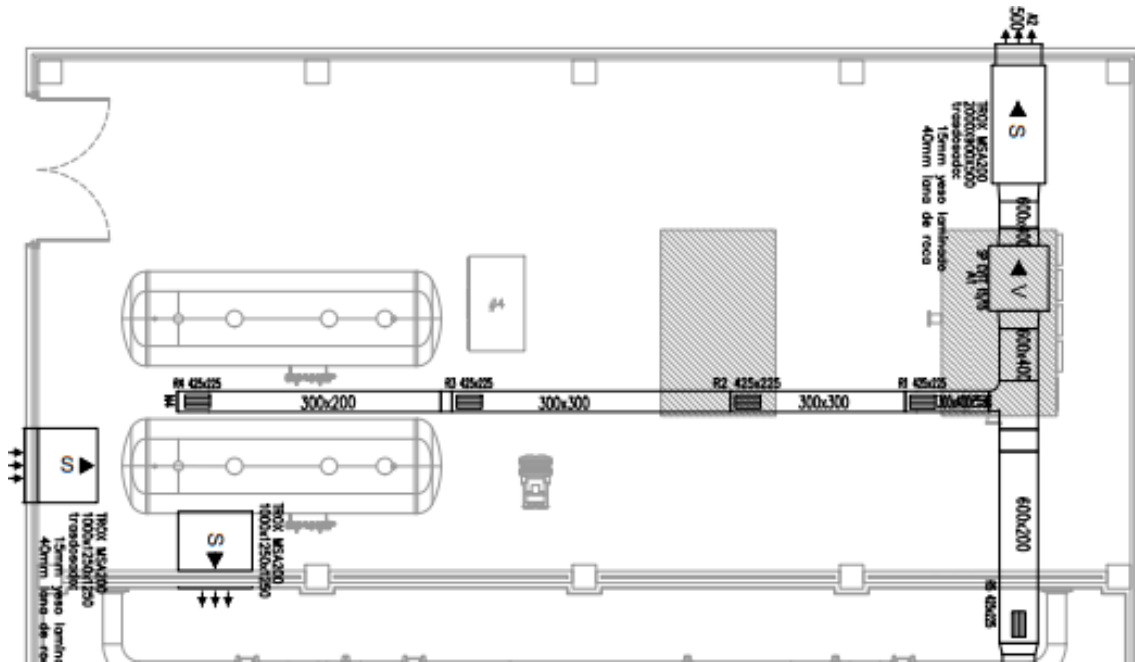


Figura 9.1.- Diseños iniciales del sistema de ventilación.

Las primeras propuestas fueron como la presentada en la Figura 9.1, proponiendo un punto de entrada de aire cerca de los calderines, en el mismo lugar donde ahora encontramos el conducto de salida, y establecer diversos puntos de extracción de aire a lo largo de sala de máquinas, a través de conductos colocados en el techo, que llevaran el flujo a un punto de salida común cerca de las soplantes, en el lugar donde ahora encontramos los conductos de entrada. A parte de esto se pretendía que el sistema de ventilación de la sala de ensayos y la sala de máquinas fuese común, colocando un conducto de ventilación que estableciera una conexión entre ambos habitáculos y que los conductos de salida también recorrieran la sala de ensayos estableciendo puntos de extracción.

Con esta propuesta conseguimos que la corriente de aire “barriera” de izquierda a derecha la mayor parte de la sala, sin embargo, como podemos observar al producirse extracciones parciales conforme el flujo de aire avanza hacia la izquierda, las soplantes más pegadas a la pared derecha podrían sufrir de insuficiente corriente de aire que sirviera de refrigeración y para suplir la absorción de aire de las soplantes en funcionamiento.

Los conductos de extracción y las soplantes en esta propuesta se encuentran instalados relativamente cerca, esto puede llevar a producir una absorción excesiva de aire en esta zona del habitáculo, que puedan llegar a afectar a los flujos de entrada de aire a las soplantes y por lo tanto al sistema de ensayo, al no poder reponer este aire consumido lo suficientemente rápido.

La distribución de la diferente maquinaria para la producción de aire, como observamos en la Figura 9.1, en las primeras propuestas también era diferente a la que finalmente hemos recomendado y simulado (para mayor detalle ver el Anejo 02).

### 9.3.2 Modificaciones

A partir de estas propuestas iniciales se decidieron realizar una serie de cambios sobre estas, con el objetivo de mejorar el flujo de aire a partir de modificaciones en el sistema de ventilación. Por lo que se fueron presentando diferentes propuestas.

Una de las primeras propuestas, fue la de retirar los conductos de salida de ventilación que entraban en la habitación, y establecían diferentes puntos de extracción de aire en el medio del habitáculo, y reducir la extracción de aire únicamente a un punto de salida en la pared formado por un silenciador y la caja de ventilación que contiene el ventilador (extractor axial), y se intercambiaron los puntos de ventilación instalando los conductos de extracción en el lugar donde estaban los de entradas, y viceversa con los conductos de entrada. Por último, en este momento se decidió separar el sistema de ventilación de la sala de máquinas del de la sala de ensayos, eliminando las aperturas que conectan ambas salas, lo que permitirá el diseño independiente del sistema de ventilación para cada habitación.

Más adelante, a partir de estas modificaciones se decidió realizar un cambio en la distribución de los elementos de producción de aire en la sala, de forma que las soplantes quedaran más cercanas al punto de entrada de ventilación y alineadas al flujo de entrada que se producirá en esta zona, de forma que mejoremos la refrigeración de las soplantes y facilitemos la absorción de los compresores. De igual modo, el resto de los elementos fueron redistribuidos para que fueran envueltos por el flujo de corriente esperado. Esta distribución es la definitiva la cual podemos observar en la Figura 9.2 y también representada en el apartado Ensamblaje durante la construcción de la geometría.

Por último, se decidió a parte del conducto de entrada diseñado, el cual encontramos a unos 3.5 metros del suelo instalar otro de las mismas características por debajo de este a una altura de 0.5 m, de forma que obtengamos una corriente de aire que se encuentre directamente a la altura de las soplantes, mejorando de igual forma la refrigeración de las soplantes y la cantidad de aire de entrada para ser absorbido por los compresores.

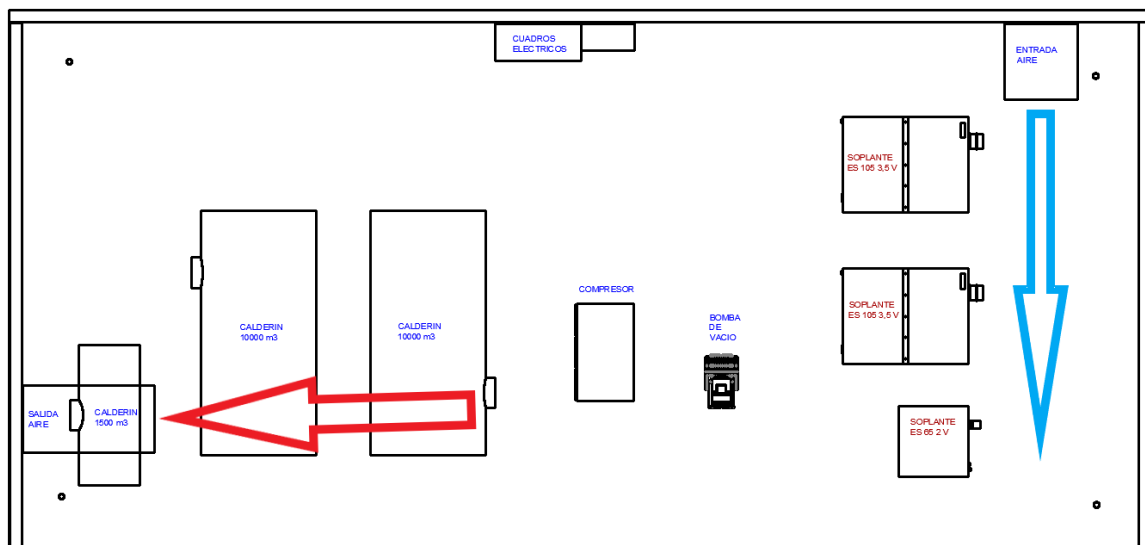
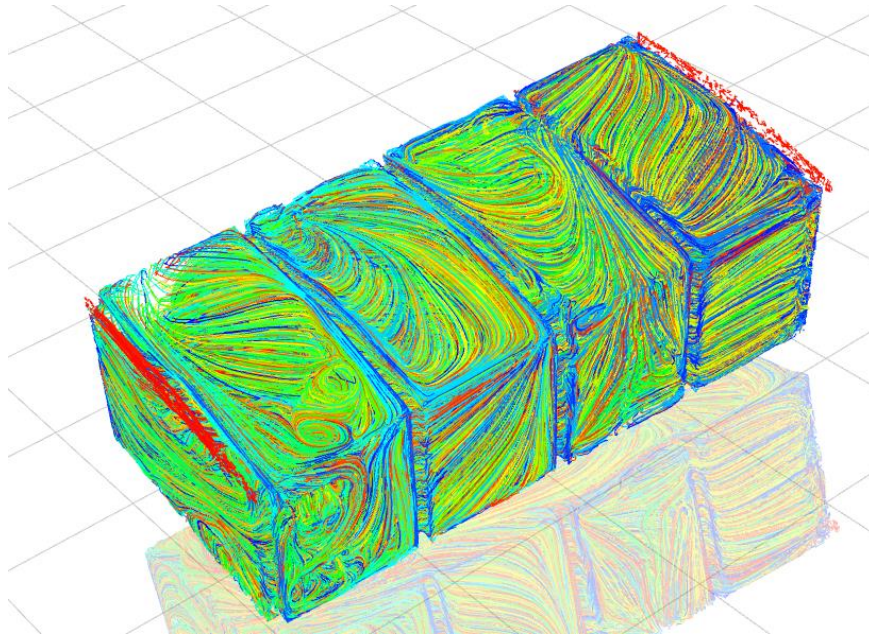


Figura 9.2.- Entradas y salidas de aire por los conductos de ventilación.

Con este diseño, como hemos observado en los mapas de velocidad y los *Pathlines* de apartados anteriores hemos logrado conseguir un flujo de corriente de aire que “barriera” por completo el habitáculo de derecha a izquierda (Figura 9.2) cubriendo los 5 metros de altura utilizable de los que dispone la sala de maquinaria. Consiguiendo sobre todo que la mayor cantidad de corriente de aire se produzca a los alrededores de las soplantes y los calderines, de forma que podremos garantizar la refrigeración de todos estos y proveer a los compresores de suficiente aire para el correcto funcionamiento del sistema de ensayos.

Respecto al resto de flujo que no es directamente absorbido por las soplantes o más adelante por el extractor, este acabará encontrándose la pared de la izquierda que reconducirá el aire de vuelta hacia las soplantes de nuevo, por el lado que encontraremos los cuadros eléctricos, de forma que este aire servirá de refrigeración para estos cuadros eléctricos y después podrán volver a ser absorbido por las soplantes o unirse al flujo que se dirige hacia el extractor de nuevo.



*Figura 9.3.- Recirculaciones entre pórticos (Pathlines 3).*

El mayor problema de recirculaciones dentro del habitáculo que se puede llegar a dar sería entre las columnas y sobre todo entre las vigas que forman los pórticos de en medio, donde cierta cantidad de flujo se podría quedar encajado pegado al techo dando vueltas entre dos vigas sin renovarse. Sin embargo, la altura y tamaño de las vigas tampoco es muy elevado y cómo podemos observar en las trayectorias que siguen las corrientes de aire que se nos muestran en la Figura 9.3 el flujo no suele tender a quedarse dando vueltas en círculos sobre el techo.

Ahora una opción que eliminaría por completo estas posibles recirculaciones y estancamientos de aire sería la de instalar un techo falso que cubriera las vigas y la parte interior del techo a dos aguas y aparte conseguir una reducción del volumen de aire que deberá ser recirculado. Aunque, lo más probable es que el gasto que supone la construcción de un techo falso no sea rentable para la pequeña mejora que supone para el sistema de ventilación, a no ser que existan otras ventajas en otros aspectos a raíz de este techo falso.

Por último comentar, como se evidencia en esta simulación principal (y en el resto de simulaciones en el Anejo 03), que el ventilador extractor que será instalado se encuentra sobredimensionado, ofreciendo a la mitad de su potencia, incluso menos, un funcionamiento más que suficiente para las condiciones de la habitación, por lo que resulta recomendable cambiar el extractor por uno de menor potencia o establecer una regulación en el extractor que lo haga trabajar a menor potencia, suponiendo de cualquiera de las dos formas un ahorro en costes.



### 9.3.3 Propuesta final

Todas estas modificaciones que se han ido realizando a la propuesta inicial han ayudado a diseñar un modelo final que resulta mucho más eficiente que el que encontramos en un principio. Eliminados los conductos de ventilación que cruzaban todo el habitáculo, proponiendo una distribución de los puntos de entrada y salida de ventilación mucho más eficiente para el trabajo que se va a desarrollar dentro de la sala, y separando los sistemas de ventilación de las dos diferentes salas que conforman el laboratorio, de forma que estableceremos un sistema de ventilación más especializado que cumpla los requisitos previstos para cada habitáculo por separado. Todo esto ha conllevado al final la instalación de un sistema de ventilación más barato y que asegure el buen funcionamiento y diseño de los flujos de entrada de aire al sistema de ensayo.

## 10. CONCLUSIONES

### 10.1 Los CFD en sistemas de ventilación

El objetivo principal del trabajo era demostrar como mediante el uso de las técnicas y modelos CFDs somos capaces de emular problemas de ingeniería con una solución semejante a la realidad. A lo largo del desarrollo del proyecto se han tenido que cometer simplificaciones, con tal de hacer que el problema pudiese ser solucionado con las herramientas disponibles.

Las limitaciones de los recursos disponibles respecto a la potencia de cálculo computacional y de tiempo de simulación que nos hayamos podido encontrar durante el desarrollo de este trabajo, nos ha llevado desde un principio a establecer diversas simplificaciones, como fue en la geometría, malla y algunas condiciones de contorno. Esto hace que la simulación y la solución puedan discernir en algunos pequeños aspectos de la realidad, y en un ámbito profesional con mayores recursos y tiempo, con mejores equipos conectados en red para la simulación en paralelo, se debería profundizar en mayor grado con tal de reducir estos errores al máximo.

Las simplificaciones que hemos ido realizando durante todo el trabajo, y hemos ido indicando a lo largo de esta memoria, se han ido analizando minuciosamente de forma que afecten lo mínimo posible o afecten únicamente a pequeños detalles que no resultan de importancia para el análisis que estamos realizando, por ejemplo, la forma en que el flujo de aire interactúe con los pomos y relieves de las puertas no es de interés, por ello no lo incluimos en el modelo a simular.

Por ello, a pesar de las limitaciones, la utilización de las técnicas CFDs para el diseño de sistemas de ventilación en el caso de este trabajo nos ha servido para conseguir un considerable ahorro de costes y poder comprobar que el diseño propuesto será totalmente funcional una vez instalado. Resultando totalmente recomendable para todo tipo de naves industriales en el que se deba de instalar un sistema de ventilación costoso, aunque no tengan unas condiciones de funcionamiento tan delicadas como la vista en este caso, el análisis y simulación en programas de cálculo computacional de sus sistemas de ventilación antes de su instalación. Ya que cada proyecto de nave industrial dispondrá de condiciones y características diferentes, y por lo tanto se deberá estudiar cada caso por separado de forma que se pueda diseñar un sistema de ventilación mucho más personalizado y específico para sus características.

