



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

# *DISEÑO, CÁLCULO Y OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE MANIPULACIÓN DE VELOS MEDIANTE ANÁLISIS CFD*

---

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER UNIVERSITARIO EN DISEÑO Y FABRICACIÓN INTEGRADA  
ASISTIDOS POR COMPUTADOR

Realizado por:

**Rafael López Ariza**

Director de Proyecto:

**Juan Fayos Sancho**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA**

**JUNIO DE 2019**

<b>1. INTRODUCCIÓN.</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS.</b>	<b>2</b>
<b>3. ALCANCE Y EXCLUSIONES.</b>	<b>2</b>
<b>4. RESUMEN.</b>	<b>3</b>
<b>5. ANTECEDENTES.</b>	<b>4</b>
5.1 INTRODUCCIÓN TEÓRICA.	4
5.2 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL CÁLCULO CFD.	6
5.3 HERRAMIENTAS COMERCIALES DE DISEÑO PARAMÉTRICO Y CÁLCULO CFD	7
5.3.1 NX Nastran ( <i>Siemens NX Unigraphics</i> ).	7
<b>6. PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO.</b>	<b>9</b>
6.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.	9
6.1.1. <i>Contexto.</i>	9
6.1.2. <i>Alcance del análisis.</i>	10
6.2 MATERIALES Y MÉTODOS	15
6.2.1 <i>Herramientas de software empleada</i>	15
6.2.2 <i>Metodología del estudio</i>	16
6.3 CRITERIOS DE MALLADO Y CONVERGENCIA PARA LA SIMULACIÓN CFD.	18
6.3.1 <i>Limpieza del modelo</i>	19
6.3.2 <i>Dominio computacional</i>	19
6.3.3 <i>Tipo de malla</i>	19
6.3.4 <i>Mallado de volúmenes</i>	20
6.3.5 <i>Mallado de la capa límite</i>	20
6.3.6 <i>Comprobaciones de la calidad de malla</i>	21
<b>7. CÁLCULOS, DISEÑO Y SIMULACIONES</b>	<b>22</b>
7.1 MESA DE SUCCIÓN.	23
7.1.1 <i>Modelado de la mesa de succión.</i>	25
7.1.2 <i>Análisis de la mesa de succión.</i>	25
7.2 RODILLO DE SUCCIÓN.	32
7.2.1 <i>Modelado del rodillo de succión.</i>	33
7.2.2 <i>Análisis del rodillo de succión.</i>	34
7.3 TUBOS DE UNIÓN.	38
7.3.1 <i>Modelado de los tubos de la mesa de succión.</i>	38
7.3.2 <i>Simulación de los tubos de la mesa de succión.</i>	41
7.4 CONJUNTO COMPLETO.	47
7.4.1 <i>Modelado del distribuidor de succión.</i>	47
7.4.2 <i>Análisis del conjunto completo.</i>	48
7.5 SELECCIÓN DEL VENTILADOR DE SUCCIÓN.	55
<b>8. MEJORA DE LA MESA DE SUCCIÓN.</b>	<b>59</b>
8.1. INTRODUCCIÓN.	59
8.2 LIMITACIONES DE DISEÑO.	59
8.3 DISEÑOS Y SIMULACIONES	60
8.3.1. <i>Iteración 1.</i>	62
8.3.2. <i>Iteración 2.</i>	65
8.3.3. <i>Iteración 3.</i>	67

<b>9. LÍNEAS FUTURAS.....</b>	<b>71</b>
<b>10. ANÁLISIS ECONÓMICO.....</b>	<b>71</b>
<b>11. CONCLUSIONES.....</b>	<b>73</b>
<b>12. REFERENCIAS.....</b>	<b>73</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Vista superior esquemática de la línea de automatización. ....	10
<b>Figura 2.</b> Individualizador y transportador de velos. ....	12
<b>Figura 3.</b> Dispositivo de aspiración (1), sistema de posicionado para velos (2) y rodillo individualizador de velos (3). ....	13
<b>Figura 4.</b> Rodillo de aspiración. ....	14
<b>Figura 5.</b> Mesa de succión. ....	15
<b>Figura 6.</b> Ejemplo de secuencia de operaciones para cálculo CFD. ....	16
<b>Figura 7.</b> Diagrama de flujo del proceso de diseño y simulación. ....	17
<b>Figura 8.</b> Oblicuidad de paralelogramo y triángulo ....	21
<b>Figura 9.</b> Relación de aspecto de un paralelogramo. ....	22
<b>Figura 10.</b> Planchas perforadas intercambiables. ....	23
<b>Figura 11.</b> Dispositivo de aspiración; curva característica. ....	24
<b>Figura 12.</b> Perforaciones en la mesa de succión. ....	25
<b>Figura 13.</b> Modelo CAE mesa de succión. ....	26
<b>Figura 14.</b> Configuración del solver. ....	27
<b>Figura 15.</b> Asignación de material al modelo FEM. ....	28
<b>Figura 16.</b> Malla de la mesa de succión. ....	29
<b>Figura 17.</b> Configuración del mallado inicial y advertencia de calidad de malla. ....	29
<b>Figura 18.</b> Configuración del mallado final y advertencia de calidad de malla ....	30
<b>Figura 19.</b> Velocidad del flujo; trayectorias. ....	31
<b>Figura 20.</b> Velocidad del flujo; taladros de aspiración. ....	31
<b>Figura 21.</b> Perforaciones en el rodillo de succión. ....	34
<b>Figura 22.</b> Modelo CAE rodillo de succión. ....	35
<b>Figura 23.</b> Malla del rodillo de succión. ....	35
<b>Figura 24.</b> Configuración del mallado final y advertencia de calidad de malla. ....	36
<b>Figura 25.</b> Velocidad del flujo; taladros de aspiración. ....	36
<b>Figura 26.</b> Velocidad del flujo; taladros de aspiración. ....	37
<b>Figura 27.</b> Modelado de los tubos de succión ....	39
<b>Figura 28.</b> Croquis 3D de la fibra neutra del tubo. ....	40
<b>Figura 29.</b> Tubo de la mesa de succión en NX Unigraphics. ....	40
<b>Figura 30.</b> Nuevo estudio FEM. ....	41
<b>Figura 31.</b> Mallado automático del modelo. ....	42
<b>Figura 32.</b> Comprobación de la calidad de elementos de la malla. ....	43
<b>Figura 33.</b> Control del tamaño de malla. ....	43
<b>Figura 34.</b> Flujo de aspiración en el tubo de la mesa. ....	44
<b>Figura 35.</b> Abertura al distribuidor de succión. ....	45
<b>Figura 36.</b> Velocidad del flujo; gradiente (element). ....	45
<b>Figura 37.</b> Velocidad del flujo; boca de aspiración. ....	46
<b>Figura 38.</b> Dimensiones del distribuidor de succión. ....	48
<b>Figura 39.</b> Modelo CAE rodillo de succión. ....	48
<b>Figura 40.</b> Modelo CAE conjunto de succión. ....	49
<b>Figura 41.</b> Malla del rodillo de succión. ....	50
<b>Figura 42.</b> Fusión de mallas, creación de malla multicuerpo. ....	51

<b>Figura 43.</b> Velocidad del flujo; conjunto completo.....	51
<b>Figura 44.</b> Velocidad de flujo, taladros de aspiración (conjunto completo).....	52
<b>Figura 45.</b> Menú de inicio Quick fan selector. ....	55
<b>Figura 46.</b> Menú de selección Quick fan selector. ....	56
<b>Figura 47.</b> Submenú de configuración Quick fan selector. ....	57
<b>Figura 48.</b> Resultados de selección de producto Quick fan selector. ....	58
<b>Figura 49.</b> Comparación de los modelos preseleccionados.....	58
<b>Figura 50.</b> Velocidad del flujo; conjunto completo.....	61
<b>Figura 51.</b> Velocidad de flujo, taladros de aspiración de la mesa de succión (conjunto completo). .....	61
<b>Figura 52.</b> Diseño de mesa de succión alternativa 1.....	63
<b>Figura 53.</b> Malla de la mesa de succión 1. ....	63
<b>Figura 54.</b> Velocidad del flujo; taladros de aspiración.....	64
<b>Figura 55.</b> Diseño de mesa de succión alternativa 2.....	65
<b>Figura 56.</b> Malla de la mesa de succión 2. ....	65
<b>Figura 57.</b> Velocidad del flujo; trayectorias. ....	66
<b>Figura 58.</b> Diseño de mesa de succión alternativa 3.....	67
<b>Figura 59.</b> Divisor de flujo. ....	67
<b>Figura 60.</b> Simulación del divisor de flujo. ....	68
<b>Figura 61.</b> Malla de la mesa de succión 2. ....	68
<b>Figura 62.</b> Velocidad del flujo; trayectorias. ....	69
<b>Figura 63.</b> Velocidad del flujo; taladros de aspiración.....	70

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1.</b> Ecuación de continuidad. ....	4
<b>Ecuación 2.</b> Ecuación de conservación de momento alrededor del eje X. ....	4
<b>Ecuación 3.</b> Ecuación de conservación de momento alrededor del eje Y. ....	4
<b>Ecuación 4.</b> Ecuación de conservación de momento alrededor del eje Z. ....	4
<b>Ecuación 5.</b> Ecuación de conservación de energía. ....	5
<b>Ecuación 6.</b> Ecuación general de los gases ideales. ....	6
<b>Ecuación 7.</b> Ecuación del número de Reynolds ....	26
<b>Ecuación 8.</b> Velocidad característica del fluido.....	26
<b>Ecuación 9.</b> Diámetro hidráulico.....	26
<b>Ecuación 10.</b> Resultado del número de Reynolds para el caso de estudio.....	26

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Ventajas e inconvenientes de los sistemas de manipulación. ....	11
<b>Tabla 2.</b> Resultados de pruebas de aspiración de la mesa de succión. ....	24
<b>Tabla 3.</b> Características de la mesa de succión. ....	25
<b>Tabla 4.</b> Caudales de aspiración de cada agujero. ....	32
<b>Tabla 5.</b> Características del rodillo de succión. ....	33
<b>Tabla 6.</b> Caudales de aspiración de cada agujero. ....	37
<b>Tabla 7.</b> Cálculo del caudal de aspiración en los tubos. ....	46
<b>Tabla 8.</b> Caudales de aspiración de cada taladro en la mesa de succión (conjunto completo). 53	
<b>Tabla 9.</b> Caudales de aspiración de cada taladro en el rodillo de succión (conjunto completo). .....	53
<b>Tabla 10.</b> Caudales de aspiración de cada taladro en el rodillo de succión (iteración final). ....	54
<b>Tabla 11.</b> Requisitos del sistema de succión para selección de ventilador. ....	57
<b>Tabla 12.</b> Caudales de aspiración de cada agujero. ....	62
<b>Tabla 13.</b> Caudales de aspiración de cada agujero. ....	70
<b>Tabla 14.</b> Presupuesto.....	72

## **1. Introducción.**

La implantación de sistemas automatizados en la industria repercute positivamente en la competitividad de esta. Una empresa manufacturera automatizada es capaz de generar un mayor número de productos a un menor coste por unidad que las empresas no automatizadas.