### 10.2 Conclusiones del autor

Como autor del trabajo comentar que este trabajo no ha supuesto únicamente el uso de programas/software de análisis CFD (*Ansys*®), sino que se ha tratado de un trabajo donde los programas que se han utilizado han sido numerosos: *SolidWorks*®, *Inventor*®, *AutoCad*®, *Word*®, *Excel*®, etc. Y donde ha resultado necesario acoplar y transferir la información obtenida de un programa al posterior. En la mayoría de ellos disponía de cierto conocimiento previo sobre su uso, pero para muchas otras herramientas de estos softwares, el desarrollo de este trabajo ha sido de ayuda para profundizar en ellos y conseguir un mayor grado de experiencia en estos programas tan importantes en el campo de la ingeniería.

Este TFG ha sido el primer acercamiento a lo que podría tratarse de un trabajo profesional, en el cual aplicar todos aquellos conocimientos adquiridos durante estos años, de una forma muy diferente a los problemas o exámenes, enfocándonos a resolver un problema



de ingeniería completo. Problemas que no presentan una solución trivial, ni siquiera un método de resolución único y donde se han tenido que realizar investigaciones y esfuerzos intelectual muchas veces para poder continuar con el desarrollo

Para concluir, este trabajo ha representado un buen ejercicio que me ha servido en campos como el diseño y simplificación de piezas en CAD, el mallado y uso de técnicas de discretización y, sobre todo en el campo de la Mecánica de Fluidos la cual cada vez genera un mayor interés en mí. Dejando como resultado un buen ejemplo de cómo analizar un sistema de ventilación mediante técnicas CFD, el cual puede ser utilizado de manera orientativa para futuros análisis del estilo.

## 11. Bibliografía

- [1] **Jorge Flores-Velazquez, Juan I. Montero, Esteban J. Baeza, Juan C. Lopez** (February, 2014) Mechanical and natural ventilation systems in a greenhouse designed using computational fluid dynamics.
- [2] **John Wiley & Sons A/S** (2011) Indoor Air; 21: 442-453, CFD and ventilation research
- [3] **P. L. Iglesias-Rey**, Introducción a la mecánica de fluidos computacional, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia
- [4] **P. L. Iglesias-Rey**, Técnicas de mallado, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia
- [5] Dinámica de Fluidos Computacional:
- [6] Dinámica de Fluidos Computacional:  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Mec%C3%A1nica\\_de\\_fluidos\\_computacional](https://es.wikipedia.org/wiki/Mec%C3%A1nica_de_fluidos_computacional)
- [7] Apuntes Mecánica de fluidos, Universidad Politécnica de Valencia, Grado en ingeniería en tecnología industriales.
- [8] Normativa ventilación industrial: <https://navesmadrid.com/ventilacion-naves-industriales/>
- [9] <https://www.cfd-online.com/>
- [10] Mas normativa: <https://suministrointec.com/blog/ventilacion-industrial-normativa-recomendaciones/>
- [11] ANSYS Fluent Theory Guide (November 2013):  
<http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notasmodelosgrad/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide%202015.pdf>
- [12] ANSYS Fluent User's Guide (November 2013):  
<http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notasmodelosgrad/ANSYS%20Fluent%20User%20Guide.pdf>
- [13] Ansys Workbench, Product Release Notes.
- [14] **Salvador Escoda**, Manual de Ventilación Industrial:  
<http://www.salvadorescoda.com/tecnico/VE/Manual-Ventilacion.pdf>
- [15] **Tomás Norton, Da-Wen Sun, Jim Grant, Richard Fallon, Vincent Dodd** (2007) Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review.
- [16] **Ardalan Aflaki, Masoud Esfandiari and Saleh Mohammadi** (2021) A Review of Numerical Simulation as a Precedence Method for Prediction and Evaluation of Building Ventilation Performance.



# ANEJOS

## ANEJO 01

Centro Nacional de Tecnología de Regadíos CENTER

## DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

De forma que podamos entender de mejor forma el motivo de este TFG resulta interesante definir con mayor detalle el centro de investigación que se prevé construir, y del cual hemos realizado el estudio de su sistema de ventilación que hemos plasmado en esta memoria.

El Centro Nacional de Tecnología de Regadíos CENTER se encuentra localizado en la finca “El Palomar” en San Fernando de Henares en Madrid cuya gestión es ejercida por la Dirección General de Desarrollo Rural, Innovación y Formación Agroalimentaria a través de la Subdirección General de Regadíos, Caminos Naturales e Infraestructuras Rurales que tiene asignadas las competencias en materia de regadíos.

La principal Misión del Centro Nacional de Tecnología de Regadíos (CENTER) es ser el medio propio de la Dirección General de Desarrollo Rural, Innovación y Formación Agroalimentaria para mostrar la utilidad y la necesidad del regadío en España, la conveniencia de su modernización y buena gestión energética e hídrica y la oportunidad que representa la aplicación de las últimas tecnologías para lograr un regadío sostenible, rentable, racional y socialmente bien aceptado en escenarios de escasez de agua y de cambio climático.

Una de las principales actividades que se dan desde el CENTER es la coordinación y el liderazgo de todas las labores normativas españolas relacionadas con el riego, desde la Secretaría del Comité Técnico de Normalización CTN318 “Riegos”. Ello es posible al disponer del Laboratorio Central de Ensayos de Materiales y Equipos de Riego y de las distintas instalaciones de la finca “El Palomar”, de manera que se puedan realizar los ensayos oportunos para elaborar y comprobar los protocolos de ensayo que aparecen en las normas, determinando así la correcta instalación, uso y mantenimiento de los equipos de riego.

Las instalaciones de este laboratorio, ya existente, están ubicadas al norte de la finca “El Palomar” y están formadas por una gran nave rectangular que alberga los diferentes ensayos y la zona de oficinas, un depósito de agua enterrado de 400 m<sup>3</sup>, una estación de bombeo que suministra agua a presión a los diferentes bancos de ensayo, y una zona de ensayos al aire libre (ensayos de larga duración).

Actualmente el Laboratorio Central para Ensayo de Materiales y Equipos de Riego del CENTER dispone de los bancos de ensayo necesarios para la caracterización de los elementos de riego más usuales en las redes de suministro (contadores, hidrantes, válvulas de regulación, válvulas de seccionamiento, válvulas antirretorno, electroválvulas, ventosas, filtros, aspersores, difusores, emisores y tuberías emisoras). Sin embargo, hoy en día no se cuenta con un banco de ensayo que permita conocer las curvas de admisión y expulsión de aire de las ventosas, dato de suma importancia a la hora de diseñar una red y de asegurar su correcto funcionamiento. En la actualidad, hay muy pocos bancos en el mundo que puedan llevar a cabo este ensayo y, fundamentalmente, son bancos de fabricantes.

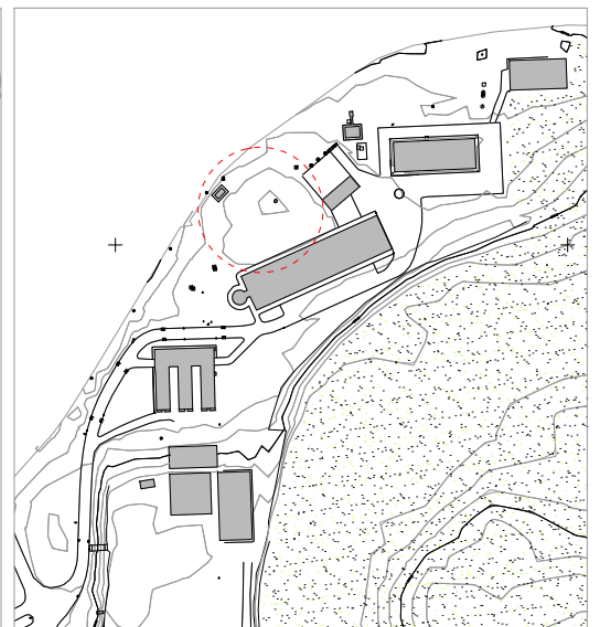
Por lo que se ha detectado la necesidad de dotar al CENTER de un banco de ensayo de ventosas que permita caracterizar y comprobar el funcionamiento de este tipo de elementos. No obstante, por las especiales características del banco, no es posible su montaje en la actual nave principal del Laboratorio, ya que los niveles sonoros que se soportan en el transcurso de un ensayo, aunque puntuales, son elevados, llegando a superar los 100 db.

Por ello, es necesaria la construcción de una nave anexa e independiente del laboratorio que incluya todos los servicios e instalaciones que permitan la realización de los ensayos. La nave propuesta responde a los requerimientos funcionales definidos por el cliente, diferenciándose en ella dos zonas independientes: la sala de máquinas, en la que se instalarán los compresores y calderines de aire comprimido, y la sala de ensayos, en la que se localizará el banco de ensayos propiamente dicho y una sala de control, y asociado a esta un pequeño aseo.

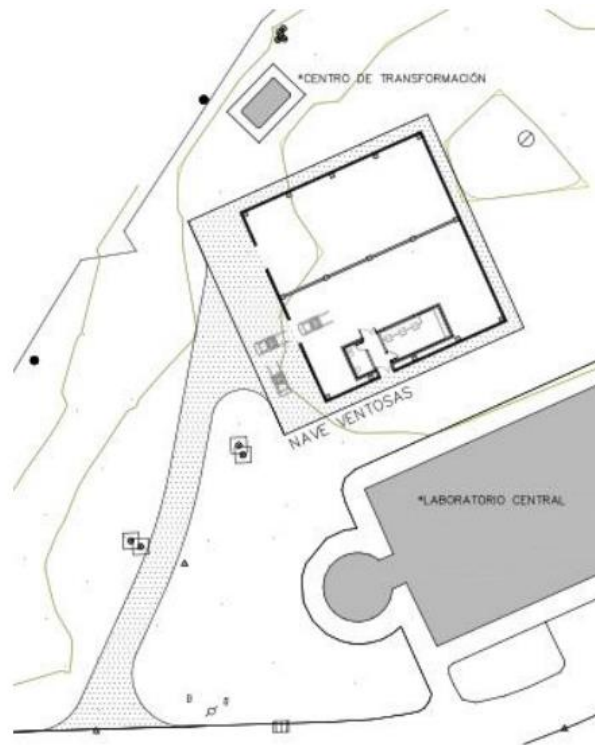
La nave constara de una sola planta con una superficie construida de 372,32 m<sup>2</sup> de y una superficie útil 334,03 m<sup>2</sup>:

<b>CUADRO DE USOS Y SUPERFICIES</b>	
1. NAVE MAQUINARIA	157.80 m <sup>2</sup>
2. NAVE ENSAYOS	148.56 m <sup>2</sup>
3. SALA DE CONTROL	17.90 m <sup>2</sup>
4. ACCESO	5.74 m <sup>2</sup>
5. ASEO	5.03 m <sup>2</sup>
TOTAL SUPERFICIE UTIL	334.03 m <sup>2</sup>
SUPERFICIE CONSTRUIDA	372.32 m <sup>2</sup>

Exteriormente se pavimenta una acera perimetral y una zona de maniobras en la fachada principal, ocupando una superficie de 180 m<sup>2</sup>. El vial de acceso ocupa una superficie pavimentada de 166 m<sup>2</sup>.



*Planos finca El Palomar*



*Planos de la localización de la nueva nave con el banco de ensayos*



*Foto aérea de la finca El Palomar*

La nave de ensayo de ventosas se encuentra anexa a las edificaciones IV.



## SISTEMA DE ENSAYOS

Las operaciones de llenado y vaciado de conducciones, tanto en el caso de un primer llenado o por motivo de operaciones de mantenimiento de la red, son operaciones críticas sobre el sistema que si no se realizan de una manera adecuada pueden ocasionar sobrepresiones importantes en el sistema (llenado) por compresión de bolsas de aire o depresiones en el vaciado de las conducciones que pueden dañar la tubería e incluso generar entrada de elementos contaminantes.

En las operaciones de llenado debe controlarse el caudal inyectado al sistema y asegurar una correcta expulsión del aire contenido en el mismo para evitar sobrepresiones. La expulsión se facilita a través de ventosas y grifos de purga, pero una velocidad excesiva del agua puede provocar cierres inesperados de las ventosas en presencia de aire, que no podrá ser expulsado, o bien cierres bruscos de las mismas en presencia de agua, que darán lugar a sobrepresiones.

La correcta ubicación de las ventosas y la elección del tamaño y tipo de las mismas, así como el control de la velocidad de llenado, son indispensables para lograr una operación de llenado en condiciones mínimas de seguridad. Asimismo, debe asegurarse que al final del proceso, toda la tubería se encuentre completamente llena de agua y sin bolsas de aire en su interior, antes de presurizar definitivamente para ponerla en condiciones normales de funcionamiento.

Para el vaciado, se debe asegurar la entrada de aire en el sistema tras abrir los desagües existentes. Tanto el número, ubicación, tamaño y tipo de las ventosas, como el tipo, ubicación, número y velocidad de apertura de desagües son fundamentales para lograr vaciar el sistema en un tiempo adecuada sin que se produzcan depresiones que puedan dañar el sistema (colapso de la conducción o deformación/desplazamiento de los elementos elásticos de las juntas) o generar entrada de elementos contaminantes a través de puntos de contacto de la tubería con el exterior.

Muchos son los casos de roturas o colapso de conducciones producidos por operaciones incorrectas de llenado o vaciado.

Asimismo, en el caso de producirse importantes variaciones de presión en el sistema como consecuencia de roturas en las conducciones y su consiguiente vaciado "rápido", las ventosas permiten la admisión de aire necesaria para evitar el colapso de las conducciones, así como la consiguiente expulsión del mismo cuando el sistema vuelve a presurizarse como consecuencia de la evolución del transitorio hidráulico que se produce.

Así como las ventosas solo pueden operar en condiciones de baja presión (positiva o negativa) en el interior de la tubería (entre  $-5$  y  $+5$  mca), los purgadores, pequeñas ventosas con orificios de salida del orden de unos pocos milímetros, son capaces de operar en condiciones de presión de trabajo de los sistemas de transporte de agua a presión (presiones manométricas de decenas de mca). Resultan imprescindibles para evacuar al exterior de las tuberías las bolsas de aire que se hayan podido generar como consecuencia de la entrada de este en el sistema o de la liberación del aire que lleva disuelto el agua al variar las condiciones en las que ha sido diluido.

A parte de las ventosas elementos como purgadores y también grifos de purga serán objeto de ensayo en el Banco. Y entre estos dispondremos de diferentes tipos: aductores

(ventosas que solo permiten admisión de aire), purgadores, ventosas antiarriete o Non Slam (NS), ventosas diferenciales y ventosas tradicionales.

Por lo tanto, el uso principal de la nave es la instalación de un banco de ensayo que permita conocer las curvas de expulsión-admisión (P-Q) de aire de las ventosas que forman parte fundamental de las instalaciones de regadío.