Sin embargo, la implantación de sistemas automatizados a veces requiere de ciertos cambios en el proceso de manufactura. Es posible que se tengan que realizar cambios físicos en la planta de producción, cambios técnicos de adaptación de la maquinaria existente e incluso cambios logísticos de suministro de materias primas. Es labor del departamento de ingeniería responsable de la implementación de la automatización el minorar esos cambios en la medida de lo posible, sin dejar de lado que la meta de dicho departamento es asegurar el correcto funcionamiento del sistema automatizado.

Por ello, una solución técnicamente óptima puede no ser posible si su implementación y puesta en marcha implican una serie de cambios y costes en la producción industrial inasumibles para la empresa.

En el presente documento se expondrá un ejemplo pormenorizado de esta situación, correspondiente a una sección concreta de una máquina de manipulación automática de productos. Este estudio, por tanto, se corresponde con el análisis computacional teórico de un diseño en el que se ha resuelto de manera experimental mediante el método de prueba y error la problemática que posteriormente se detallará. Asimismo, se pretende realizar un rediseño del sistema que mejore su efectividad, sirviendo dicho resultado para una mejora real de la máquina en caso de que su funcionamiento no sea correcto.

INREMA S.L., empresa en la cual el autor trabaja actualmente, se especializa en todo tipo de proyectos de transformación de máquinas, automatización de líneas, diseño de utillajes y máquinas a medida. Está a cargo de la implantación del sistema de automatización para la empresa manufacturera de placas de techo THU [1].

## 2. Objetivos.

Los objetivos del presente trabajo se enumeran a continuación:

### - Objetivos principales:

- Estudiar mediante técnicas de ingeniería asistida por computador el funcionamiento de una instalación industrial de aspiración para velos.
- Optimizar el sistema de aspiración mencionado realizando un proceso iterativo de diseño y simulación, sin alterar el suministro de la instalación.
- Realizar un TFM correspondiente a la temática expuesta en los objetivos anteriores para cumplir con los requisitos para la obtención del título de Máster en Diseño y Fabricación Integrada Asistidos por Computador.

### - Objetivos secundarios:

- Instruirme en el manejo de programas tipo CAD/CAE (Computer Assisted Design / Computer Assisted Engineering).
- A título personal, adquirir conocimientos sobre un tema que encuentre verdaderamente interesante; el cálculo CFD aplicado a la industria.

Para llevar a cabo los anteriores objetivos, el proyecto se estructurará en diversos apartados, los cuales abarcarán desde el proceso de documentación hasta las simulaciones realizadas mediante un software de CAD/CAE.

## 3. Alcance y exclusiones.

Este trabajo de fin de master contempla el proceso de dimensionamiento de una instalación de succión. Se parte de que los componentes de dicha instalación ya están diseñados, así como de unas características de flujo de aire resultantes en el punto final de la instalación tales que aseguran su correcto funcionamiento.

El trabajo a realizar, por tanto, abarca el análisis del flujo de aire aguas arriba y evaluación de pérdidas de caudal en la instalación. El fin de parte de este trabajo es la selección de una fuente de suministro de aire tal que compense dichas pérdidas y asegure que el aire requerido se suple de manera constante.

Asimismo, tras la selección de la mencionada fuente, se realiza un proceso de mejora iterativa mediante análisis CFD a de uno de los componentes de la instalación (cuyo buen funcionamiento

es directamente proporcional a lo energético que sea el flujo que recibe), con el objetivo de reducir las pérdidas que genera en el sistema y aumentar la eficiencia de dicho componente.

Dado que se puede asegurar que el punto de trabajo de la fuente (que es un elemento comercial de catálogo) proporcionará al sistema un flujo de aire un poco más energético de lo que se requiere, en el diseño mecánico de los componentes se han previsto la inserción de accesorios para aumentar las pérdidas de carga en otro de los componentes de la instalación, que debe trabajar con unas características de flujo muy concretas.

A razón de lo anteriormente expuesto, el presente proyecto no contempla:

- El proceso de diseño de ningún componente mecánico de la instalación (puesto que ya se ha realizado por el departamento técnico de INREMA S.L.).
- La determinación del valor de pérdida de carga adicional en el componente crítico.
- El proceso de fabricación de ningún componente mecánico.

## 4. Resumen.

Este trabajo fin de máster plantea la resolución de una funcionalidad de una máquina industrial mediante análisis de fluidos computacional. Trata acerca del dimensionamiento y optimización del sistema de aspiración de la mencionada máquina, gracias a la cual se automatiza parcialmente una línea de producción de placas metálicas para techos.

Para el problema concreto de esta aplicación, se tiene un buffer de velos cuadrados porosos de espesor micrométrico que se ha de delaminar para poderlos colocar encima de unas planchas metálicas de techo. Mecánicamente la manipulación consta de un rodillo succionador que delamina los velos y los deposita en una mesa de inspección, donde un brazo robótico equipado con una mesa de succión lo posiciona y lo deposita en la plancha.

Según lo anteriormente expuesto, se debe dimensionar una instalación que supla el caudal necesario de aspiración para que ambos dispositivos funcionen bien simultáneamente.

Para ello se parte del dato empírico de caudal necesario para el correcto funcionamiento del rodillo. Dimensionando el resto de la instalación aguas arriba (modelando los componentes de calderería y simulando los volúmenes negativos de estos, por donde fluye el aire), se ha de llegar a que el caudal de partida sea en última estancia el suministrado por la instalación al rodillo.

Una vez determinado el caudal total necesario de aspiración, se selecciona un ventilador industrial que lo suministre y tras ello, se rediseña la mesa de succión para optimizarla.

Tras haber realizado el trabajo se han observado ciertas correlaciones entre la forma de la mesa de succión y su desempeño, así como el efecto que tiene este hecho en la capacidad de aspiración del rodillo.

Asimismo, se puede determinar en base a los resultados obtenidos, que el sistema de aspiración puede ser optimizado si se bifurca la canalización de aire de tal manera que la mesa de succión se alimente por 4 tomas en lugar de una.

Si se dispusiese de métodos de fabricación de prototipado rápido tales que permitiesen una mayor complejidad de la geometría se podría continuar con el desarrollo del modelo.

## 5. Antecedentes.

### 5.1 Introducción teórica.

Las ecuaciones de Navier-Stokes definen el flujo de un fluido newtoniano en fase única. El objetivo fundamental de la dinámica de fluidos computacional es la resolución de esas ecuaciones para una hipótesis concreta, con unas condiciones de contorno preestablecidas.

La solución a las ecuaciones de Navier-Stokes es la velocidad del flujo, para cada punto del dominio del fluido definido en cada caso. Una vez se tiene la velocidad del flujo, se pueden obtener el resto de los parámetros como presión o temperatura, haciendo uso de ecuaciones auxiliares.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

**Ecuación 1.** Ecuación de continuidad.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial(p)}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left[ \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right]$$

**Ecuación 2.** Ecuación de conservación de momento alrededor del eje X.

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial(p)}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left[ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right]$$

**Ecuación 3.** Ecuación de conservación de momento alrededor del eje Y.

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial(p)}{\partial z} + \frac{1}{Re} \left[ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right]$$

**Ecuación 4.** Ecuación de conservación de momento alrededor del eje Z.

$$\frac{\partial(E_T)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_T)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_T)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_T)}{\partial z} = -\frac{\partial(up)}{\partial z} - \frac{\partial(vp)}{\partial z} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} - \frac{1}{Re*Pr} \left[ \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] +$$

$$+ \frac{1}{Re} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u\tau_{xz} + v\tau_{yz} + w\tau_{zz}) \right]$$

**Ecuación 5.** Ecuación de conservación de energía.

Los términos de las ecuaciones son los siguientes:

- Coordenadas: (x, y, z).
- Componentes de velocidad: (u, v, w).
- Tiempo: (t).
- Presión: (P).
- Densidad: ( $\rho$ ).
- Tensor de esfuerzos: ( $\tau$ ).
- Energía total: (Et).
- Número de Reynolds: (Re).
- Número de Prandtl: (Pr).

El conjunto de ecuaciones de Navier-Stokes se compone de una ecuación de conservación de masa, tres ecuaciones de conservación de momento y una ecuación de conservación de energía, todas ellas dependientes del tiempo.

En el conjunto de ecuaciones hay cuatro variables independientes; las coordenadas x, y, z del dominio definido y el tiempo. Hay seis variables dependientes; la densidad, la presión, la temperatura (contenida en la ecuación de energía (Et)) y los componentes de velocidad asociados a las coordenadas espaciales (u, v, w).

Las variables “q” que aparecen en la ecuación de conservación de energía son los componentes del flujo de calor. El número de Prandtl es el ratio entre la velocidad de difusión de la cantidad de movimiento y la velocidad de difusión de calor un material dado.

Las variables “ $\tau$ ” son componentes del tensor de esfuerzos, el cual es una matriz de 3er grado cuyos elementos son la segunda derivada de los componentes del vector velocidad de cada punto del dominio.

Para resolver un determinado problema, se deben resolver las cinco ecuaciones de manera simultánea. Sin embargo, para que el sistema de ecuaciones tenga solución, hace falta una sexta ecuación, dado que se tienen seis incógnitas. La sexta ecuación debe relacionar la presión, temperatura y densidad del fluido. Para gases ideales, la ecuación de estado es:

$$PV = nRT$$

**Ecuación 6.** Ecuación general de los gases ideales.

Las ecuaciones de Navier-Stokes se pueden simplificar suprimiendo los términos referentes a los efectos viscosos. Aplicada esta simplificación, las ecuaciones que definen el flujo pasan a ser las ecuaciones de Euler.

En concreto, las ecuaciones de Euler suprimen los términos de la difusión. La difusión es un proceso físico que ocurre en un flujo en el cual una propiedad se transporta por el movimiento aleatorio de las moléculas del fluido. La difusión es función del tensor de esfuerzos y de la viscosidad del fluido. Si se desprecian los términos de difusión, los valores del tensor de esfuerzos “ $\tau$ ” se eliminan de las ecuaciones, los efectos viscosos del fluido se desprecian y por tanto se desprecia a su vez el efecto de las capas límite en las paredes sólidas del dominio en la resolución del problema.

## 5.2 Evolución histórica del cálculo CFD.

Las ecuaciones de Navier-Stokes definen el flujo de un fluido newtoniano en fase única. El objetivo fundamental de la dinámica de fluidos computacional es la resolución de esas ecuaciones para una hipótesis concreta, con unas condiciones de contorno preestablecidas.

La historia de la dinámica de fluidos computacional se inicia a finales de la década de los 50, con el auge de la investigación aeroespacial. En aquella época la NASA buscaba desarrollar un modelo de cálculo para prever los comportamientos de múltiples materiales bajo condiciones de alta presión, en las cuales, los sólidos se comportan como fluidos.

En 1957, un equipo de ingenieros desarrolló el primer método de simulación CFD funcional, en las instalaciones de Los Alamos; el método Particle-In-Cell (PIC). El método PIC modelaba las partículas, las cuales portaban la información del material en una malla Euleriana bidimensional. Trataba el flujo compresible de múltiples materiales sin restricciones en el contorno ni deformación en el mismo. Continuaron trabajando en metodologías de programación y en modelos computacionales, creando la base de los programas de cálculo que existen actualmente.

En la década de los 70, un grupo de trabajo del Imperial College de Londres desarrollaron el tipo de ecuaciones k- $\epsilon$  que se usan hoy en día en computación. El sistema de ecuaciones k- $\epsilon$  describen un modelo turbulento, es decir, una herramienta que se usa para determinar los valores de la velocidad del flujo en régimen turbulento. Las ecuaciones k- $\epsilon$  determinan cuanta

energía cinética contienen las turbulencias (k) y cuán rápido esa energía se disipa al pasar de régimen turbulento a laminar.

Posteriormente estos modelos fueron desarrollándose dando lugar a metodologías de cálculo más precisas y computacionalmente más exigentes.

En los años 80 se comienzan a crear los códigos CFD que se comercializan hoy en día en los softwares de cálculo especializados.

A partir de la década de los 2000 se desarrollaron programas de código abierto con modelos de cálculo CFD, haciendo posible su acceso a un gran número de personas.

### **5.3 Herramientas comerciales de diseño paramétrico y cálculo CFD**

#### **5.3.1 NX Nastran (Siemens NX Unigraphics).**

Nastran es un programa de análisis por elementos finitos originalmente desarrollado por la NASA a finales de los años 60. El código fuente de Nastran se encuentra en un gran número de paquetes de software, distribuidos por un buen número de compañías.

El software Nastran se codificó para agilizar el diseño de vehículos espaciales. Salió a la venta a particulares en 1971. Está codificado en FORTRAN y hoy en día contiene más de un millón de líneas de código. Es compatible con una gran variedad de ordenadores y sistemas operativos, desde ordenadores de sobremesa hasta grandes superordenadores.

Nastran contiene multitud de módulos específicos para diversas aplicaciones. Entre sus módulos se pueden encontrar bloques de cálculo para análisis lineales y no lineales; respuesta dinámica, acústica, análisis térmicos, aeroelasticidad u optimización.

Fue concebido desde el principio para estructuralmente se componga de diversos módulos, subrutinas diseñadas para realizar una tarea concreta (procesar el modelo geométrico, construir las matrices, aplicar las restricciones...). Los módulos son controlados por un lenguaje interno llamado Direct Matrix Abstraction Program (DMAP).

El uso comercial de Nastran ha permitido analizar el comportamiento de estructuras elásticas de cualquier tamaño y forma. Por ejemplo, la industria automovilística usa el software para el diseño de los sistemas de suspensión y dirección. También se usa para el diseño en los sectores ferroviario, civil y energético entre otros.

NX Nastran es el resultado de la adquisición del software MSC.Nastran de 2001 por UGS. A partir de entonces, la plataforma CAE de Nastran se añadió al paquete NX Unigraphics de la corporación EDS/UGS. En 2007 SIEMENS adquirió el producto competo, pasando a llamarse SIEMENS PLM Software.

NX Nastran es hoy día parte del paquete SIEMENS PLM Software Simcenter 3D.

## **6. Planteamiento del trabajo.**

En este apartado se definirá el problema a resolver en su contexto, analizando la solución adoptada de manera experimental y proponiendo una nueva solución al problema de diseño que resuelva de manera más eficiente el problema.

El diseño y la simulación del conjunto solución se abordarán de manera pormenorizada, dado que el sistema requiere de dos estaciones diferenciadas, aunque conectadas entre sí.

### **6.1 Descripción del problema.**

#### **6.1.1. Contexto.**

La empresa THU de conformado de paneles de falso techo, perteneciente al grupo de inversión Zriser, ha adjudicado a INREMA una obra para realizar una máquina automática para incrementar la producción de su factoría.

En concreto, la instalación que se ha de automatizar se corresponde con una línea de manipulación mixta de, por un lado, paneles metálicos perforados de diferentes tamaños y formas, y por otro, diversos velos cuadrados de un tejido transpirable de muy poco espesor.

El proceso de producción de estas estaciones es el siguiente:

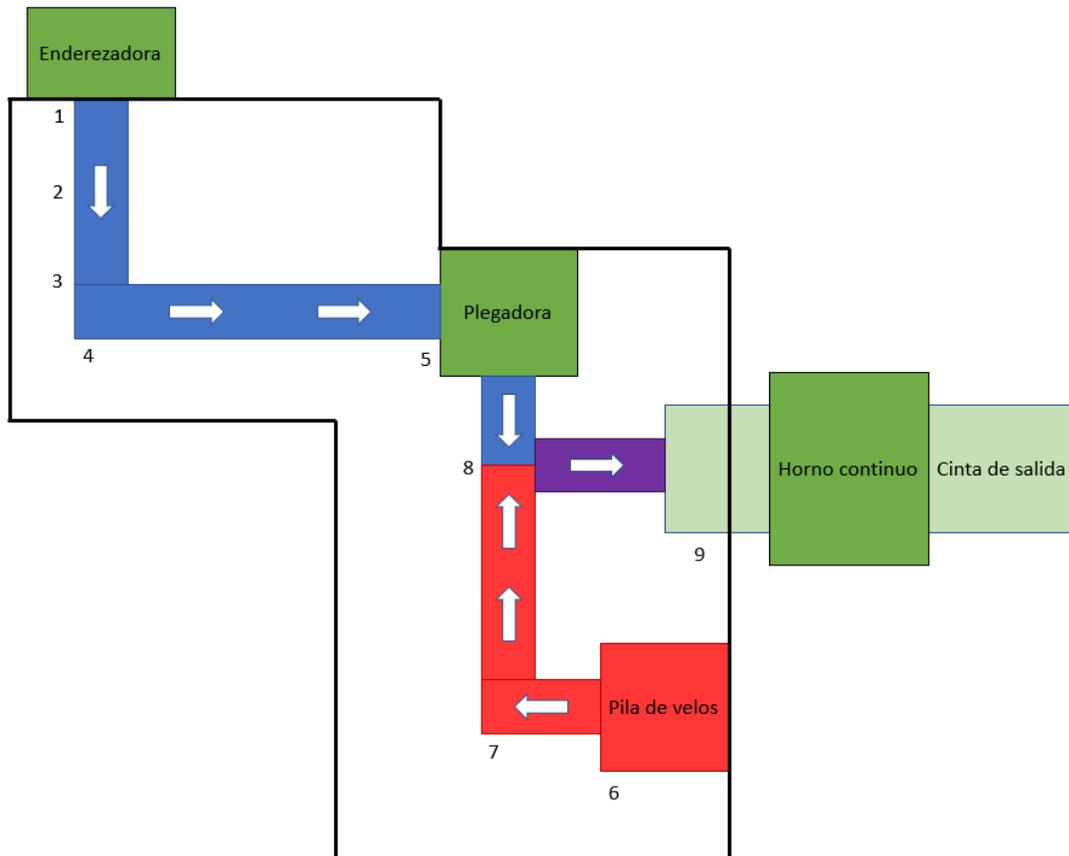
Las chapas perforadas salen por una enderezadora, cuya cadencia es de 20 unidades por minuto. A continuación, han de introducirse en una plegadora de menor cadencia que conforma los bordes de las chapas con unos moldes intercambiables (con los bordes plegados, la chapa podrá colocarse en los raíles de la estructura del falso techo).

Una vez instaladas, las chapas perforadas permiten la ventilación del local de manera uniforme, pero como contrapartida, no evitan de manera tan eficaz la caída de suciedad de la estructura arquitectónica del techo y no son tan efectivas a la hora de aislar acústicamente el local, provocando resonancias y ecos en la cámara existente entre el falso techo y la estructura arquitectónica del techo.

Para evitar esto, se han de colocar unos velos traspirables cuadrados de pequeño espesor impregnados de pegamento termofusible por una de las caras que tapan las perforaciones de los paneles de techo, aislando acústicamente la cámara del falso techo y evitando la caída de suciedad al interior, mejorando la higiene del local.

Una vez posicionados en los paneles, cada unidad con su velo es transportada mediante una cinta a un horno continuo que calienta el conjunto, esto hace que el pegamento se funda y el velo se adhiera al panel, obteniendo un conjunto listo para poder ser instalado.

El siguiente esquema muestra el proceso descrito anteriormente:



**Figura 1.** Vista superior esquemática de la línea de automatización.

### 6.1.2. Alcance del análisis.

El alcance del presente proyecto comprende el análisis del sistema de manipulación de velos marcado en rojo en la figura 1; en concreto se analizará el sistema de aspiración diseñado para tal fin y mediante un proceso iterativo se remodelará para asegurar su correcto funcionamiento.

En lo que al sistema de manipulación se refiere, han de aclararse las siguientes condiciones de diseño impuestas:

1. El material se suministra apilado en paquetes de 500 unidades. Esto es un gran inconveniente (dadas las características del mismo mencionadas anteriormente) a la hora de separarlos.

Técnicamente es más conveniente si el cliente adquiriese este material en forma de rollo, de modo que se podría desenrollar y guillotinar para poder tener unidades ya

separadas. Sin embargo, el hecho de que una de las caras lleve una capa de pegamento termofusible obliga al cliente a adquirir los paquetes ya impregnados.

2. El velo ha de posicionarse encima de la bandeja tapando todas las perforaciones de esta. Esto obliga a, una vez separado el velo del buffer, centrar el velo para saber con exactitud en qué posición está con respecto al manipulador.  
Hay que tener presente que las chapas tienen multitud de patrones de perforación y, además, son de dos tamaños diferentes.