En concreto, se pretende diseñar los equipos necesarios para realizar los siguientes ensayos:

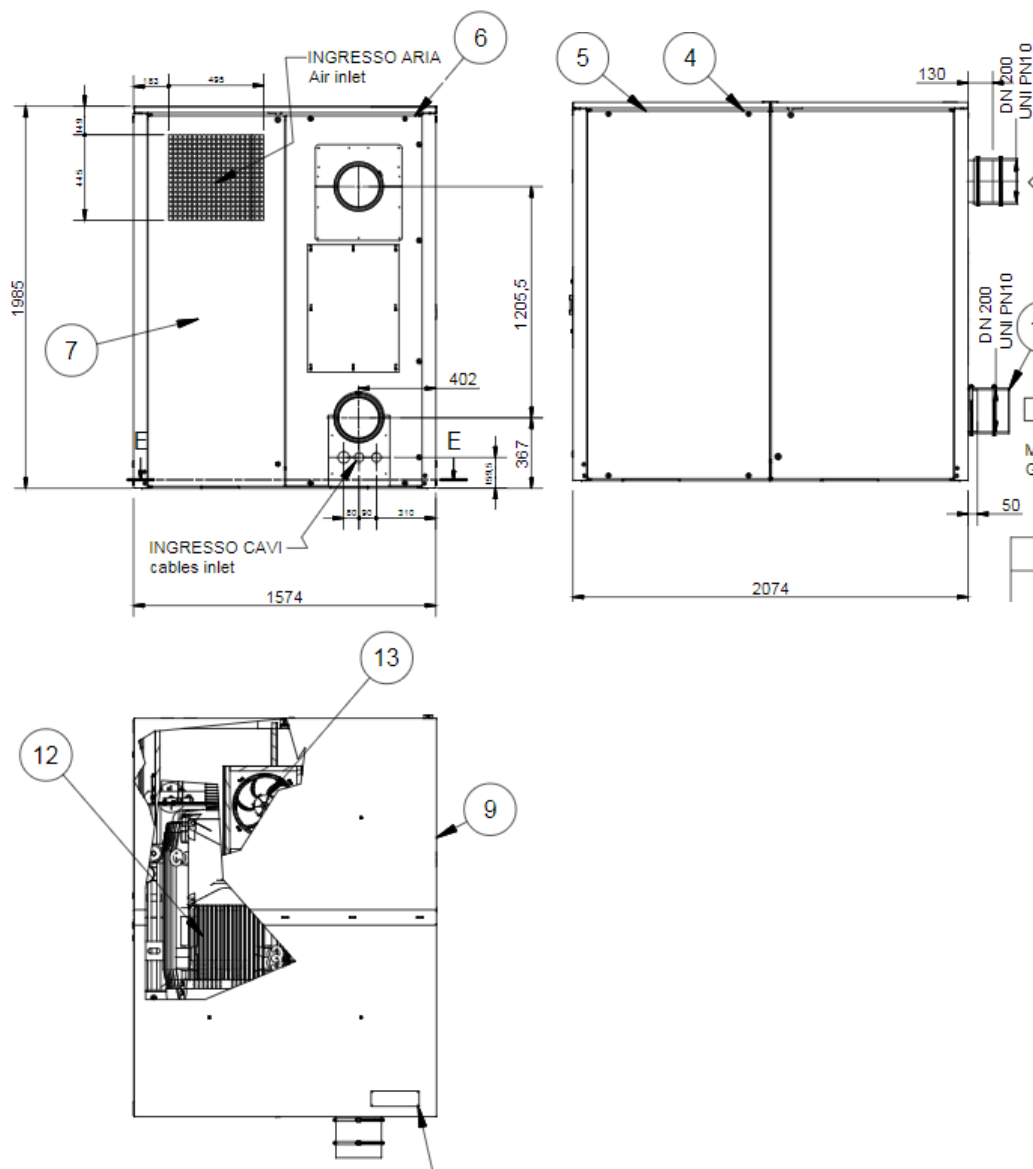
- UNE-EN 1074-4: Epígrafe 5.3: Características Neumáticas, y Anexos A y B.
- ISO 9635-4: Epígrafe 5.3: Airflow characteristics, y Anexos A y B.

Estos ensayos se refieren a la determinación del caudal de aire que expulsará o admitirá la ventosa, cuando se esté llenando una conducción (expulsión de aire) o vaciando (admisión de aire), en función de la presión existente en el interior de la tubería (superior a la atmosférica en el caso de expulsión o inferior a la atmosférica en el caso de admisión), es decir, la curva que relaciona las variables presión (p) y caudal (Q), curva p-Q. Lo que resulta imprescindible para poder seleccionar este elemento tan importante en los sistemas de transporte de fluidos a presión de una manera adecuada.

Para el diseño del banco de ensayos de ventosas se analiza el rango de caudales de expulsión y admisión de diferentes ventosas comerciales. Principalmente interesa conocer el caudal mínimo y máximo de trabajo en función del diámetro nominal (DN) de la ventosa. El rango de caudales de funcionamiento de las ventosas condiciona los equipos para la medición de caudal más adecuados a instalar en el banco. Dada la limitación de la potencia eléctrica disponible en la instalación, se limita el ensayo a ventosas con un diámetro máximo de 4".

Después de realizar un análisis de los diferentes bancos de ensayo existentes, de las experiencias previas que se disponen, y fijar los ensayos a realizar y las condiciones de contorno, finalmente el sistema por el que se opta para alimentar de caudal en banco de ensayos es:

- **Soplantes** para poder realizar ensayos de ventosas en condiciones usuales de funcionamiento con facilidad. La capacidad total necesaria se dividirá entre diversas soplantes para que puedan realizarse los ensayos de ventosas más pequeñas sin tener que poner en marcha toda la capacidad instalada, y por lo tanto, para poder trabajar con menores potencias.
- El sistema de **regulación** consistirá en disponer de variadores de velocidad en las soplantes y válvulas de regulación en derivación.
- Para poder realizar ensayos de cierre dinámico en ventosas en las que la presión a la que se produce supera los límites de presiones que pueden alcanzar las soplantes, y poder realizar algún ensayo de expulsión con caudales mayores, si bien con un tiempo limitado, se instalarán **dos calderines de 10 m<sup>3</sup> cada uno**, y presión de timbrado PN10 o PN16, alimentados por un compresor.
- Cabe la posibilidad de **reforzar** convenientemente estos calderines para poder realizar **ensayos de admisión** con caudales mayores de los que se pueden alcanzar con las soplantes.
- Se instalará un **calderín de pequeño volumen** (1000 o 2000 litros y PN 16) para realizar ensayos en **purgadores**. Es una mejor opción que utilizar los de 10 m<sup>3</sup> por el coste energético del llenado de los grandes.



**Planos Soplane Grande**

Por último, comentar que será necesario tener en cuenta toda una serie de elementos adicionales, tanto en el sistema de producción de aire, como en la propia nave. A destacar en lo que respecta a la producción de aire:

- Caudalímetros tipo Vortex
- Válvulas de aislamiento motorizadas
- Válvulas de seguridad o de alivio
- Válvula de regulación de caudal.
- Válvulas reductoras y sostenedoras de presión
- Sistemas de acondicionamiento del aire (humedad, filtrado, adecuación de temperatura a los valores permitidos por la normativa, entre 5°C y 45°C).
- Posible producción de condensado.
- Silenciadores.

Y en lo que afecta a otros elementos a instalar:

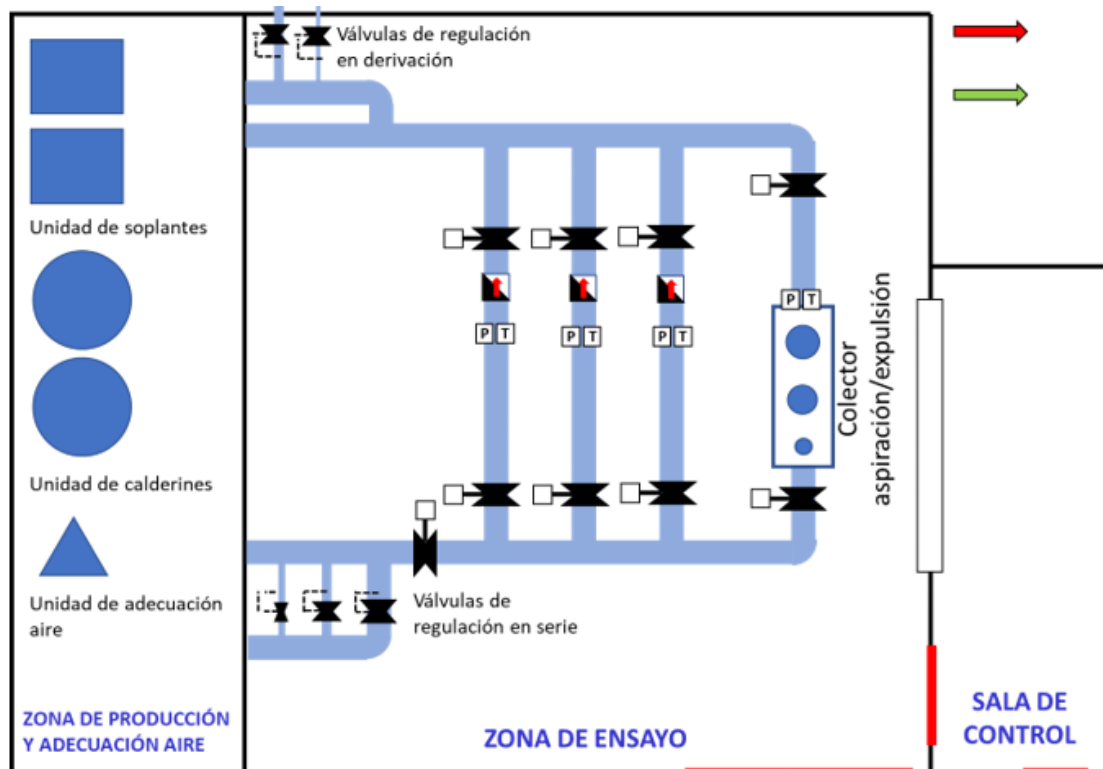
- Aislamiento acústico de la cabina de medición y de la nave de ensayos.
- Acondicionamiento de aire en la cabina de ensayos.
- Disponer en los colectores de medición de elementos para poder simular diferentes modos de conexión de las ventosas.
- Disponer de accesorios para realizar conexiones con diferentes “acabados” de las ventosas (bridas y rosca). Calderería y acoples bridas.
- Instalación de Puente grúa o Grúa para poder transportar ventosas.
- Suministro de agua y desagües.
- Instalación eléctrica y de transmisión de datos.
- Puerta grande en nave medición y paramento desmontable o puerta grande en la parte de la nave en la que están instalados los calderines y la soplante para acceder con facilidad.

## ESQUEMA INSTALADO EN LA SALA DE ENSAYOS

La zona de ensayos estaría integrada por los diferentes elementos que conducen el aire hasta el colector de ensayos donde se conectarán las ventosas. La longitud de su trazado está condicionada por las distancias recomendadas por los fabricantes de dispositivos de medición de caudal, ya que el flujo de aire tiene que llegar a estos elementos con la mínima perturbación para reducir los errores de medición.

Además de las tuberías, esta zona contará con los elementos necesarios para la medición de las características del aire de ensayo (presión y temperatura), y diferentes válvulas de regulación y control que permiten distribuir el flujo y adecuar sus características a los requerimientos de ensayo. Asimismo, se instalará uno o dos colectores donde irán conectadas las ventosas a ensayar, junto con los elementos de medición de presión y temperatura asociada al ensayo.

Después de analizar diferentes configuraciones se consideró como más adecuado el siguiente esquema de ensayo:



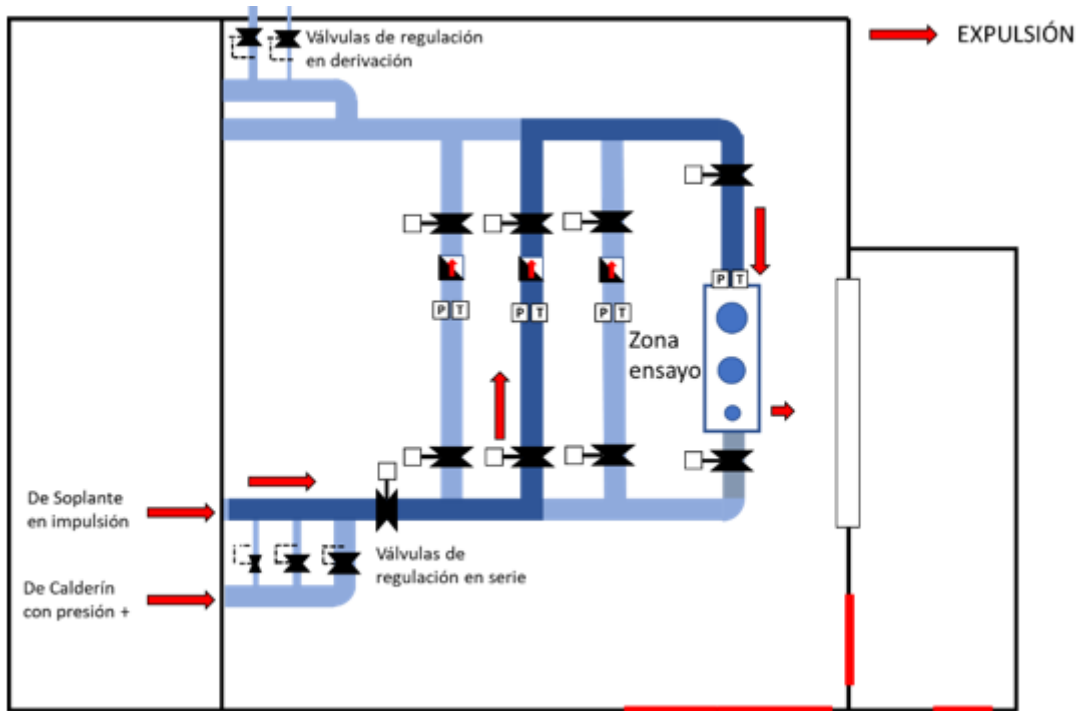
*Esquema zona de ensayos*

Este incorpora tres dispositivos de medición de caudal unidireccionales montados en tres líneas de medición paralelas e independientes, además de equipos de medida de presión y temperatura, así como de válvulas de aislamiento monitorizadas para permitir el paso por cada uno de los conductos en función del caudal de ensayo, lo que simplifica el control del flujo durante los ensayos, cumpliendo con las recomendaciones de distancias de los dispositivos de medición de caudal a elementos potencialmente perturbadores.

Se opta por la instalación de un único colector, conectado en serie con los tres conductos paralelos de medición, para la colocación de las ventosas a ensayar cercano a la sala de control. De esta forma, una misma válvula puede ensayarse sin necesidad de duplicar el número de unidades de ensayo ni de manipularlas para la colocación en un segundo colector. Del mismo modo, con un único colector no sería necesario duplicar los sensores de presión y temperatura instalados en este punto.