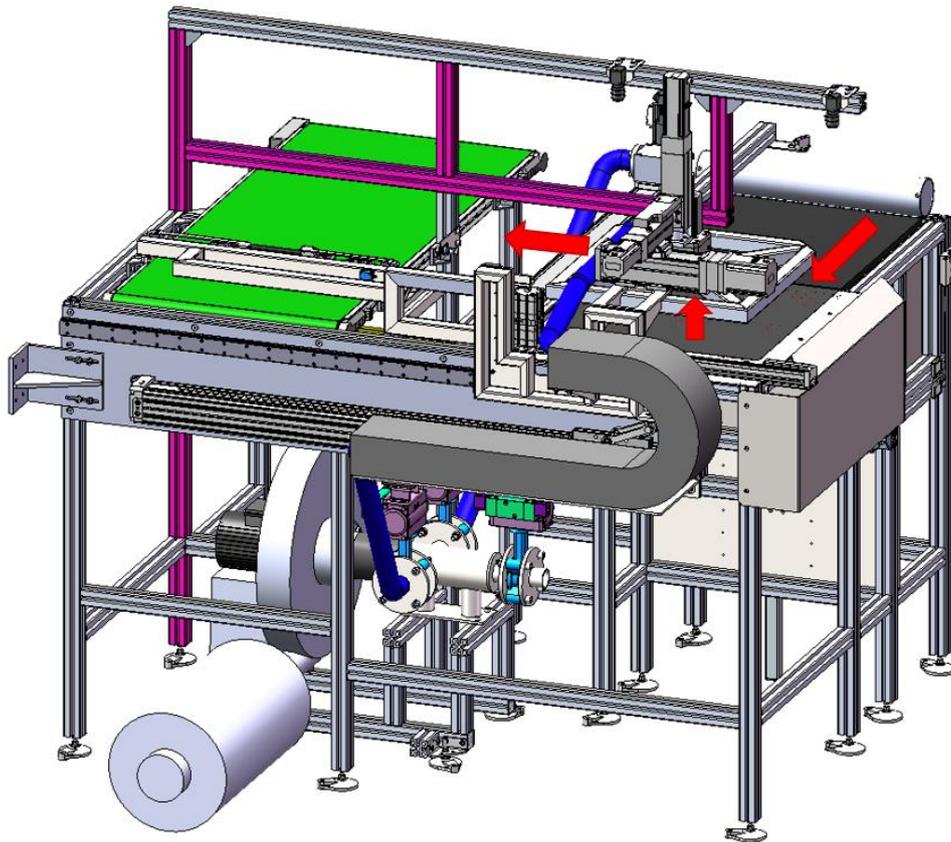
Dada las limitaciones del sistema de manipulación, se ha optado por un sistema de aspiración de alto caudal y baja presión, surtido por un ventilador centrífugo. En las siguientes tablas se detallan las ventajas e inconvenientes de cada sistema de separación contemplado:

**Tabla 1.** Ventajas e inconvenientes de los sistemas de manipulación.

Ventajas	Inconvenientes
<b><u>Separación mediante manipulador con ventosas de succión</u></b>	
Fácil implementación, sistema de fácil ajuste en puesta en marcha.	Al ser piezas transpirables, es imposible hacer un vacío efectivo.
<b><u>Separación mediante manipulador con anzuelos móviles</u></b>	
Sistema simple, válido para la manipulación de elementos transpirables.	Los velos son de un espesor tan pequeño que es imposible asegurar que se adhiera una sola unidad.
<b><u>Separación mediante manipulador con una superficie de velcro</u></b>	
Sistema simple, válido para la manipulación de elementos transpirables.	Los velos son de un tejido no textil, no se adhieren a la parte de plástico del velcro.
<b><u>Separación mediante manipulador con una superficie polarizada</u></b>	
Sistema válido para la manipulación de elementos transpirables.	Sistema difícil de cuantificar, además puede inducir electricidad estática en el buffer.
<b><u>Separación mediante manipulador con un sistema de succión de alto caudal</u></b>	
Asegura la manipulación de los velos, pues por concepto el aire ha de fluir continuamente, generando una depresión.	Posibilidad de que se adhiera más de un velo de la pila al manipulador.

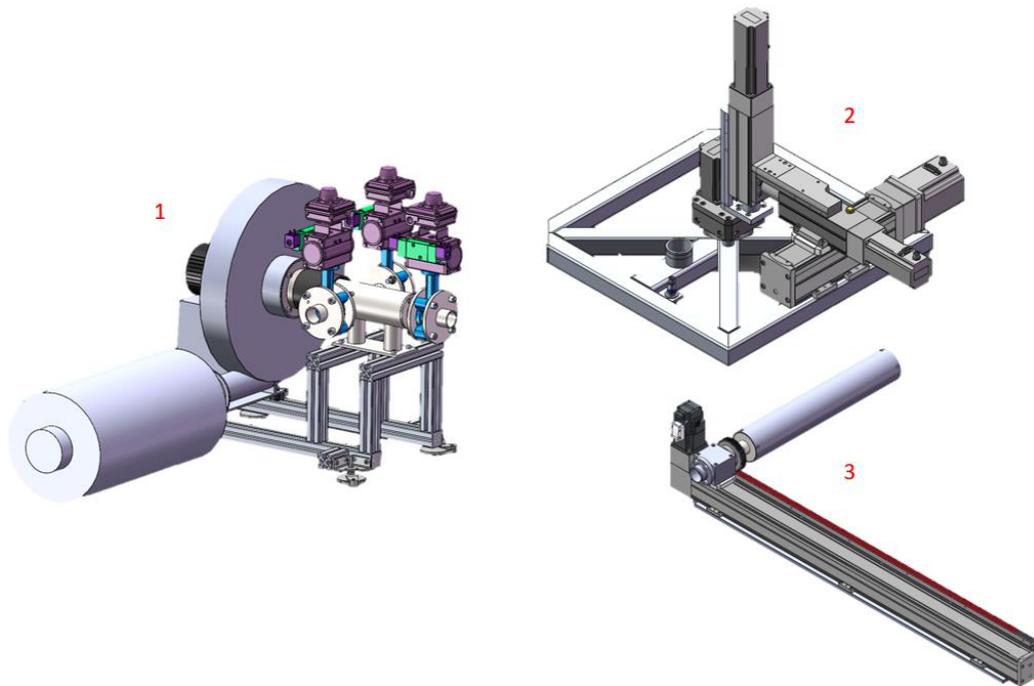
Habiendo seleccionado el método de manipulación, se ha de diseñar un sistema capaz de minimizar los inconvenientes del mismo.

Una vez realizado en la empresa el correspondiente desarrollo mecánico y las pruebas empíricas, se ha llegado a la solución mostrada en la siguiente imagen; que se corresponde con la parte de color rojo de la figura 2:



**Figura 2.** Individualizador y transportador de velos.

El sistema de succión se compone de los elementos que se pueden apreciar en la siguiente imagen:



**Figura 3.** Dispositivo de aspiración (1), sistema de posicionado para velos (2) y rodillo individualizador de velos (3).

El sistema de manipulación funciona de la siguiente manera:

El rodillo succionador aspira el primer velo del buffer y lo desenrolla en una mesa perforada, en ese punto, la mesa del manipulador lo succiona y lo ajusta a una posición de referencia gracias a un sistema de visión artificial situado sobre las esquinas de dicha posición.

Este sistema es capaz de ver si hay dos velos superpuestos, pues las esquinas tendrían forma de W. En ese caso un cilindro neumático que arrastra una escobilla barre los velos y los descarta.

Cuando el manipulador con la mesa de succión ha posicionado el velo en la referencia, este se desplaza hacia la posición de la plancha y lo deposita encima de modo que el velo quede cubriendo todas las perforaciones de la plancha.

El sistema de aspiración que alimenta a los manipuladores de succión de velos se explica como sigue:

Un ventilador genera un flujo de aire de gran caudal y baja presión. Al mismo se le acopla un distribuidor en la boca de aspiración con 3 salidas: Una para cada dispositivo (rodillo y mesa) y una salida al aire.

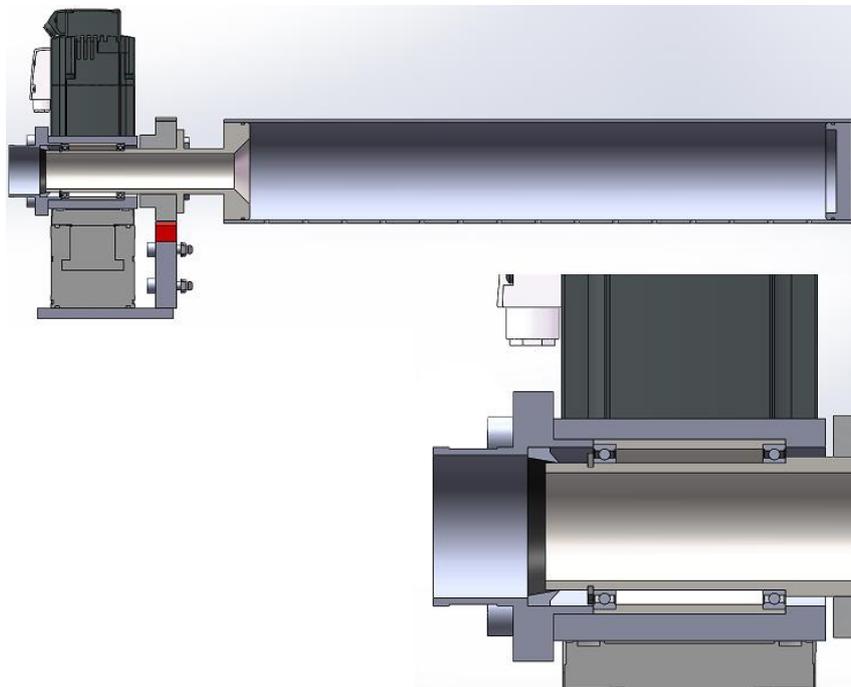
Mediante válvulas de mariposa se van conmutando los diferentes sistemas. La instalación puede requerir de ambos dispositivos funcionando al mismo tiempo porque es posible que se produzca un descarte de velos o que el posicionado de velos se demore un tiempo considerable.

Por ello, el sistema ha de tener capacidad para succionar con ambos dispositivos a la vez, pero como contrapartida, no hay posibilidad de regular la capacidad de succión en la fuente de suministro, es decir, el motor del ventilador siempre funciona al mismo régimen de giro.