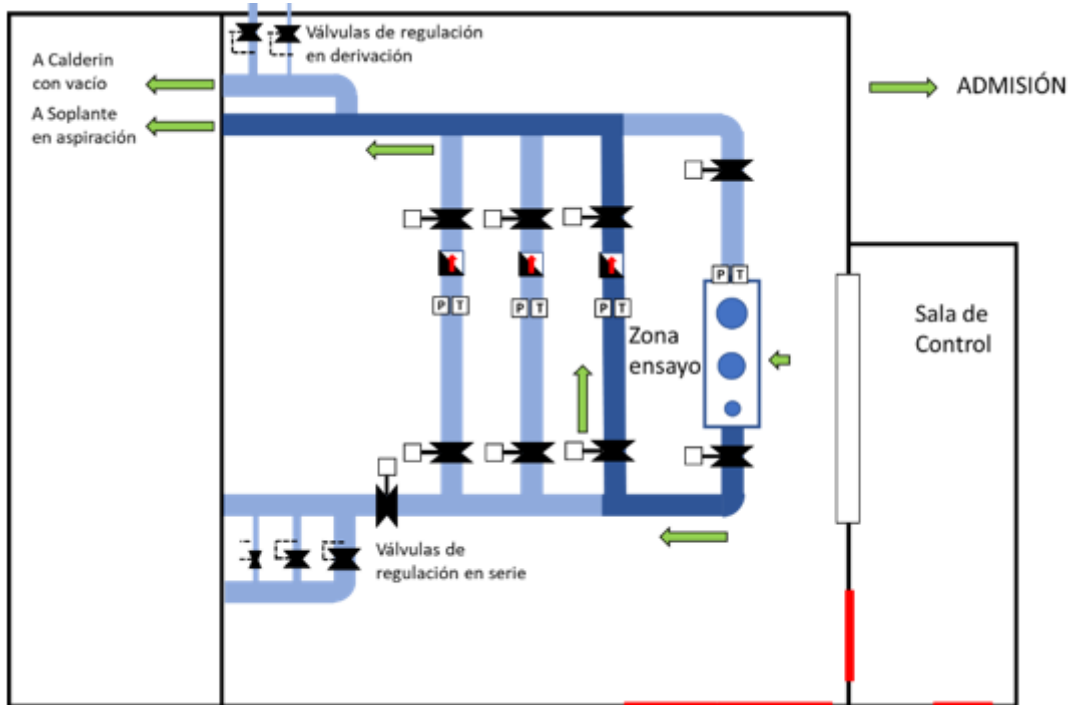
Las conducciones que incorporan los dispositivos de medición de caudal discurrirán paralelas, pudiéndose incluso colocar en el mismo plano vertical para facilitar el acceso a las mismas, al mismo tiempo que se reduce el espacio en planta necesario.

La siguiente figura muestra el flujo de aire para el ensayo de expulsión. En este caso, el aire se aportaría desde la unidad de soplantes o desde los calderines (en función de la presión de ensayo). Permanecería abierta una línea de medición en función del caudal de ensayo.



*Sistema de ensayos en expulsión*

En la siguiente figura se muestra el flujo de aire para el ensayo de admisión. En este caso, el aire se aspiraría desde la unidad de soplantes o desde los calderines (en función de la presión de ensayo). La entrada de aire se haría desde la propia ventosa que se está ensayando. Permanecería abierta una línea de medición en función del caudal de ensayo.



*Sistema de ensayos en admisión*

ANEJO 02  
Ventilación original



El presente Anejo tiene como objeto la definición de las características principales de las instalaciones de climatización y ventilación que fueron previstas en el proyecto en su origen en ambas salas, y a partir de las cuales hemos extraído las modificaciones que se observan en este trabajo, de forma general en cada sala se pretende instalar:

- Nave de maquinaria y ensayos: instalación de renovación de aire.
- Sala de control: instalación de climatización y ventilación.

## NAVE DE MAQUINARIA Y ENSAYOS

Las naves de maquinaria y ensayos no están previstas para albergar trabajadores de forma permanente, por lo que no se plantea la instalación de sistemas de climatización para mantener la temperatura conforme a los parámetros establecidos por el Reglamento del Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE).

Se instalará un sistema de ventilación consistente en una red de conductos y rejillas de extracción ubicadas en el techo de las naves, conectadas con una caja de ventilación que extraerá el aire al exterior a través de una rejilla ubicada en un lateral de la nave. La entrada de aire se hará a través de rejillas en fachada.

El sistema se dimensiona para proporcionar 4 renovaciones a hora del aire del interior de cada una de las naves (3.000 m<sup>3</sup> /h en la nave de ventosas y 3.680 m<sup>3</sup> /h en la nave de maquinaria. Total 6.680 m<sup>3</sup> /h).

La red de conductos y rejillas de extracción se construirá en chapa de acero galvanizado. Para evitar la transmisión de ruidos al exterior por los conductos de ventilación, estos se forrarán internamente con aislamiento termoacústico consistente en una manta de lana de vidrio de 40mm recubierta en su cara interior con tejido de fibra de vidrio de alta resistencia (Isover Climliner Roll G1 40mm o equivalente).

El extractor será una caja de ventilación de chapa de acero galvanizado equipada con ventilador centrífugo. Se montará sobre soportes anti vibratorios.

La salida de aire desde el extractor, así como los huecos de entrada de aire, estarán protegidos con rejillas de intemperie y contarán con silenciadores para evitar la transmisión de ruido al exterior (atenuación acústica).

El encendido y apagado del extractor se hará a través de un interruptor instalado en la sala de control.

## SALA DE CONTROL

En la sala de control se instalará un conjunto de climatización con bomba de calor inverter, tipo split 1x1, con capacidad de 3,5 kW en modo frío y 4,0 kW en modo calor.

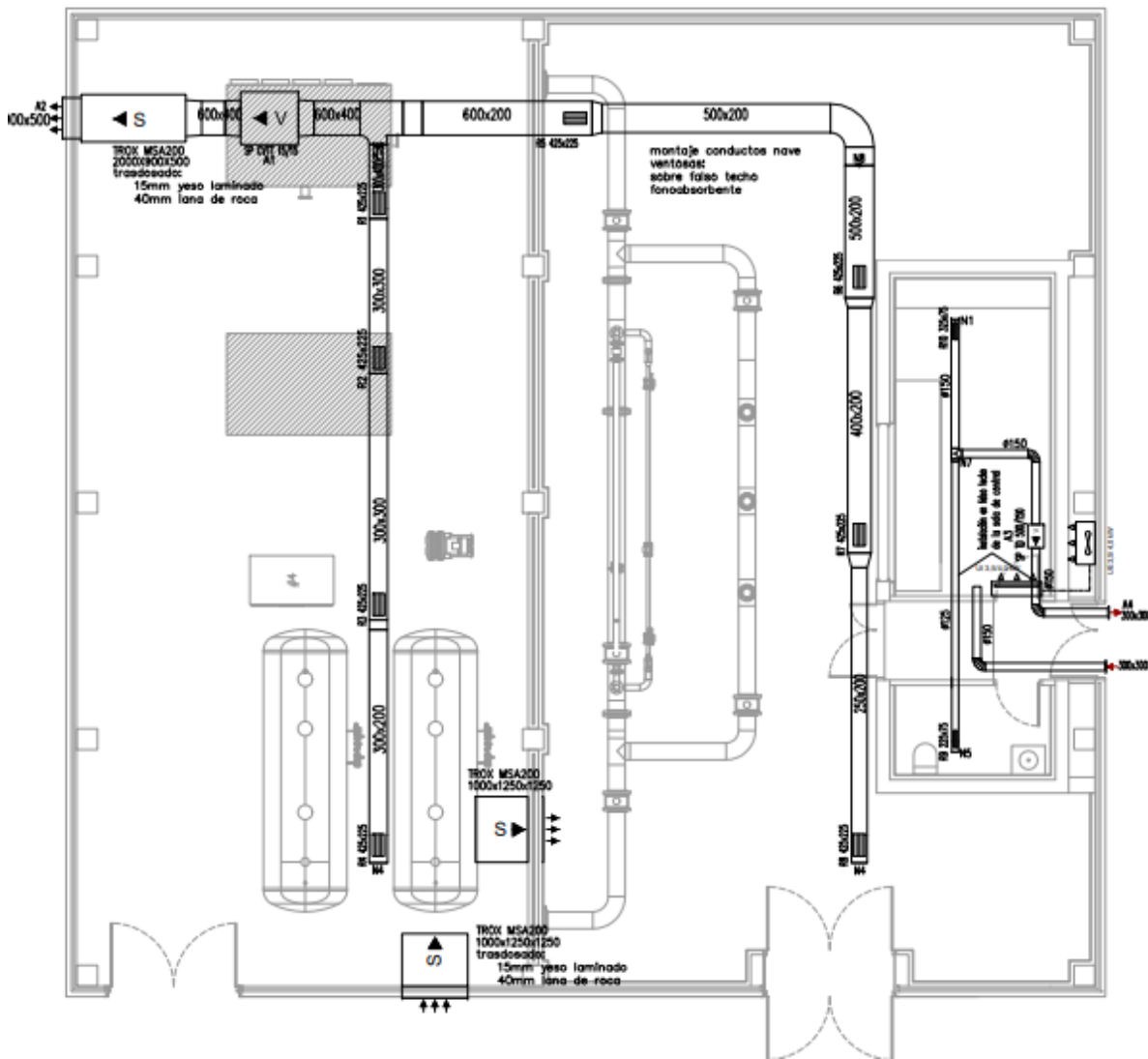
Constará de una unidad interior de pared, instalada en el interior de la sala de control, y una unidad exterior que se instalará encima de la sala de control, dentro de la nave de ensayos, sobre la cara interior de la fachada, montada sobre soportes.

Las tuberías de refrigerante de conexión entre la unidad interior y la exterior serán de cobre especial para refrigeración, deshidrato y desoxidado, con bajo contenido en fósforo, recocidas y pulidas interiormente, capaces de soportar presiones totales de hasta 42 kg/cm<sup>2</sup>. Las soldaduras se harán en atmósfera inerte de Nitrógeno.

Para controlar la instalación se empleará un mando a distancia programable.

Para dotar a la sala de la ventilación necesaria se instalarán dos rejillas de extracción de aire, una en la sala y otra en el aseo, conectadas a una red de conductos dotada de un extractor en línea. Todo el sistema se montará sobre la cubierta de la sala de control y será accesible desde la nave. El aire se extraerá a través de una rejilla ubicada sobre la puerta de acceso peatonal exterior. La entrada de aire se hará a través otra rejilla en fachada conducida hasta la sala de control.

El sistema se dimensiona para proporcionar extraer  $180 \text{ m}^3/\text{h}$  (4 personas  $\times$   $45 \text{ m}^3/\text{h}$ ) de la sala de control y  $90 \text{ m}^3/\text{h}$  del aseo.



*Diseño del sistema de ventilación original*

## ANEJO 03

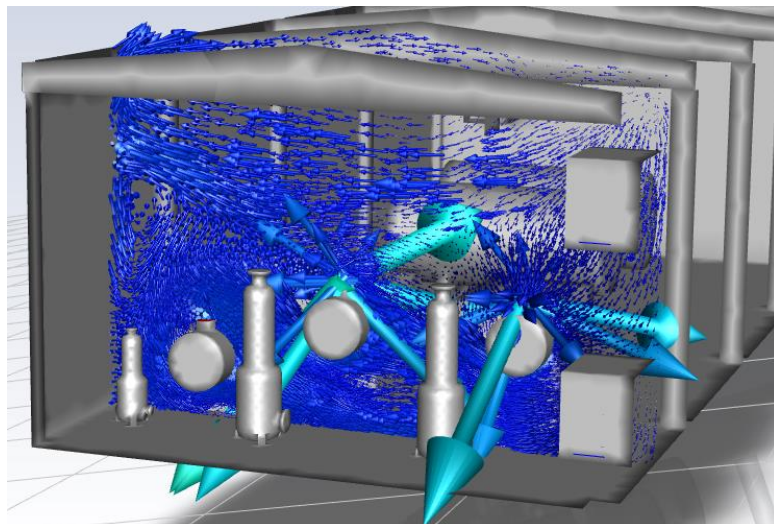
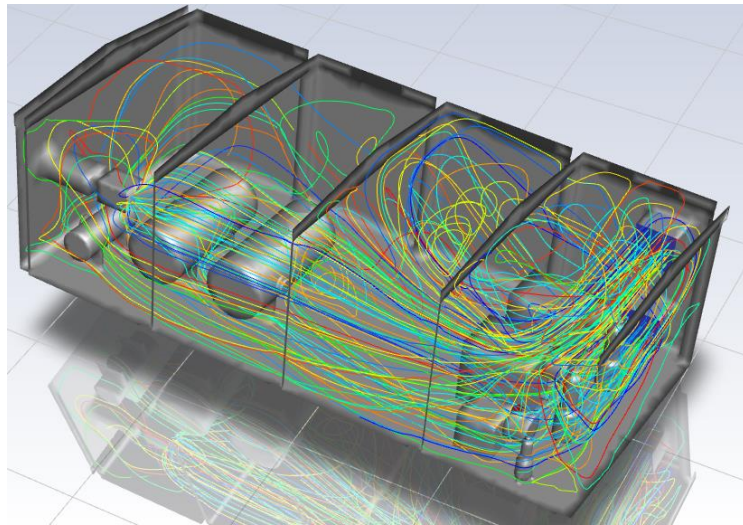
### Simulación de escenarios alternativos

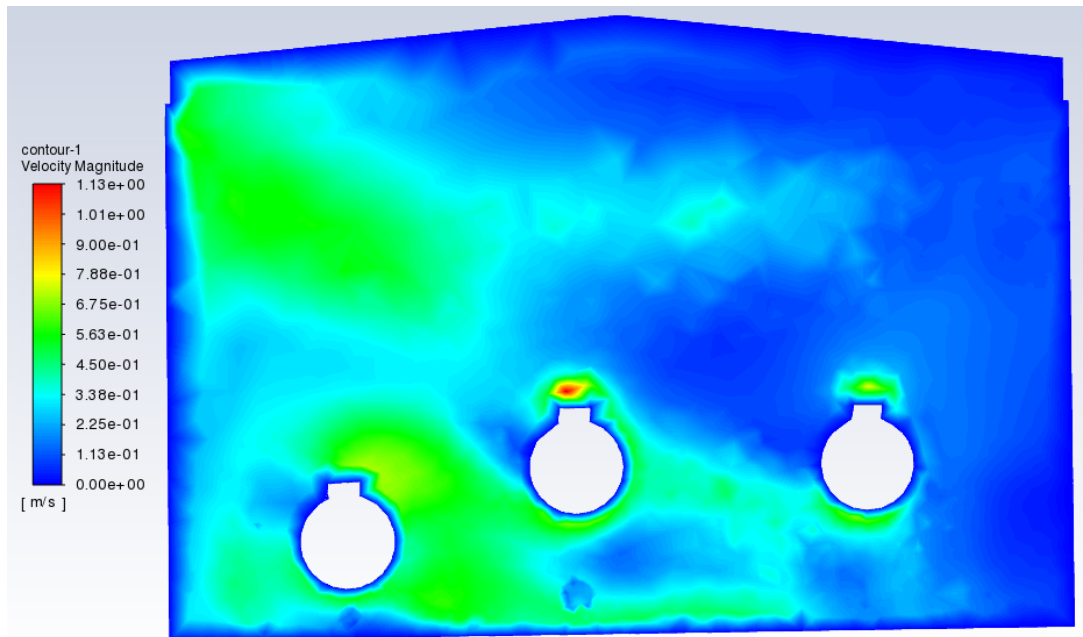
En este anejo se pretende verificar lo que sucede en otros escenarios en lo que se reduce el caudal de extracción de aire y/o lo que sucede cuando no están funcionando todas las maquinas. Se simularán los cinco siguientes escenarios:

1. Todos los equipos funcionando a caudal mínimo y el ventilador extractor a máxima capacidad.
2. Todos los equipos funcionando a caudal máximo (como la simulación original) y el ventilador extractor desconectado.
3. Todos los equipos funcionando a caudal máximo (como la simulación original) y el ventilador extractor a  $\frac{1}{2}$  de caudal máximo de extracción.
4. Todos los equipos a caudal mínimo y el ventilador extractor desconectado.
5. Todos los equipos funcionando a caudal mínimo y el ventilador extractor a  $\frac{1}{2}$  de caudal máximo de extracción.
6. Todas las soplantes paradas y el ventilador extractor a máxima capacidad.