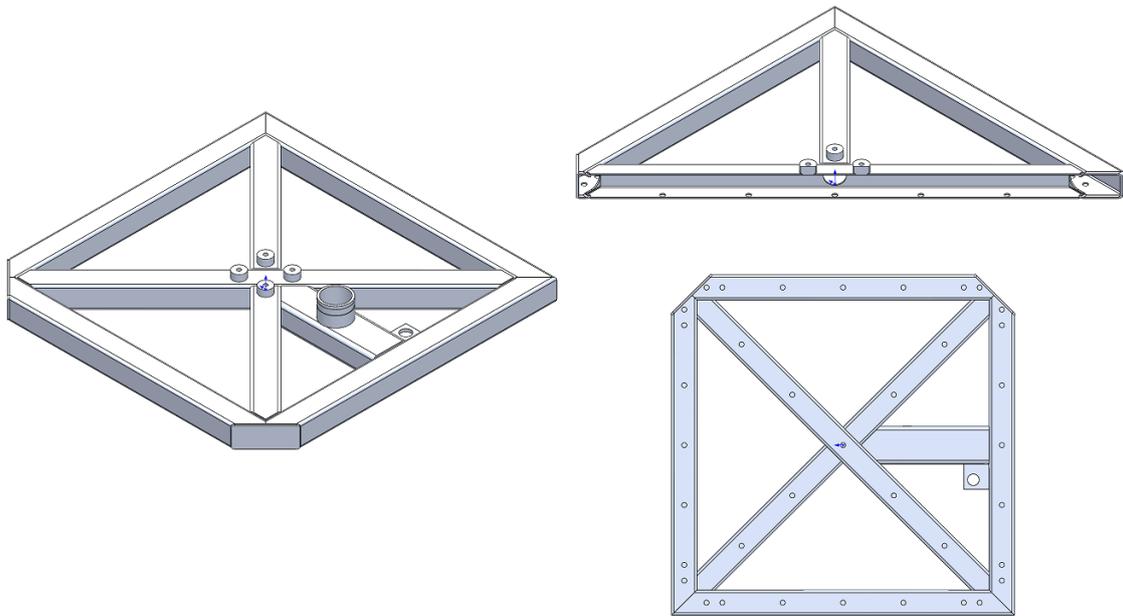
Elo implica que cuando se requiera aspirar solo con el rodillo, la válvula de mariposa que comunica al aire se deberá abrir para rebajar la capacidad de succión del rodillo, asegurando que no aspire varios velos en la operación. Mediante pruebas de succión, se irán acoplado reducciones en esa toma hasta que el rodillo aspire la cantidad de aire suficiente como para coger sólo un velo.

Tras las salidas del distribuidor, unos tubos de PVC de 50 mm de diámetro interior conectarán los sistemas, teniendo 4 metros de longitud el tubo que une el distribuidor con la mesa de succión y 3 metros el tubo que une el distribuidor con el rodillo.

A continuación se muestra un detalle de ambos manipuladores:



**Figura 4.** Rodillo de aspiración.



**Figura 5.** Mesa de succión.

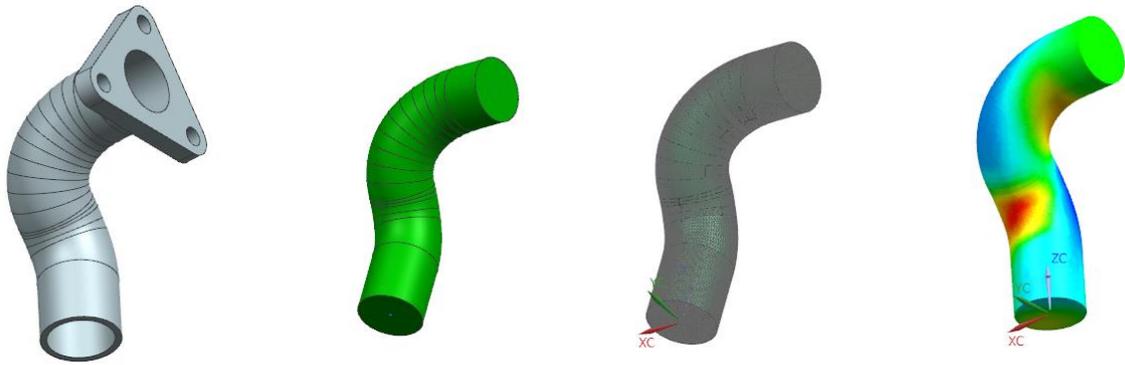
Como se puede ver en la figura 4, la entrada longitudinal de succión tiene una reducción para poderse acoplar al actuador lineal que lo mueve. Un rascador evita que el aire de succión fugue por el exterior del eje hueco.

## 6.2 Materiales y métodos

### 6.2.1 Herramientas de software empleada

El estudio se realizará con el paquete SIEMENS PLM Software Simcenter 3D, mediante el cual se podrán realizar las simulaciones CFD del sistema de aspiración y modelar las piezas diseñadas tras las mencionadas simulaciones.

La razón por la que se ha escogido este software es porque es una herramienta que integra las aplicaciones que se requieren para el estudio. Además, es un software potente, solvente y cuyo módulo de cálculo CFD está reconocido como uno de los mejores del sector.



**Figura 6.** Ejemplo de secuencia de operaciones para cálculo CFD.

Para realizar cálculos CFD esporádicos y de diversa índole es más conveniente y rápido que una programación específica en un software de código abierto, siendo los resultados lo suficientemente precisos como para que su utilización sea la opción más sensata.

Se hará uso también de herramientas del paquete de Microsoft office, en especial del Microsoft Excel para realizar cálculos que se detallarán en los puntos posteriores.

### 6.2.2 Metodología del estudio

El estudio se estructurará tal y como indica el diagrama de la figura 7.

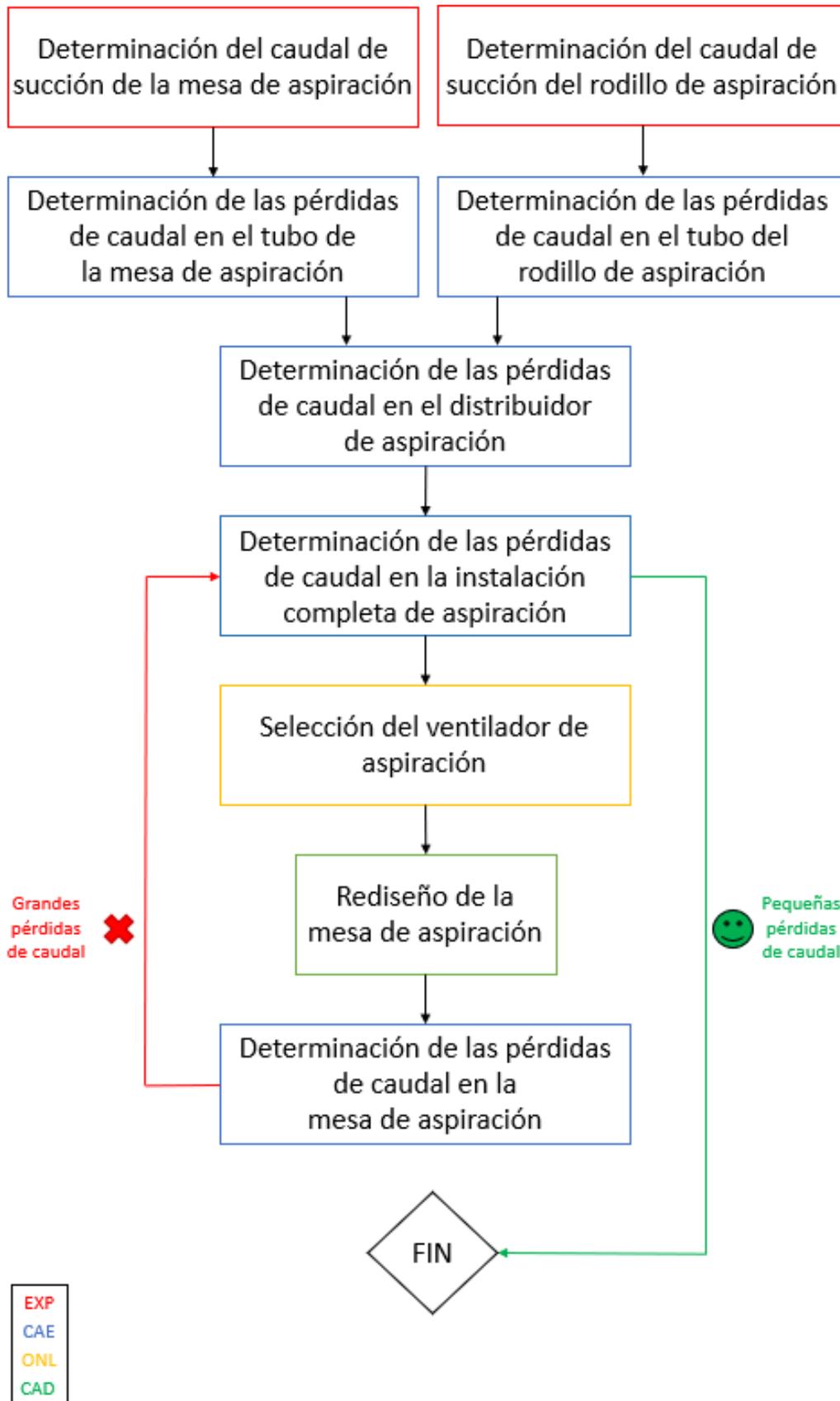


Figura 7. Diagrama de flujo del proceso de diseño y simulación

El proceso definido es el siguiente:

En primer lugar, se determinan unos caudales de aspiración de manera experimental con prototipos. Se obtienen unos valores de caudal a partir de los cuales se pueden determinar las pérdidas de caudal en los tubos que conectan los sistemas al distribuidor y, con ello el caudal necesario en las salidas del distribuidor de succión.

El siguiente paso es determinar las pérdidas de caudal del distribuidor en sí mismo, tomando los valores de caudal obtenidos como resultado en el análisis anterior.

Con el resultado del caudal a la entada del distribuidor se puede dimensionar el ventilador de aspiración (para lo cual se hará uso de una herramienta de selección gratuita de SODECA).

Tras haber seleccionado el ventilador, comenzará una serie de análisis iterativos de la instalación completa, en la que variará la geometría de la mano de succión para aumentar su eficiencia. Con el mismo modelo, una vez que se haya llegado a un diseño lo suficientemente bueno, se obtendrá el régimen de funcionamiento del rodillo y se comparará con el desempeño anterior a la mejora de la mano. Se comprobará cómo afecta la mejora de una parte de la instalación a la otra.

Cabe apuntar que el color de los recuadros del diagrama indica un tipo de trabajo diferente;

- Rojo: Trabajo experimental.
- Azul: Análisis CAE.
- Amarillo: Selección de ventilador con software específico.
- Verde: Modelado CAD.

En cuanto a la manera de proceder, se trabajará modelando los volúmenes de aire como sólidos independientes mediante medición de volúmenes partiendo de la pieza original, facilitando el proceso posterior de simplificado de geometría (realizada en los sólidos CAD) para favorecer el mallado y el cálculo.

Los criterios de mallado y convergencia de cálculo se detallan en el siguiente apartado.

### **6.3 Criterios de mallado y convergencia para la simulación CFD**

Para abordar el proceso de simulación es preciso tener claro qué criterio hemos de seguir para crear y calcular un modelo lo suficientemente fiel a la realidad.