Todos los equipos funcionando a caudal mínimo y el ventilador extractor a máxima capacidad.

A partir de la tabla 6.1 podemos calcular los caudales masicos mínimos que podrán absorber las soplantes en funcionamiento, lo que se dará en condiciones de máxima presión de trabajo y a la mínima potencia.





En esta simulación podemos observar que el comportamiento será muy similar al descrito en la simulación principal, donde existirá un flujo principal que viajará desde las entradas de ventilación hacia la salida “barriando” toda la habitación. Existiendo una menor cantidad de flujo que se dirigirá a las soplantes, desviándose del flujo principal, ya que la exigencia de estas será mucho menor que en condiciones de caudal máximo.

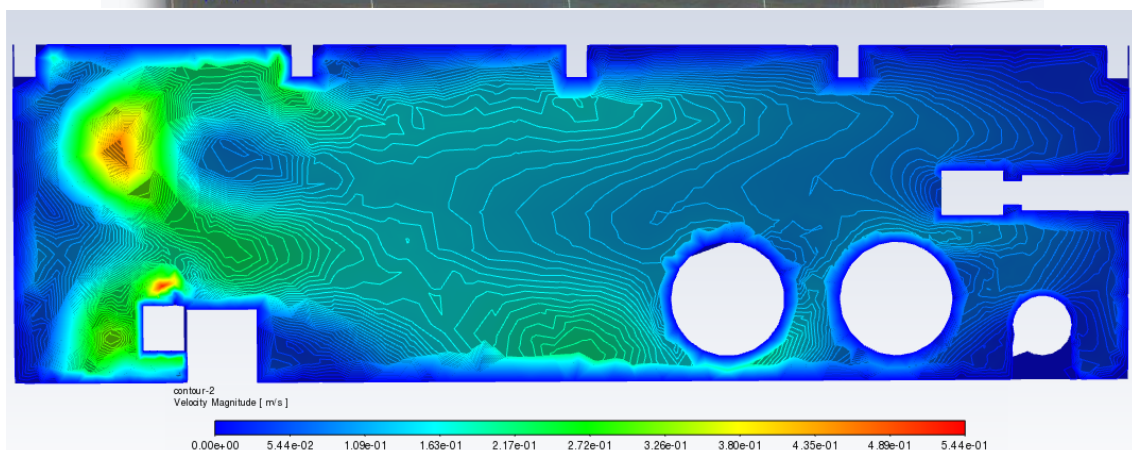
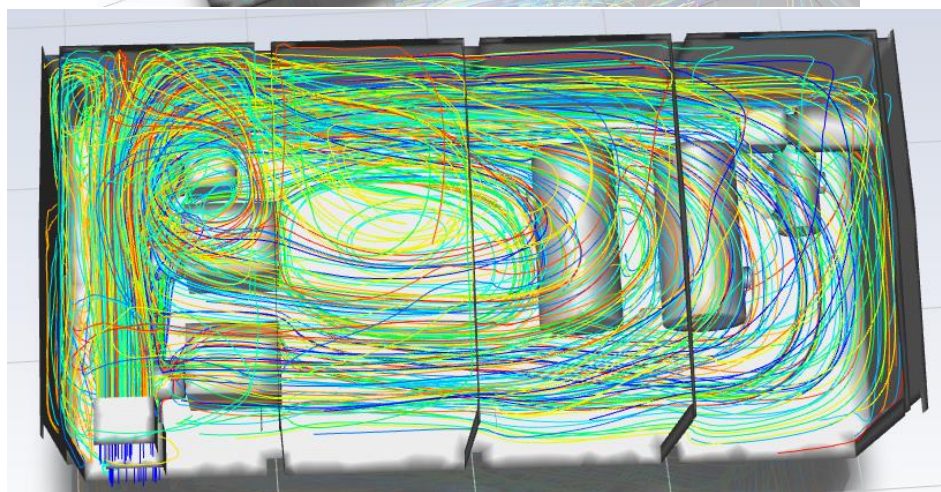
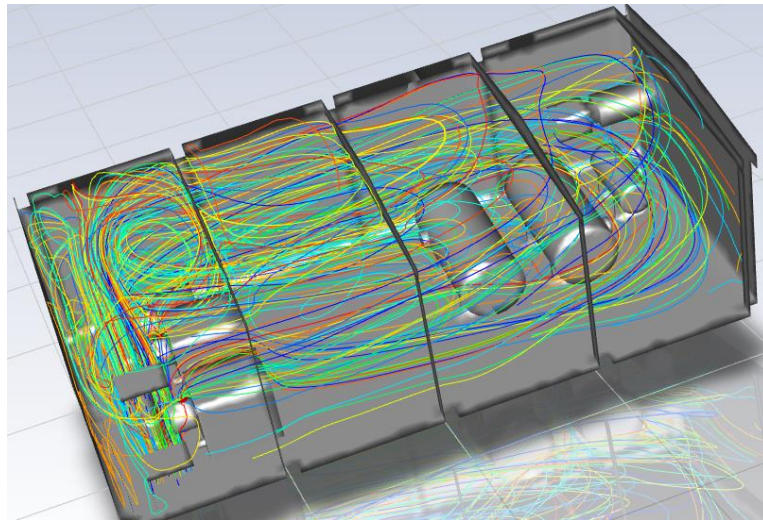
En el mapa de contorno, ultima imagen, que muestra las isóneas de velocidad en el plano de aspiración de las soplantes, se puede observar, con mucha mayor claridad que en el caso de las soplantes funcionando a máximo caudal (Figura 8.4), las zonas donde se produce una mayor aceleración del flujo de aire, las cuales son alrededor de los filtros y de las soplantes, y cuando el aire colisiona con el fondo de la habitación (zonas verdes a la izquierda de la imagen).

### Todos los equipos funcionando a caudal máximo y el ventilador extractor desconectado.

En el caso de desconectar el ventilador extractor podría llegar a ser posible que aun así existiera flujo por el conducto de salida de la ventilación, a raíz de la depresión interior generada por las soplantes (flujo entrante a la habitación) y por la posible diferencia de temperaturas entre las entradas y salidas de la ventilación de la sala, pudiendo tener flujo por la salida del ventilador en ambas direcciones.

En un principio en el ventilador extractor, no existe compuerta de cierre que evite que el aire fluya en dirección contraria a la prevista en ese conducto, de dentro hacia fuera de la instalación, pero si existirá una gran resistencia de ese elemento al paso del aire, por lo que es más desfavorable considerar que no hay paso en ninguna de las dos direcciones, lo que será fácil de simular, indicando que el caudal masico en el ventilador es igual a 0 kg/s.



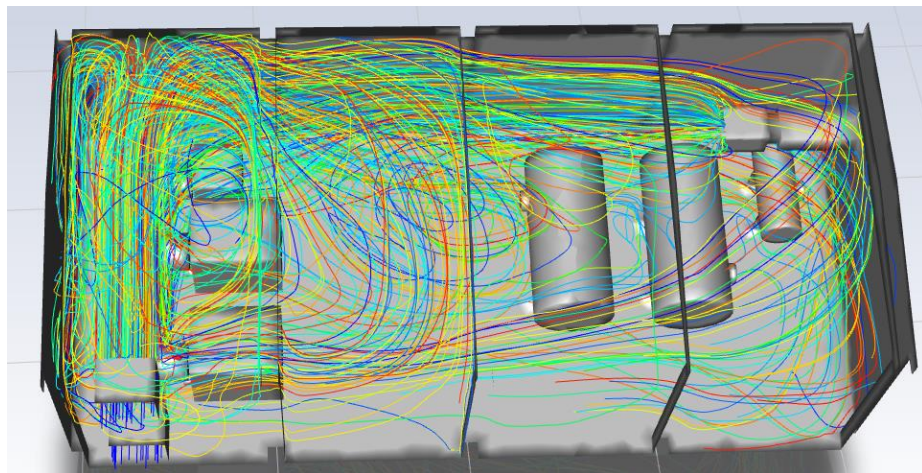
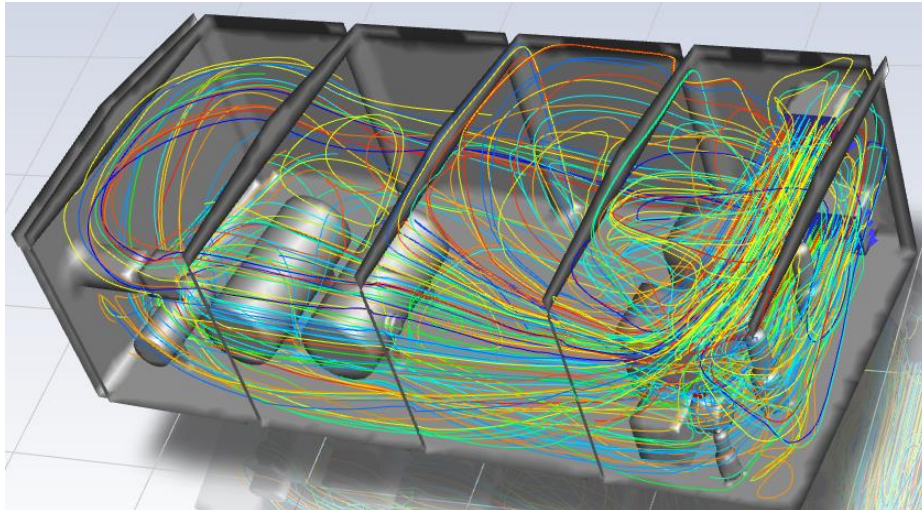


En esta simulación, podemos observar que a pesar de no disponer del ventilador extractor conectado y tener las soplantes funcionando a máxima potencia, se consigue que parte del flujo avance hacia la zona de los calderines y del conducto de ventilación de salida consiguiendo albergar toda la sala, a pesar de que lo hace a una velocidad mucho menor que con el ventilador conectado, lo que podría afectar en cierta medida a la refrigeración de elementos como los calderines y los compresores situados en mitad de la sala. También es cierto que una mayor cantidad de flujo no llega a alcanzar el fondo de la sala, dando se vuelta antes en dirección de nuevo hacia las soplantes.

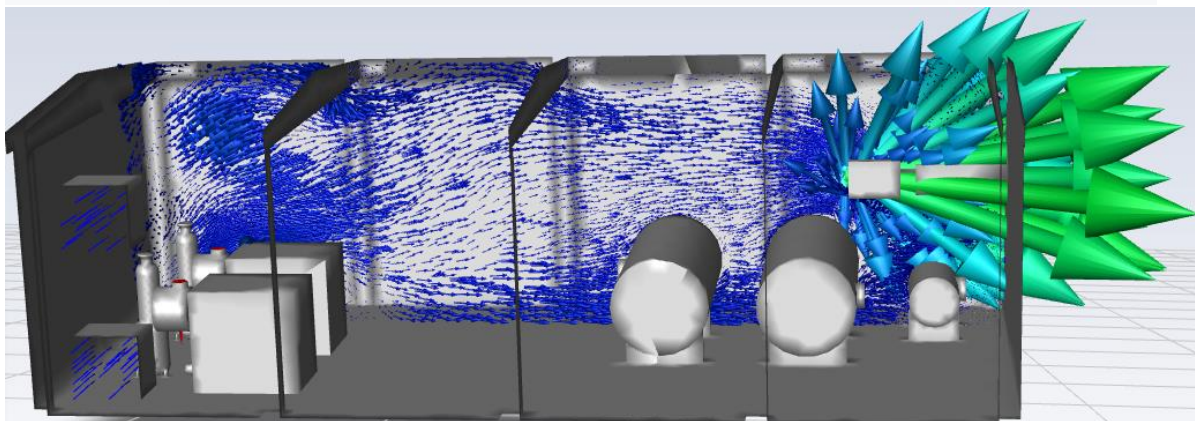
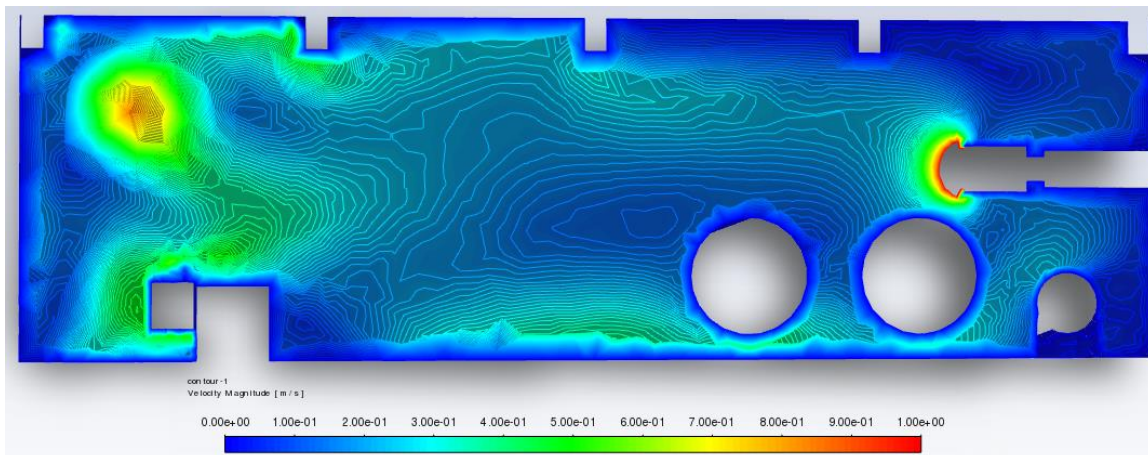
Aunque no se dispone de ventilador, los dos conductos de ventilación de entrada siguen proporcionando un buen flujo de aire el cual incide de forma directa contra las soplantes lo que ayuda en la refrigeración de estas y ayudan a la absorción de aire por parte de las soplantes.

Todos los equipos funcionando a caudal máximo y el ventilador extractor a  $\frac{1}{2}$  de caudal máximo de extracción.

En este caso únicamente deberemos dividir entre dos el caudal masico que establecimos en las condiciones de contorno del conducto de ventilación de salida en las condiciones de máxima capacidad.



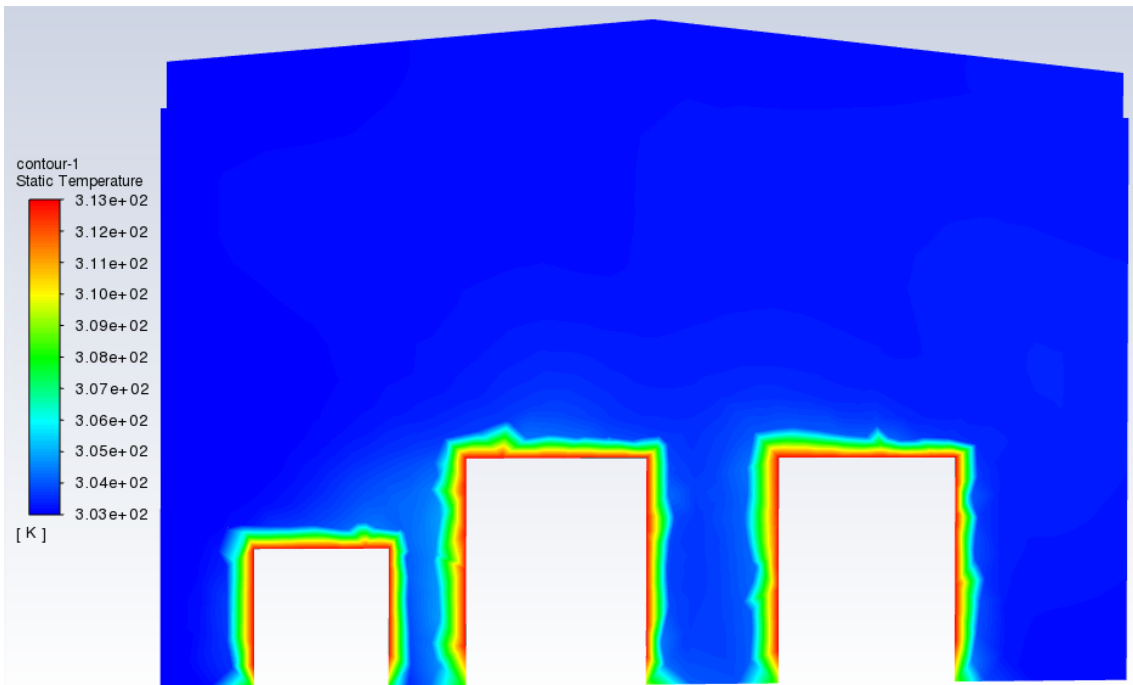
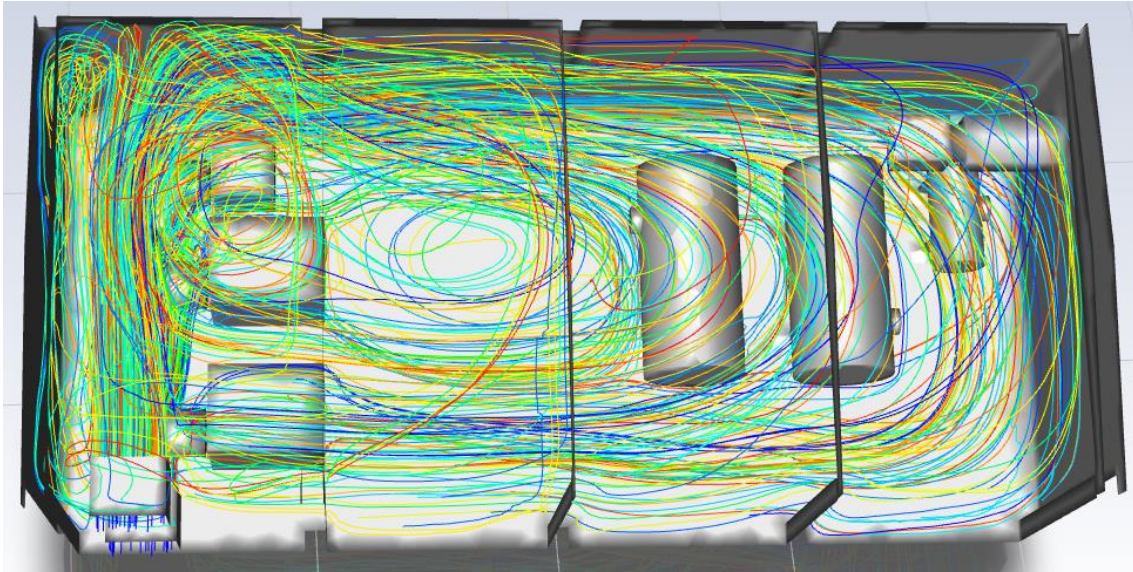




Este caso es el que el extractor se encuentra funcionando a la mitad de su potencia, es el caso que resultara más habitual durante el uso del centro de investigación, y como podemos observar en las *pathlines* encontraremos un punto de funcionamiento que se encontrara entre la situación del ventilador a máxima potencia y el ventilador desconectado, donde el flujo principal seguirá viajando desde los puntos de entrada al ventilador de extracción, pero será menor que con el ventilador a máxima potencia lo que favorecerá la cantidad de flujo que viajara de vuelta a las soplantes.

### Todos los equipos funcionando a caudal mínimo y el ventilador extractor desconectado.

La única diferencia observable entre el caso de funcionamiento a caudal máximo o a caudal mínimo, con el ventilador desconectado, es que una mayor cantidad de flujo entrante se dirigirá hacia el final de la habitación en el caso en el que la exigencia de caudal de las soplantes sea menor, lo que supondría una mejora en la refrigeración de los calderines, compresor, cuadros eléctricos, etc. Que encontramos en esta zona de la habitación. No obstante, al existir menor cantidad de depresión en el interior de la sala, debido a las soplantes, entrara una menor cantidad de flujo de fuera, por lo que al final el resultado es bastante similar en ambos casos.

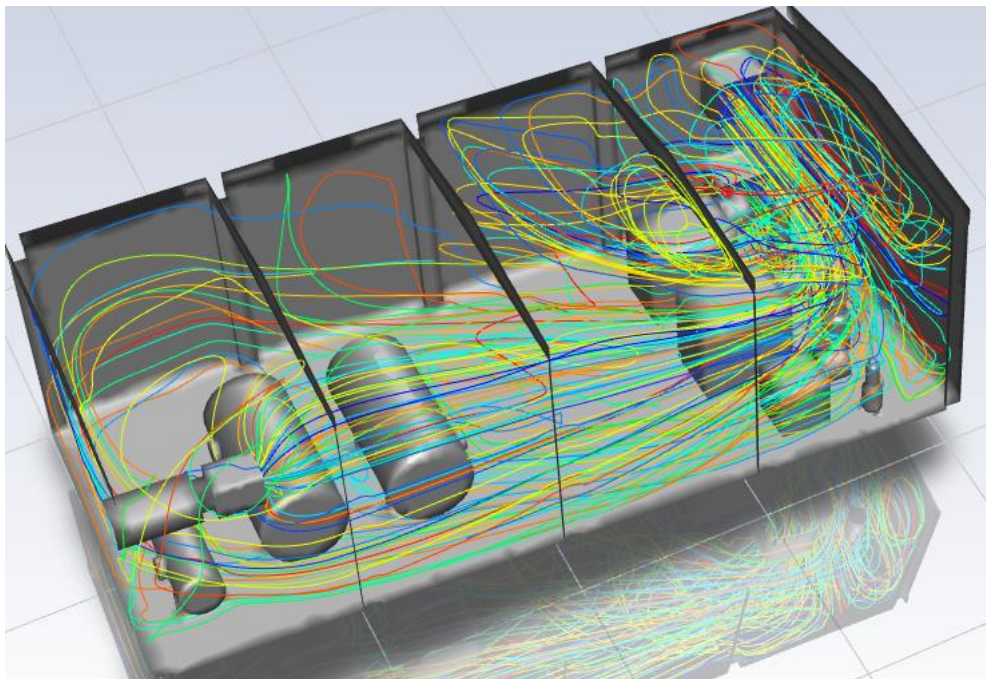
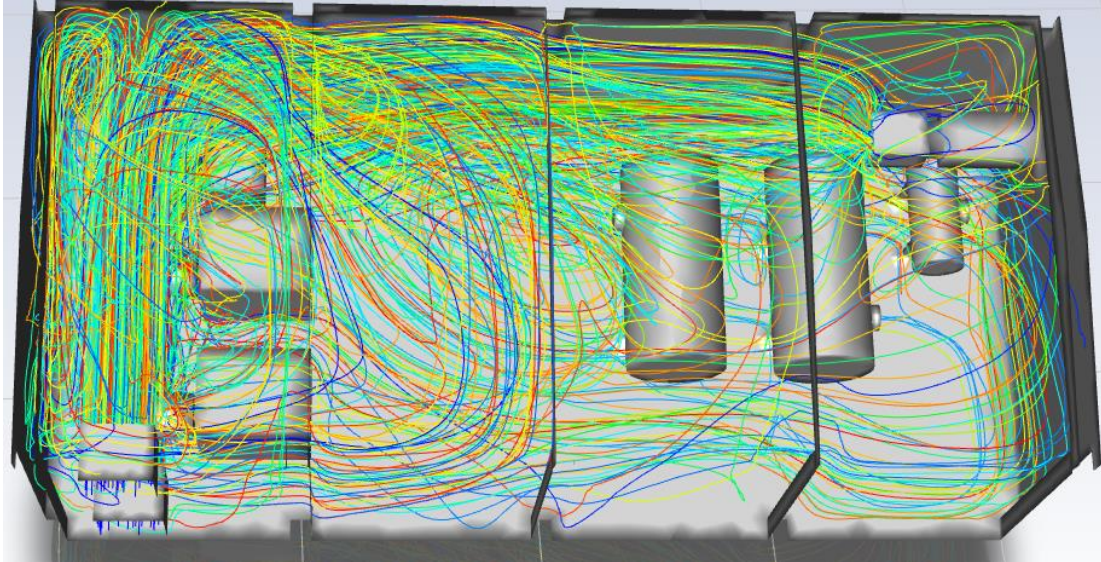


Destacar que, en este caso, el cual únicamente se podría llegar a dar si los sensores de temperatura o el ventilador se estropearan, sí que se produciría un mayor aumento del temperatura del aire cercano a las soplantes respecto al que observábamos en el caso de la simulación principal. Sin embargo, las temperaturas que se alcanzarían, aunque podrían llegar a resultar incómodas y no son deseables, no serían peligrosas ni provocarían un mal funcionamiento de las soplantes.



Todos los equipos funcionando a caudal mínimo y el ventilador extractor a  $\frac{1}{2}$  de caudal máximo de extracción.

Como hemos comentado en la situación de las soplantes trabajando a caudal máximo y el ventilador a la mitad de su potencia máxima, ahora con caudal mínimo, será una de las situaciones más habituales dentro de la sala de máquinas.



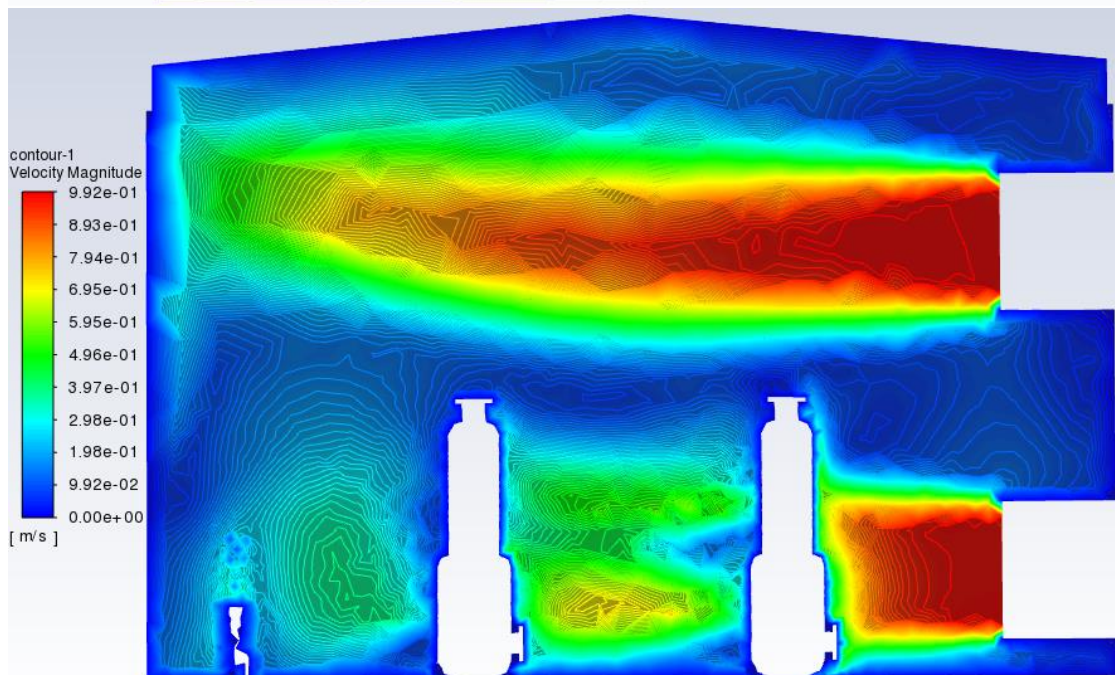
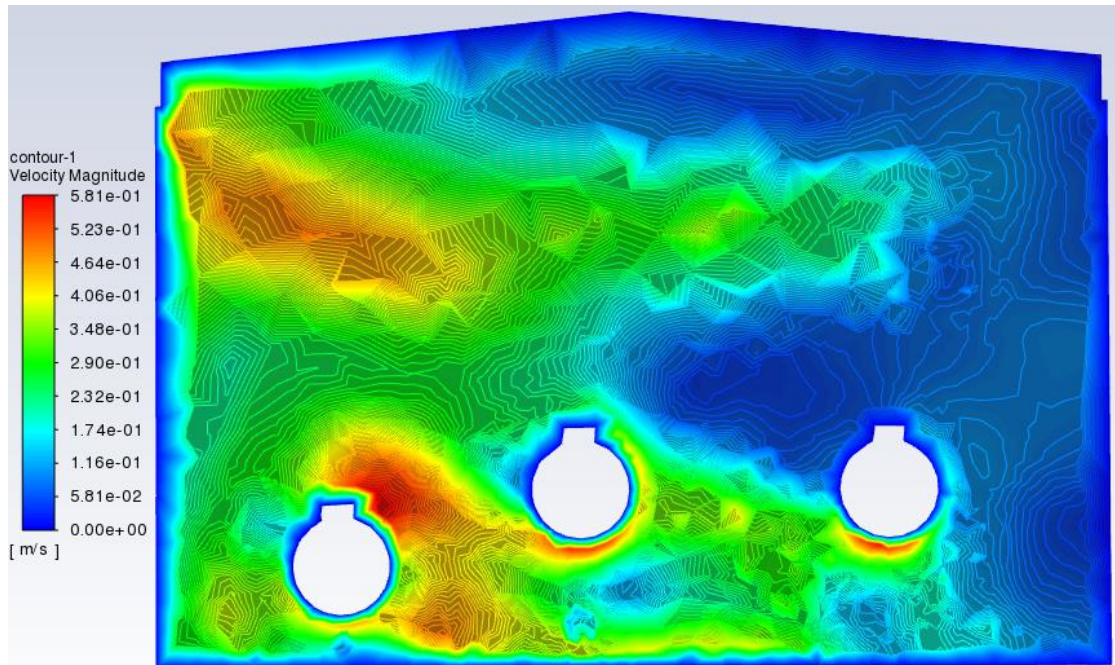
Ambas situaciones a pesar de tener diferentes caudales de aspiración en las soplantes, al final acaban dando una situación muy similar, como hemos comentado en la simulación anterior. Existiendo en este caso una menor renovación de aire en la sala de máquinas, producido por la menor aspiración de las soplantes.