Para ello hay que explicar ciertos parámetros o manera de proceder:

La precisión de una simulación depende fuertemente de la calidad del mallado. Un mallado de buena calidad para un CFD se traduce en una convergencia rápida de resultados y en una mejor solución.

### 6.3.1 Limpieza del modelo

Normalmente los modelos a simular provienen de un software de CAD, usado para procesos de diseño y manufactura, por lo que contienen detalles irrelevantes para la simulación CFD o bien carecen de geometrías omitidas para poder realizar un análisis.

La semejanza del modelo simulado al real es muy importante en los cálculos CFD. Puede haber errores en la construcción de la geometría como caras pequeñas, huecos... por lo que siempre es necesario realizar una limpieza geométrica del modelo para su simulación. La limpieza es un proceso que consume tiempo y requiere de un cierto saber hacer para discernir qué se puede quitar y qué no.

### 6.3.2 Dominio computacional

En flujos internos, determinar las trayectorias del flujo es la tarea más importante, especialmente para los análisis de transferencia de calor. Para realizar un buen modelo hay que asegurarse de que la superficie de contacto del fluido y el sólido no tenga imperfecciones.

### 6.3.3 Tipo de malla

Una malla es la discretización de un dominio geométrico en pequeñas porciones (elementos). Los elementos pueden ser triangulares o cuadrilaterales en 2D y tetraédricos o hexaédricos en 3D. Cuando la geometría es simple, la elección del tipo de malla es sencilla; los bordes de malla suelen tener cierta simetría o patrón ordenado respecto a los lados de la geometría. En geometrías complejas, la elección del mallado no es tan trivial. La elección del tipo de mallado en cualquier caso es una tarea que depende de las características de la geometría a analizar.

Existen dos clasificaciones de mallado se podría decir: Mallas estructuradas y mallas no estructuradas.

Los elementos de las mallas estructuradas se componen de cuadriláteros en 2D y de hexaedros en 3D. Las ventajas de este tipo de mallado son la simpleza y su adecuación para los análisis de elementos finitos en geometría simple, pues estos dos factores contribuyen a la rapidez de resolución del cálculo.

Los elementos de las mallas no estructuradas se componen de cuadriláteros y/o triángulos en 2D y hexaedros, tetraedros y/o pirámides en 3D. Las mallas no estructuradas se adaptan a una geometría compleja más fácilmente y permite una mayor variación del tamaño de los elementos.

Para geometrías complejas, el uso de mallas no estructuradas es más apropiado porque su uso puede resultar en un menor tiempo de cálculo.

Para problemas sencillos como el análisis de un perfil NACA o un ala aerodinámica, la malla estructurada suele ser más precisa que la no estructurada. En cambio, para flujos más complejos, la malla no estructurada puede dar mejores resultados por su capacidad de adaptación.

Las mallas estructuradas por lo general requieren menos tiempo de cálculo.

#### 6.3.4 Mallado de volúmenes

Una vez que la geometría está preparada para el análisis, hay que crear un mallado en la superficie para asegurar una buena malla en el volumen posteriormente. La calidad del mallado del volumen depende en gran medida de la calidad del mallado de la superficie (oblicuidad, relación de aspecto etc.).

Donde se hallen zonas de gran curvatura, así como en los bordes se ha de mallar con una densidad alta con una transición progresiva de tamaño de elementos a medida que se avanza hacia zonas más planas.

Cuando el mallado de la superficie está hecho hay que comprobar si el mallado superficial forma una cáscara cerrada o no, si lo forma, se puede proceder al mallado volumétrico.

#### 6.3.5 Mallado de la capa límite

Para unas simulaciones apropiadas de modelos de flujo turbulento hay que tener en consideración varios aspectos del mallado de la capa límite. Dado que las turbulencias juegan un papel vital en la conservación de momentos en los flujos turbulentos, se debe asegurar una buena resolución de dichos flujos.

Debido a la interacción entre las turbulencias y el flujo principal, la precisión de los resultados de la simulación de flujos en régimen turbulento es más dependiente de la malla realizada que los propios realizados en flujos laminares.

En nuestro caso, el régimen del flujo en todos los casos es turbulento por lo que se hace necesario el uso de funciones de pared para la resolución de problema de manera precisa. Al tratarse de flujo turbulento, la interacción de este con el contorno provoca reacciones en el flujo más allá de la capa límite.

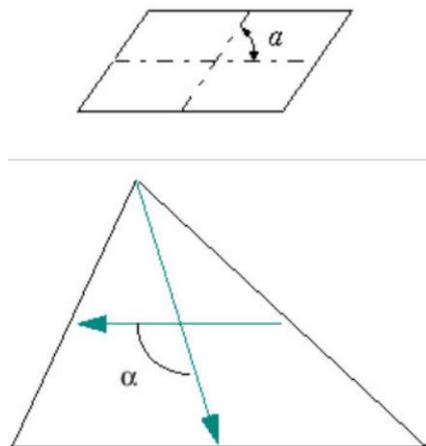
#### 4.3.6 Comprobaciones de la calidad de malla

La malla debe tener cierta calidad de forma, medida con varios indicadores tales como la ortogonalidad, el espaciado de malla relativo (aceptable entre un 15 y un 20% como máximo), la oblicuidad de la malla, la relación de aspecto etc.

##### Oblicuidad:

La oblicuidad de un elemento triangular se calcula obteniendo el mínimo ángulo entre el vector que une un vértice con el punto medio del lado opuesto y el vector que une los puntos medios de los lados restantes. El ángulo menor de las correspondientes 3 operaciones se sustrae a 90 y el resultado se reporta como la oblicuidad del elemento.

En paralelogramos se calcula con el ángulo que forman las dos líneas que unen los puntos medios de las aristas opuestas. El ángulo menor se sustrae a 90 y el resultado se reporta como la oblicuidad del elemento.



**Figura 8.** Oblicuidad de paralelogramo y triángulo

Un máximo de 60-70 elementos oblicuos son aceptables en la mayoría de los casos.

##### Jacobiano:

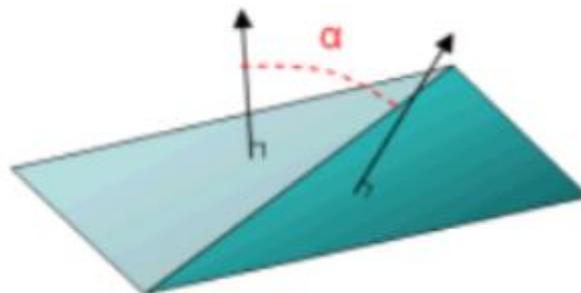
El Jacobiano mide la desviación del elemento de su forma ideal, por ejemplo, la deformación de un triángulo con respecto a ser equilátero. El Valor del Jacobiano varía entre 1 y -1, donde 1 indica un elemento en su forma ideal. A medida que el elemento se distorsiona, el valor del Jacobiano se va aproximando a cero. Un valor del Jacobiano menor que cero representa a un elemento cóncavo, que en la mayoría de casos provocan un error en la resolución de las ecuaciones, por tanto, se ha de mantener su valor siempre por encima de 0.

#### Relación de aspecto:

Es el ratio entre la longitud del mayor lado del elemento y el menor o bien la menor distancia entre el nodo de una esquina a la arista opuesta. Para elementos tridimensionales cada cara del elemento es tratada como una arista para determinar de igual modo la relación de aspecto. El mayor ratio calculado es el resultado final de la comprobación de la relación de aspecto.

#### Alabeo:

El alabeo es la diferencia existente entre la planicidad y la forma real de un elemento, y en el caso de elementos tridimensionales, de sus caras. Dado que tres puntos crean una cara, esta propiedad se puede medir en paralelogramos. El alabeo se determina dividiendo una cara en dos triángulos y midiendo el ángulo entre los vectores normales de esas subdivisiones.



**Figura 9.** Relación de aspecto de un paralelogramo

El mayor ángulo es el resultado de esta comprobación. En elementos tridimensionales, se procede de la misma manera para cada cara del elemento. Son aceptables alabeos de hasta 5 grados.

## **7. Cálculos, diseño y simulaciones**

En este apartado se realizará el diseño de detalle de los componentes y los correspondientes volúmenes de aire, así como una descripción y seguimiento del proceso descrito en el diagrama

de flujo de la figura 7. También se abordará el proceso de simulación plasmado gráficamente en la figura 6, explicando los criterios de mallado y simulación.

### 7.1 Mesa de succión

En este apartado se procede a exponer el trabajo realizado para el desarrollo de la mesa de succión de la instalación.

Para la tarea encomendada se realizó un prototipo modular con forma de campana cuya base inferior se componía de planchas perforadas intercambiables con distintos tamaños de agujeros. Para obtener distintos patrones de agujeros por cada plancha, éstos se tapaban con cinta de carroceros.



**Figura 10.** Planchas perforadas intercambiables.

Con ello se pretendía determinar qué patrón de agujeros es más efectivo a la hora de succionar los velos. Para ello se hizo uso de un amplificador de caudal neumático, una reguladora de presión con manómetro en la línea que lo alimenta. Así, se ha podido determinar qué caudal es necesario para aspirar el velo correctamente en cada configuración.



**Figura 11.** Dispositivo de aspiración; curva característica.

**Tabla 2.** Resultados de pruebas de aspiración de la mesa de succión.

Prueba Nº	Patrón de agujeros	Presión de funcionamiento	Caudal de aspiración
1	Figura 10 (1)	6	1400
2	Figura 10 (2)	6	1400
3	Figura 10 (3)	4.5	1150
4	Figura 10 (4)	5	1220
5	Figura 10 (5)	4.5	1150
6	Figura 10 (6)	4	1030
7	Figura 10 (7)	4	1030

Probando la capacidad de succión con diferentes configuraciones de agujeros, se ha llegado a la conclusión de que la disposición más adecuada es la que deja pasar el aire por todo el contorno exterior, así como por un par de hileras de agujeros en forma de X.

Con esta información se diseñó un marco de aluminio con una conexión de aspiración excéntrica para permitir su acople al manipulador cartesiano que lo mueve.