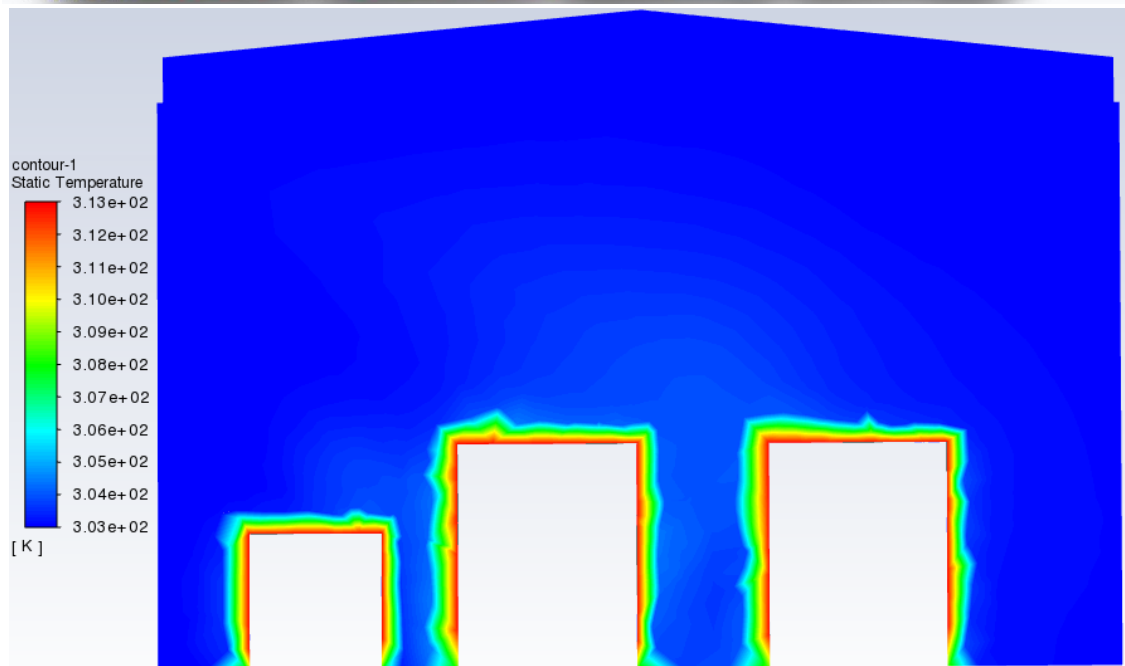
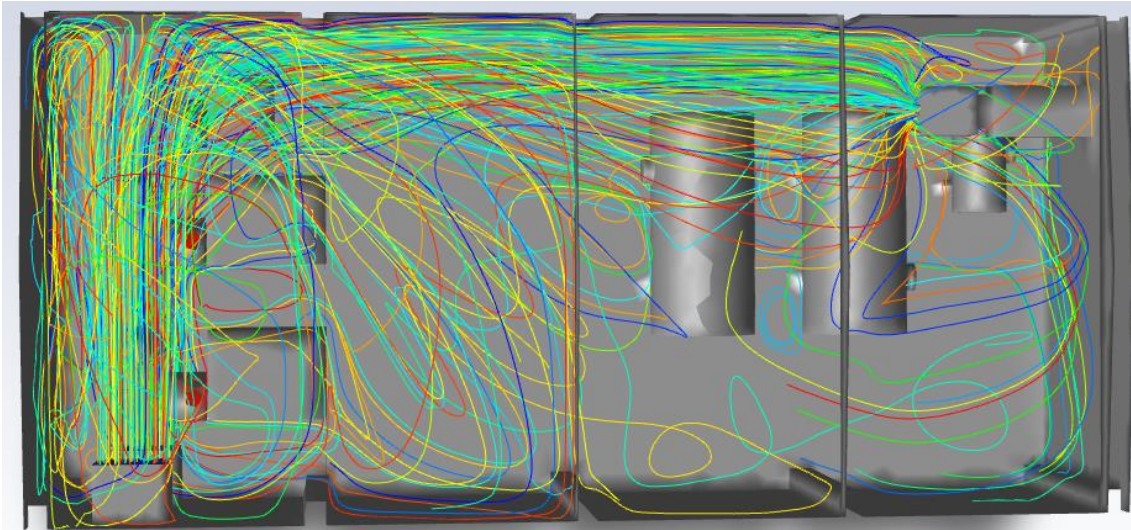
En estas dos simulaciones donde hacemos trabajar al extractor moviendo la mitad de caudal que podría mover se observa claramente el sobredimensionamiento de este, el cual trabajando a mitad de potencia ofrece un funcionamiento adecuado para el sistema de ventilación buscado en la sala de máquinas.



Todas las soplantes paradas y el ventilador extractor a máxima capacidad.

Este caso resultaría el equivalente al sistema de ensayo funcionando en modo impulsión, donde no existe absorción del aire de la sala de máquinas por parte de las soplantes, y en condiciones donde el ventilador extractor se encuentra funcionando a su máxima capacidad, debido a temperaturas elevadas dentro del habitáculo.





Al no existir una salida de aire del habitáculo producido por las soplantes, se puede observar claramente como la mayoría de movimiento del flujo de aire se producirá de las entradas de los conductos de ventilación hacia la salida en el extractor, lo que reducirá en cierta medida el flujo de aire que avanza en dirección desde los calderines hacia las soplantes de nuevo en comparación con el sistema de ensayo en modo succión.

Por otra parte, pese a no disponer de la aspiración de la soplantes seguirá existiendo gran cantidad de flujo alrededor de las soplantes que ayudaran a la refrigeración de estas. Por lo que la temperatura en estas condiciones no serán un problema.



# PRESUPUESTO



## 1. Precios unitarios

### 1.1 Hipótesis consideradas.

A continuación, se recoge el presupuesto, de los recursos necesarios para la elaboración de este Trabajo de Final de Grado, cuya finalidad es la de recoger los gastos y demás dispendios que se han previsto para la ejecución del Trabajo.

Puesto que el trabajo no consiste en realizar ningún tipo de obra o construcción, el presupuesto no consistirá en un presupuesto de ejecución material, sino que se centrará en evaluar el coste que se ha tenido a la hora de desarrollar el trabajo en términos de esfuerzo, transporte, conocimientos, licencias de software y otros conceptos.

Para la obtención de los precios unitarios se han tenido en cuenta los tres tipos de recursos distintos que se han empleado para la realización del proyecto:

- La mano de obra: Dos ingenieros supervisores titulados superiores y un estudiante de último curso de Grado de Ingeniería de Tecnologías Industriales.
- Las licencias de software, las cuales se han considerado en el presupuesto como si de versiones de uso profesional se tratasen, aunque se dispone de su versión educacional.
- Material inventariable.

El presupuesto se ha elaborado siguiendo los costes recomendados en las “Recomendaciones en la elaboración de presupuestos en actividades de I+D+I” recogidos por el servicio de gestión de la I+D+I de la Universidad Politécnica de Valencia.

En cuanto a las licencias de software, para la realización del trabajo se utilizaron cuatro licencias distintas: Ansys, Autodesk Inventor, Autodesk Autocad y Microsoft Office, de las cuales calculamos su precio unitario a partir del coste de estos al año. Ejemplo:

$$\text{Autodesk Inventor: } \frac{2886 \text{ €}}{\text{año}} \cdot \frac{\text{año}}{12 \text{ meses}} \cdot \frac{\text{mes}}{4 \text{ semanas}} \cdot \frac{\text{semana}}{5 \text{ días laborales}} \cdot \frac{\text{día lab}}{8 \text{ horas}} = 1,50 \text{ €/hora}$$

El material inventariable para la realización de este tipo de trabajo se reduce básicamente al ordenador y portátil utilizado. El precio de ambos es difícil de cuantificar al ser de uso personal, estar conectado a la red eléctrica, la necesidad de utilizar ratón, teclado y pantalla, etc. Por lo que consideramos ambos como uno solo y estableceremos un precio de 1000€ y una vida útil de 5 años. Quedando un precio unitario:

$$\text{Material: } \frac{1000 \text{ €}}{5 \text{ años}} \cdot \frac{\text{año}}{12 \text{ meses}} \cdot \frac{\text{mes}}{4 \text{ semanas}} \cdot \frac{\text{semana}}{5 \text{ días laborales}} \cdot \frac{\text{día lab}}{8 \text{ horas}} = 0,10 \text{ €/hora}$$

Siguiendo las suposiciones anteriores, el cuadro de precios unitario queda:

Código	Ud.	Descripción de las Ud. de obra	Cantidad	Precio	Importe
MO100	€/hora	Titular de Escuela Universitaria	1	31,40	31,4
MO101	€/hora	Catedrático/a de Escuela Universitaria	2	38,30	76,6
LICANS	€/hora	Licencia de Ansys	1	10,42	10,42

LICINV	€/hora	Licencia de Inventor	1	1,50	1,5
LICAUT	€/hora	Licencia de Autocad	1	1,04	1,04
LICMIC	€/hora	Licencia de Microsoft Office	1	0,06	0,06
MAT	€/hora	Ordenador y portátil	1	0,10	0,1

## 2. Cuadro de precios descompuestos

Código	Ud.	Descripción de las Ud. de obra	Rendimiento	Precio	Importe
<b>Análisis del sistema de ventilación mediante técnicas CFD</b>					
<b>CAP 01</b>	<b>h</b>	<b>Establecimiento del marco teórico de estudio</b>			
		Búsqueda de información de casos similares, aprendizaje del funcionamiento de programas de análisis y establecimiento de fundamentos del problema a resolver.			
MO100	h	Titular de Escuela Universitaria	1	31,4	31,40
MO101	h	Catedrático/a de Escuela Universitaria	0,13	38,3	4,98
LICANS	h	Licencia de Ansys	0,32	10,42	3,33
LICMIC	h	Licencia de Microsoft Office	0,18	0,06	0,01
MQ	h	Ordenador y portátil	0,96	0,1	0,10
	%	Costes Directos Complementarios	0,02	39,82	0,80
			<b>Coste Total (€/h)</b>		40,62
Código	Ud.	Descripción de las Ud. de obra	Rendimiento	Precio	Importe
<b>CAP 02</b>	<b>h</b>	<b>Desarrollo, definición y simplificación de la geometría</b>			
		Preparación de la geometría para ser simulada, modificando y simplificando diferentes modelos hasta obtener el definitivo			
MO100	h	Titular de Escuela Universitaria	1	31,4	31,40
MO101	h	Catedrático/a de Escuela Universitaria	0,11	38,3	4,21
LICANS	h	Licencia de Ansys	0,04	10,42	0,42
LICINV	h	Licencia de Inventor	0,78	1,5	1,17
LICAUT	h	Licencia de Autocad	0,34	1,04	0,35
MQ	h	Ordenador y portátil	0,98	0,1	0,10
	%	Costes Directos Complementarios	0,02	37,65	0,75
			<b>Coste Total (€/h)</b>		38,40

Código	Ud.	Descripción de las Ud. de obra	Rendimiento	Precio	Importe
<b>CAP 03</b>	<b>h</b>	<b>Mallado</b>			
		Estudio, análisis y comparación de diferentes tipos de mallas hasta obtener el definitivo.			
MO100	h	Titular de Escuela Universitaria	1	31,4	31,40
MO101	h	Catedrático/a de Escuela Universitaria	0,05	38,3	1,92
LICANS	h	Licencia de Ansys	0,87	10,42	9,07
LICINV	h	Licencia de Inventor	0,09	1,5	0,14
MQ	h	Ordenador y portátil	0,97	0,1	0,10
	%	Costes Directos Complementarios	0,02	42,61	0,85
			<b>Coste Total (€/h)</b>		43,46
Código	Ud.	Descripción de las Ud. de obra	Rendimiento	Precio	Importe
<b>CAP 04</b>	<b>h</b>	<b>Análisis mediante técnicas CFD</b>			
<b>CAP 04.01</b>	<b>h</b>	<b>Parametrización de Ansys Fluent</b>			
		Estudio de los escenarios a simular y del tipo de análisis que queremos realizar, y estudio de como parametrizar este en Ansys Fluent			
MO100	h	Titular de Escuela Universitaria	1	31,4	31,40
MO101	h	Catedrático/a de Escuela Universitaria	0,14	38,3	5,36
LICANS	h	Licencia de Ansys	0,68	10,42	7,09
MQ	h	Ordenador y portátil	1	0,1	0,10
	%	Costes Directos Complementarios	0,02	43,95	0,88
			<b>Coste Total (€/h)</b>		44,83
<b>CAP 04.02</b>	<b>h</b>	<b>Simulación CFD</b>			
		Cálculo de resultados mediante técnicas CFD en Ansys Fluent			
LICANS	h	Licencia de Ansys	1	10,42	10,42
MQ	h	Ordenador y portátil	1	0,1	0,10
	%	Costes Directos Complementarios	0,02	10,52	0,21
			<b>Coste Total (€/h)</b>		10,73
<b>CAP 04.03</b>	<b>h</b>	<b>Interpretación de resultados</b>			
		Comprobación y verificación, mediante el uso de herramientas de Ansys Fluent, de los resultados obtenidos de la simulación			
MO100	h	Titular de Escuela Universitaria	1	31,4	31,40
MO101	h	Catedrático/a de Escuela Universitaria	0,08	38,3	3,06

LICANS	h	Licencia de Ansys	0,94	10,42	9,79
MQ	h	Ordenador y portátil	1	0,1	0,10
	%	Costes Directos Complementarios	0,02	44,36	0,89
			<b>Coste Total (€/h)</b>		45,25
<b>Código</b>	<b>Ud.</b>	<b>Descripción de las Ud. de obra</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Precio</b>	<b>Importe</b>
<b>CAP 05</b>	<b>h</b>	<b>Redacción de la memoria de trabajo</b>			
		Redacción del documento, generación de tablas, gráficos, mapas de colores, presupuestos, etc. Revisión y modificación de errores que pudiera contener y maquetación final del documento.			
MO100	h	Titular de Escuela Universitaria	1	31,4	31,40
MO101	h	Catedrático/a de Escuela Universitaria	0,11	38,3	4,21
LICANS	h	Licencia de Ansys	0,04	10,42	0,42
LICINV	h	Licencia de Inventor	0,78	1,5	1,17
LICAUT	h	Licencia de Autocad	0,34	1,04	0,35
LICMIC	h	Licencia de Microsoft Office	0,93	0,06	0,06
MQ	h	Ordenador y portátil	1	0,1	0,10
	%	Costes Directos Complementarios	0,02	37,71	0,75
			<b>Coste Total (€/h)</b>		38,46

### 3. Cuadro de mediciones

Código	Unidad	Descripción	Cantidad	Precio	Importe
<b>CAP 01</b>	<b>h</b>	<b>Establecimiento del marco teórico de estudio</b>	<b>30</b>	<b>40,62</b>	<b>1218,60</b>
			<b>Coste Total (€)</b>		1218,60
<b>CAP 02</b>	<b>h</b>	<b>Desarrollo, definición y simplificación de la geometría</b>	<b>23</b>	<b>38,40</b>	<b>883,20</b>
			<b>Coste Total (€)</b>		883,20
<b>CAP 03</b>	<b>h</b>	<b>Mallado</b>	<b>37</b>	<b>43,46</b>	<b>1608,02</b>
			<b>Coste Total (€)</b>		1608,02
<b>CAP 04</b>	<b>h</b>	<b>Análisis mediante técnicas CFD</b>			
<b>CAP 04.01</b>	<b>h</b>	<b>Parametrización de Ansys Fluent</b>	47	44,83	2107,01
<b>CAP 04.02</b>	<b>h</b>	<b>Simulación CFD</b>	28	10,73	300,44
<b>CAP 04.03</b>	<b>h</b>	<b>Interpretación de resultados</b>	61	45,25	2760,25
			<b>Coste Total (€)</b>		5167,70

<b>CAP 05</b>	<b>h</b>	<b>Redacción de la memoria de trabajo</b>	<b>87</b>	<b>38,46</b>	<b>3346,02</b>
			<b>Coste Total (€)</b>		<b>3346,02</b>

#### 4. Presupuesto total

Capítulo 01. Establecimiento del marco teórico de estudio.....	1218,60€
Capítulo 02. Desarrollo, definición y simplificación de la geometría.....	883,20€
Capítulo 03. Mallado.....	1608,02€
Capítulo 04. Análisis mediante técnicas CFD.....	5167,70€
Capítulo 05. Redacción de la memoria de trabajo.....	3346,02€

**PRESUPUESTO TOTAL DE EJECUCIÓN MATERIAL.....12223,54€**

Gastos Generales 13%.....1589,06€

Beneficio Industrial 6%.....733,41€

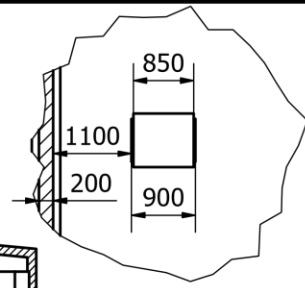
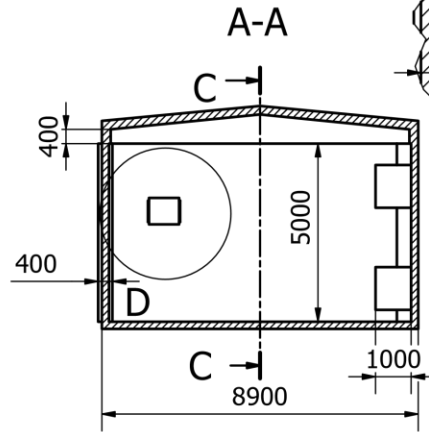
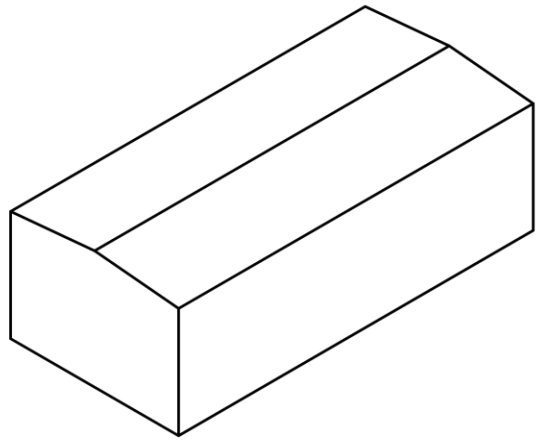
**PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA.....14546,01€**

IVA 21%.....3054,66€

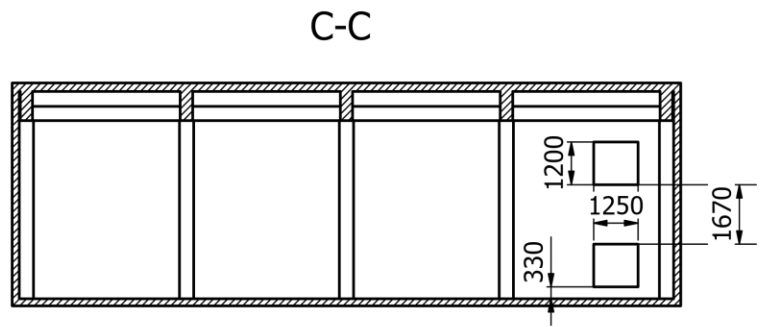
**PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN.....17600,68€**

Ascendiendo el presupuesto proyectado, a la expresada cantidad de:  
DIECISIETE MIL SEISCIENTOS EUROS CON SESENTA Y OCHO CÉNTIMOS.

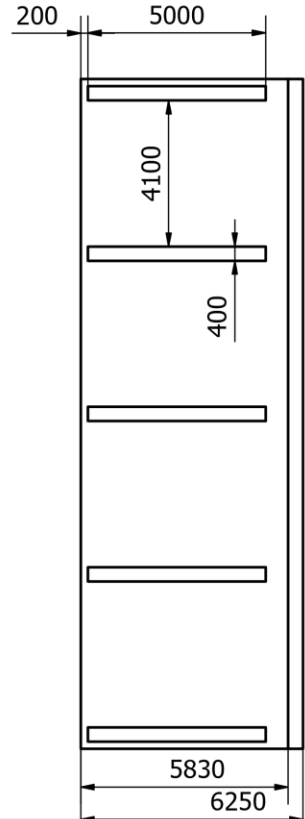
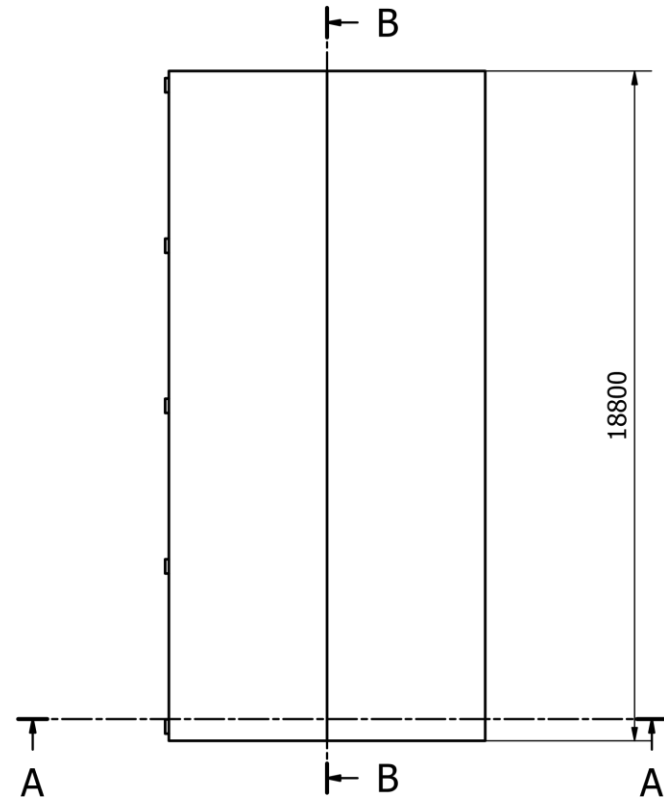
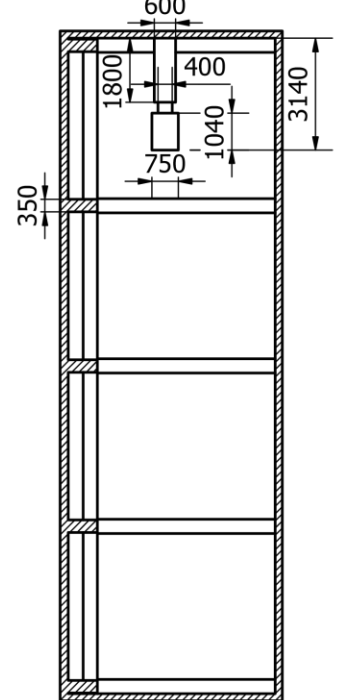
# PLANOS



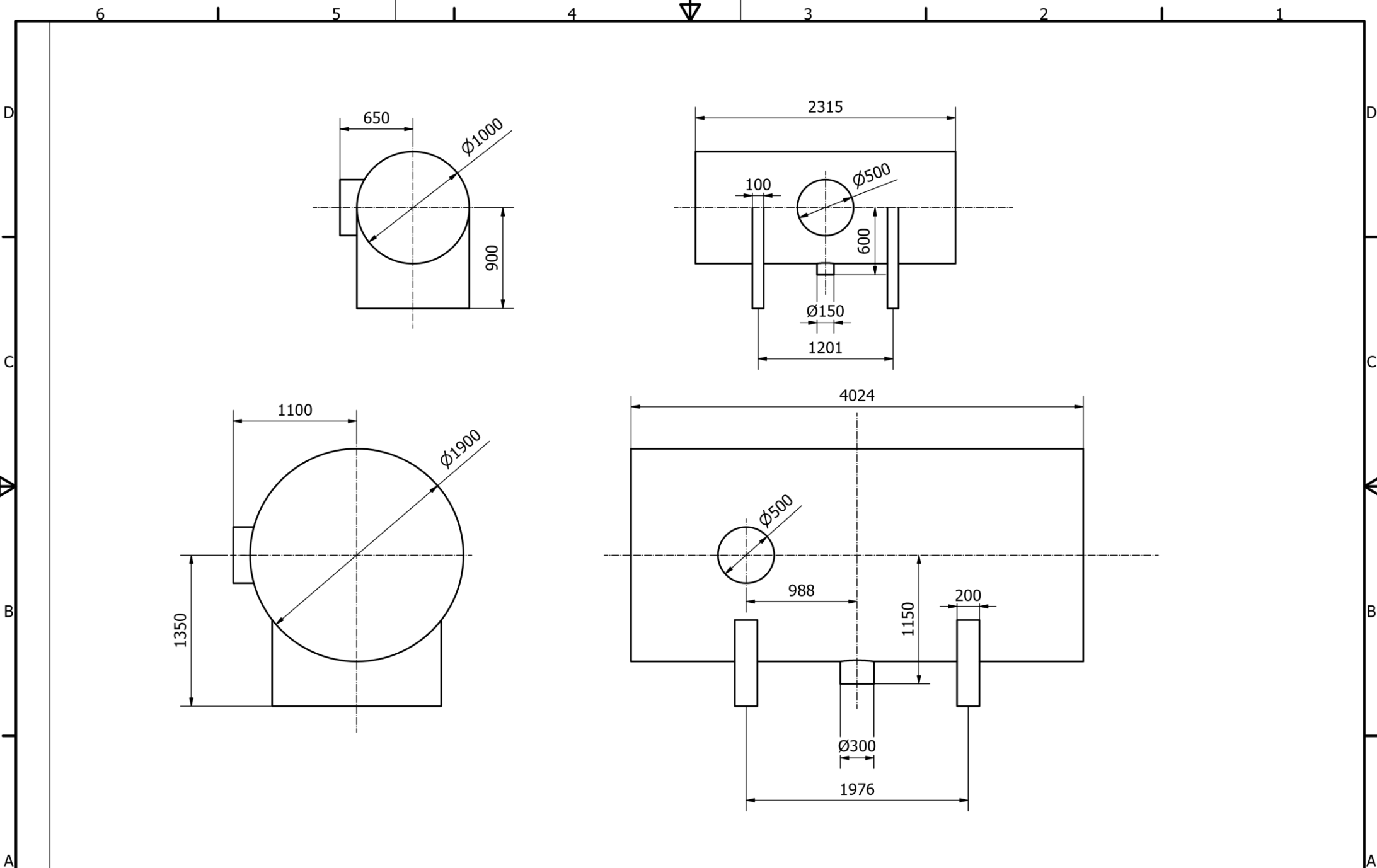
D ( 1 : 75 )

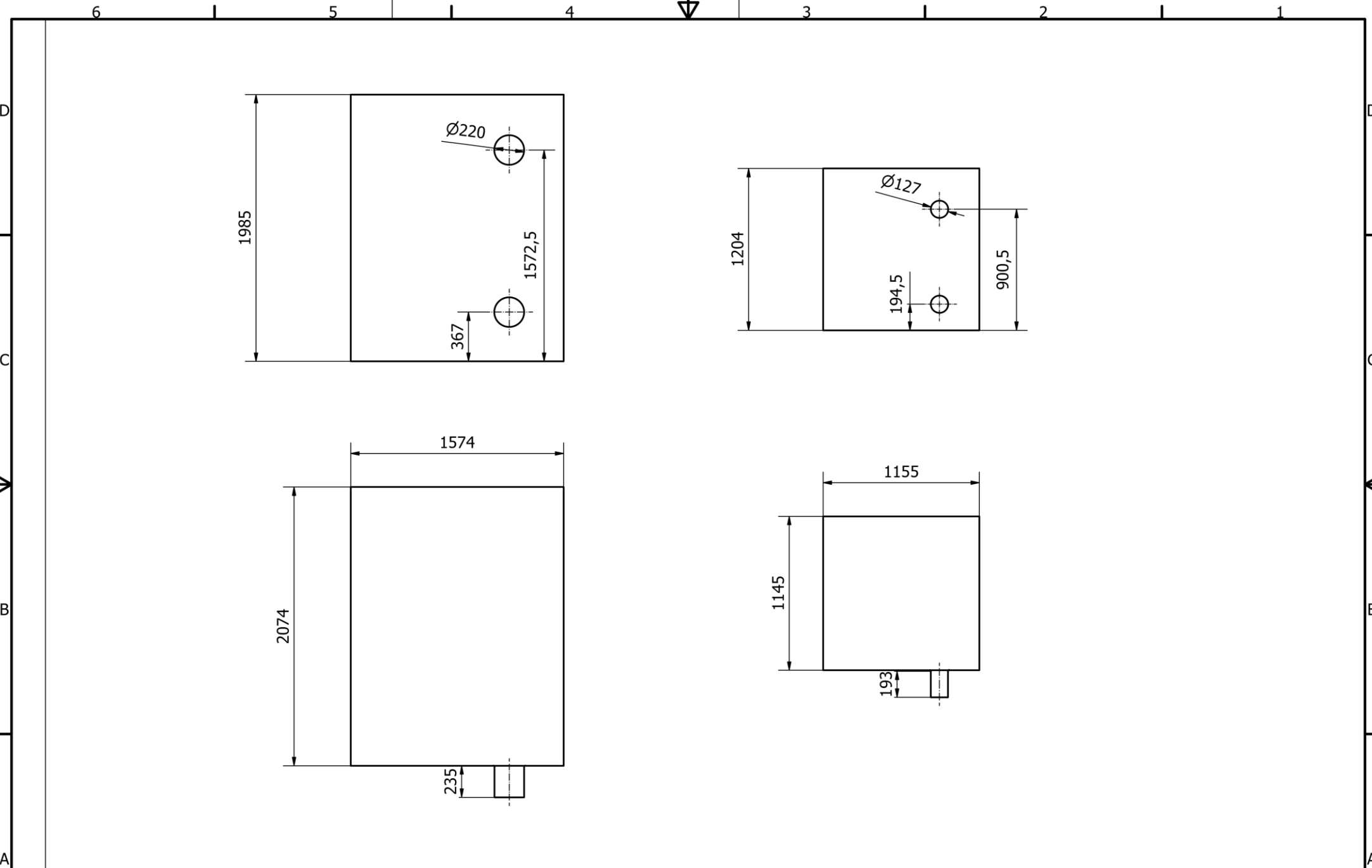


B-B ( 1 : 150 )









TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERIA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



ESCUOLA TÉCNICA SUPERIOR INGENIERÍA INDUSTRIAL VALENCIA

Proyecto: ANÁLISIS DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN DE UNA SALA DE MÁQUINAS MEDIANTE TÉCNICAS CFD

Plano: SOPLANTES

Autor: AGUSTÍN TENA SALAZAR

Fecha: JUNIO 2022

Escala: 1:25

Nº Plano:

3