El manipulador será el que, con ayuda de las cámaras de visión artificial, mueva el velo y lo posicione en un lugar de referencia para su deposición en las chapas. Para que las cámaras

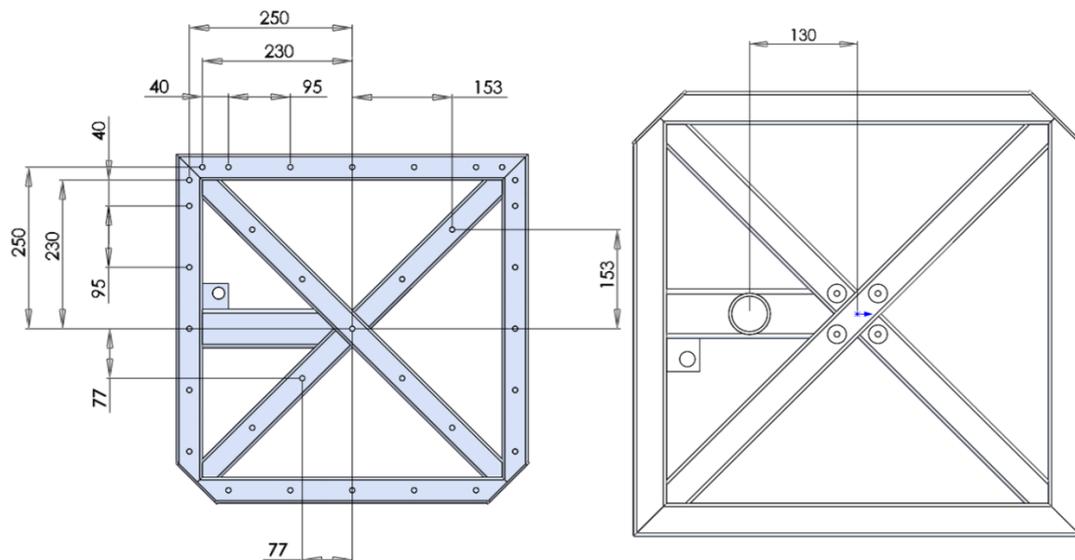
puedan hacer su función, deben ver las esquinas del velo, lo que obliga a recortar las esquinas de la mesa de succión como se ve en la figura 5.

### 7.1.1 Modelado de la mesa de succión.

La mesa de succión fabricada tiene las características recogidas en la siguiente tabla:

**Tabla 3.** Características de la mesa de succión.

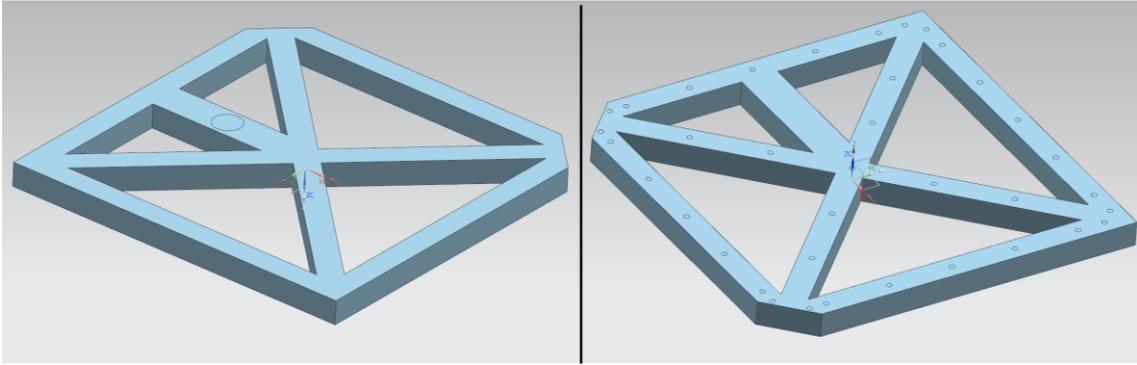
Dimensiones	540 x 540 x 75 mm
Diámetro perforaciones inferiores de succión	8 mm
Número de perforaciones inferiores	21
Diámetro de la boca de aspiración	43 mm
Construcción	Perfil cuadrado de aluminio 40 x 40 mm; espesor 2mm. Perfil cuadrado de aluminio 60 x 40 mm; espesor 3mm.
Masa de la pieza	2.82 kg
Uniones	Cordón continuo de soldadura; uniones entre caras cortadas para crear una sola cámara de succión.



**Figura 12.** Perforaciones en la mesa de succión.

### 7.1.2 Análisis de la mesa de succión.

A continuación se muestra el modelo 3D del volumen de aire de la mesa de succión:



**Figura 13.** Modelo CAE mesa de succión.

Como se ha mencionado anteriormente, el flujo de aire dentro del cuerpo es turbulento ( $Re > 4000$ ). La determinación del valor del mismo se calcula como sigue:

$$Re = \frac{\rho * v_s * D_H}{\mu}$$

**Ecuación 7.** Ecuación del número de Reynolds

Los términos de la ecuación son los siguientes:

- Número de Reynolds: ( $Re$ ).
- Densidad: ( $\rho$ )  $\approx 1.197 \text{ kg/m}^3$
- Velocidad característica del fluido: ( $v_s$ ).

$$v_s = \frac{\text{Caudal}}{\text{Área}} = \frac{1030 \text{ l/min}}{\pi * \frac{50^2}{4}} * \frac{1e6}{1000 * 60} = 1.18E + 5 \frac{\text{mm}}{\text{s}} = 8.743 \text{ m/s}$$

**Ecuación 8.** Velocidad característica del fluido.

- Diámetro hidráulico de la tubería: ( $D_H$ ).

$$D_H = D = 50 \text{ mm} = 0.05 \text{ m}$$

**Ecuación 9.** Diámetro hidráulico.

- Viscosidad dinámica del fluido: ( $\mu$ )  $\approx 1.825E - 5 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$

$$Re = \frac{\rho * v_s * D_H}{\mu} = \frac{1.197 * 8.743 * 0.05}{1.825E - 5} = 2.87E + 4$$

**Ecuación 10.** Resultado del número de Reynolds para el caso de estudio.

Consecuentemente con el resultado obtenido, a la hora de realizar la simulación se debe configurar la simulación haciendo uso de las funciones de pared.

Una vez cargado el modelo, en el comando “New FEM and simulation” se escogerá “Simcenter Thermal/Flow” como solver, “Flow” como tipo de análisis y “Advanced Flow” como tipo de solución.

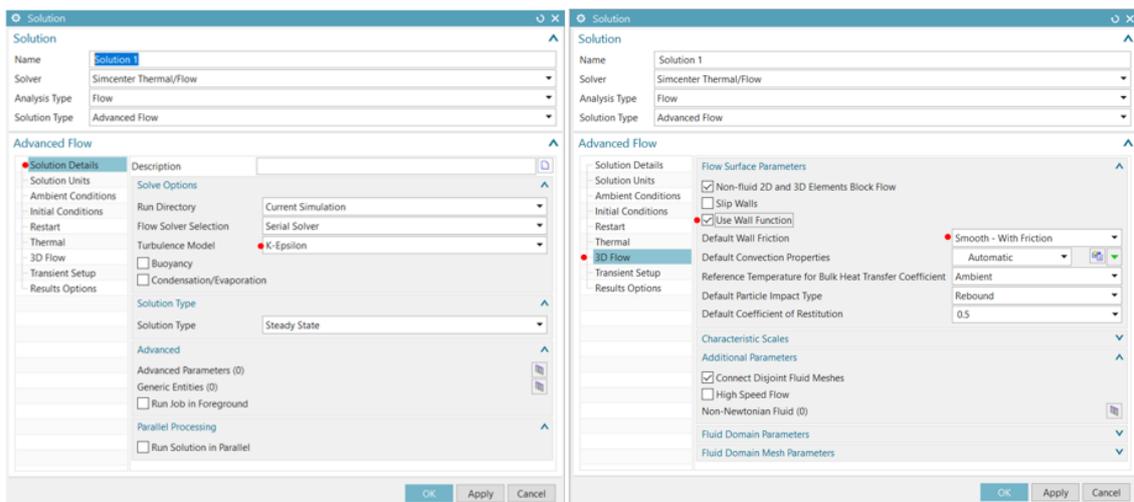
Creado el archivo FEM, hay que configurar el solver para que realice los cálculos mediante los métodos y siguiendo los criterios adecuados.

Atendiendo a lo anteriormente expuesto; se ha de considerar que el flujo es turbulento, y por tanto para su correcto parametrizado matemático es conveniente que se especifique un modelo turbulento. En este caso, el modelo k-ε se presume como el más conveniente por su extendido uso.

A pesar de las bondades del modelo k-ε, es válido en las regiones de flujo turbulento plenamente desarrollado no así en regiones de flujo laminar. Sin embargo, en las regiones cercanas a los límites la velocidad tiende a cero por acción de los efectos viscosos y por tanto, el número de Reynolds disminuye hasta un valor laminar.

Para subsanar el vacío computacional anterior se debe hacer uso de las funciones de pared.

Las funciones de pared son funciones empíricas que relacionan computacionalmente la resolución del modelo k- ε turbulento con lo que sucede en la capa límite.



**Figura 14.** Configuración del solver.

A continuación se realiza el proceso de asignación de material y mallado del modelo.

La asignación de material es sencilla, solo hay que clicar sucesivamente en las partes señaladas de la figura 15.

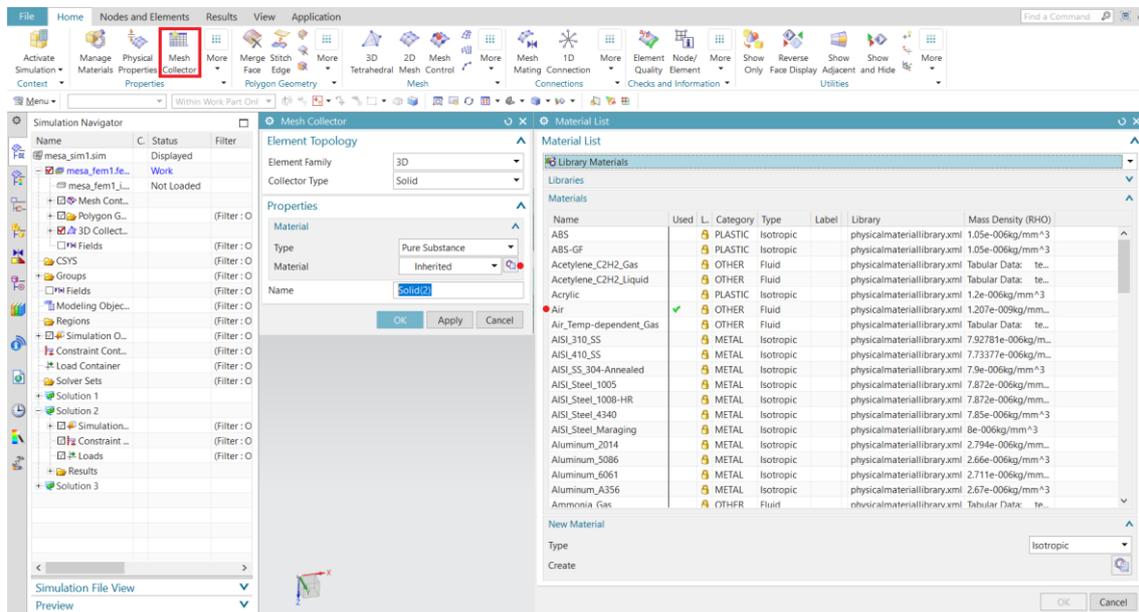


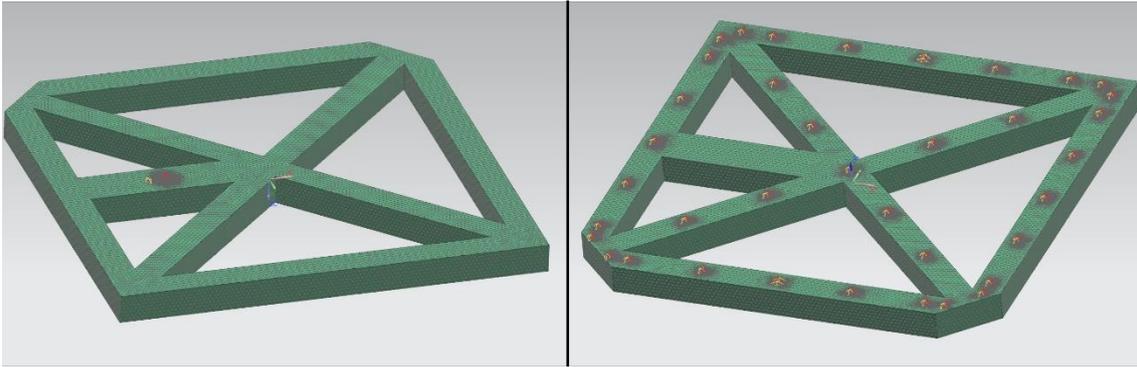
Figura 15. Asignación de material al modelo FEM.

A la hora del mallado, se escoge un tamaño de elemento de 5 mm y se malla automáticamente. Llegados a este punto se revisa la malla en las zonas críticas, con la herramienta de control de calidad de elemento. En ella se pueden seleccionar los valores de las características morfológicas de los elementos a considerar para determinar su calidad.

En principio se comprueban los elementos sin alterar los valores por defecto de los parámetros disponibles. Tras ello, se vuelve a realizar la comprobación una y otra vez bajando los límites admisibles de control en cada iteración, centrandolo el proceso en el análisis del gradiente de crecimiento de elementos de la malla y en el valor del jacobiano de los elementos (deformidad).

Cuando se llega al primer error o advertencia, se extrae el valor y se investiga si es lo suficientemente bajo como para que sea aceptable en términos prácticos para la precisión que la aplicación requiere.

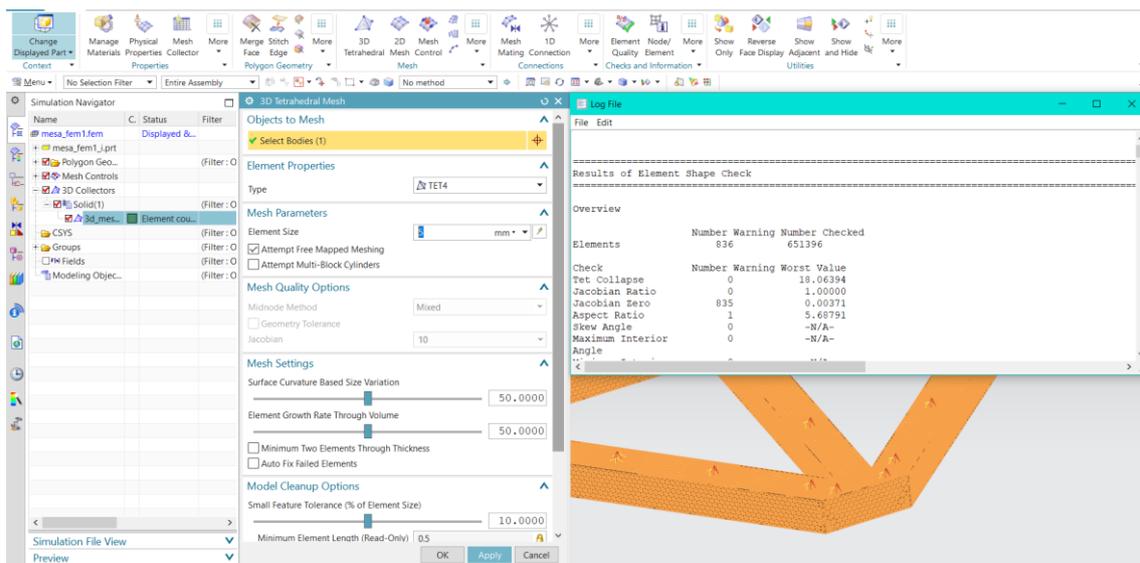
Si la respuesta a lo anterior es negativa, se ha de volver a malla y repetir el proceso de comprobación.



**Figura 16.** Malla de la mesa de succión.

En este modelo, el análisis de la calidad del mallado realizado arrojaba advertencias de los valores del parámetro “Jacobian Zero” y en los de “Aspect Ratio”.

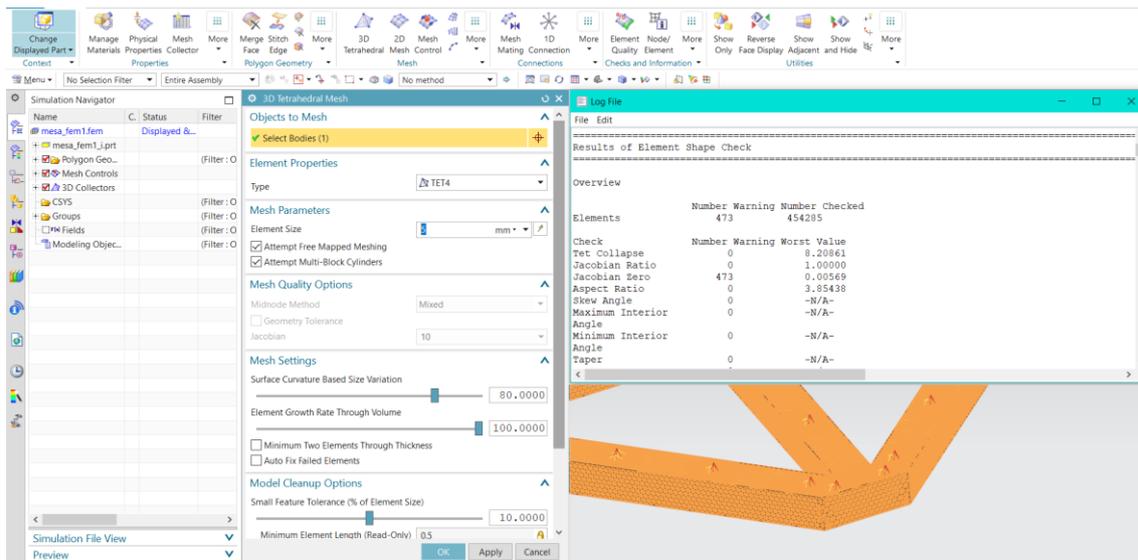
Se refina la malla en la boca de succión y en los taladros inferiores de aspiración, determinado por condiciones de “tamaño en el borde” y “tamaño en la cara”. En este caso se ha optado por que el tamaño de elemento en la boca de succión sea de 1 mm en la cara y de 3 mm en el borde, mientras que para los taladros de aspiración el tamaño de elementos es de 0.3 mm en la cara y 0.3 mm en el borde.



**Figura 17.** Configuración del mallado inicial y advertencia de calidad de malla.

Modificando la configuración del mallado y chequeando la calidad del mismo de manera iterativa, se llega a un mallado de mayor calidad.

El criterio para determinar los valores de advertencias y errores en todos los mallados del presente estudio es el mismo.



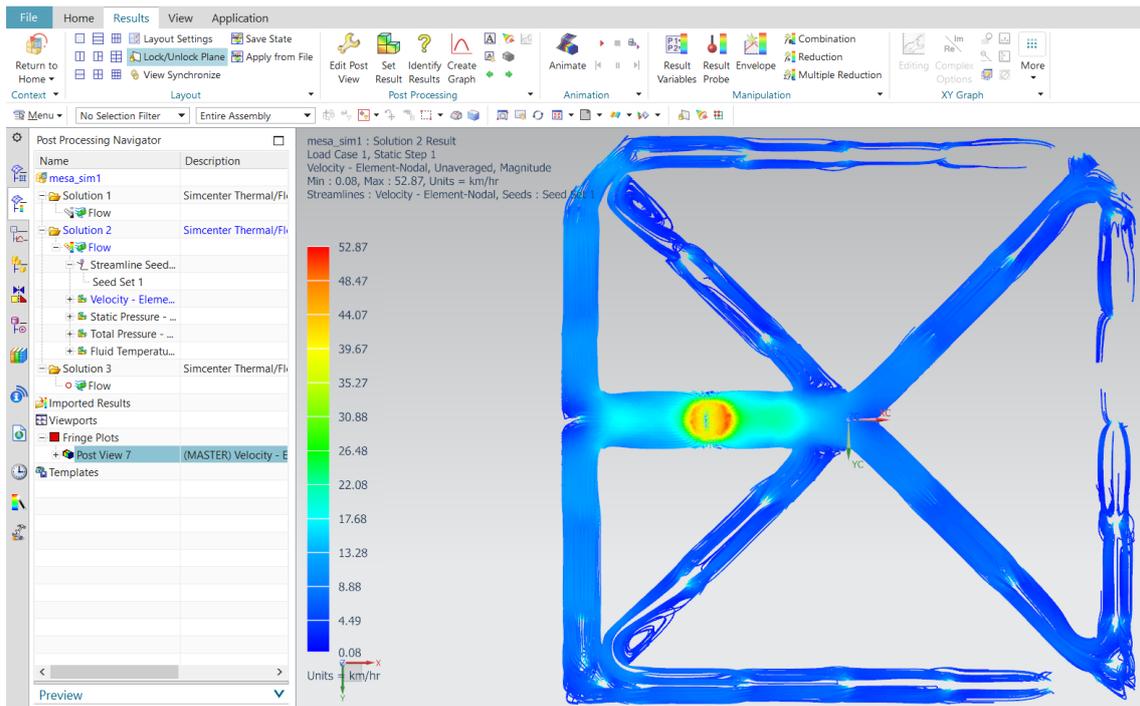
**Figura 18.** Configuración del mallado final y advertencia de calidad de malla

Para eliminar los elementos de alto aspect ratio se ha introducido una condición de “tamaño en el borde” de 2 mm en las aristas inferiores de las caras a 45° de las esquinas. Para eliminar las advertencias de bajo jacobian ratio en la malla se puede editar la progresión de crecimiento de tamaño de los elementos condicionados por el control de malla.

Hay que decir que se pueden copiar y/o mover los nodos de la malla para crear o modificar los elementos y hacerlos más ideales en la posición de los elementos poco isomorfos.

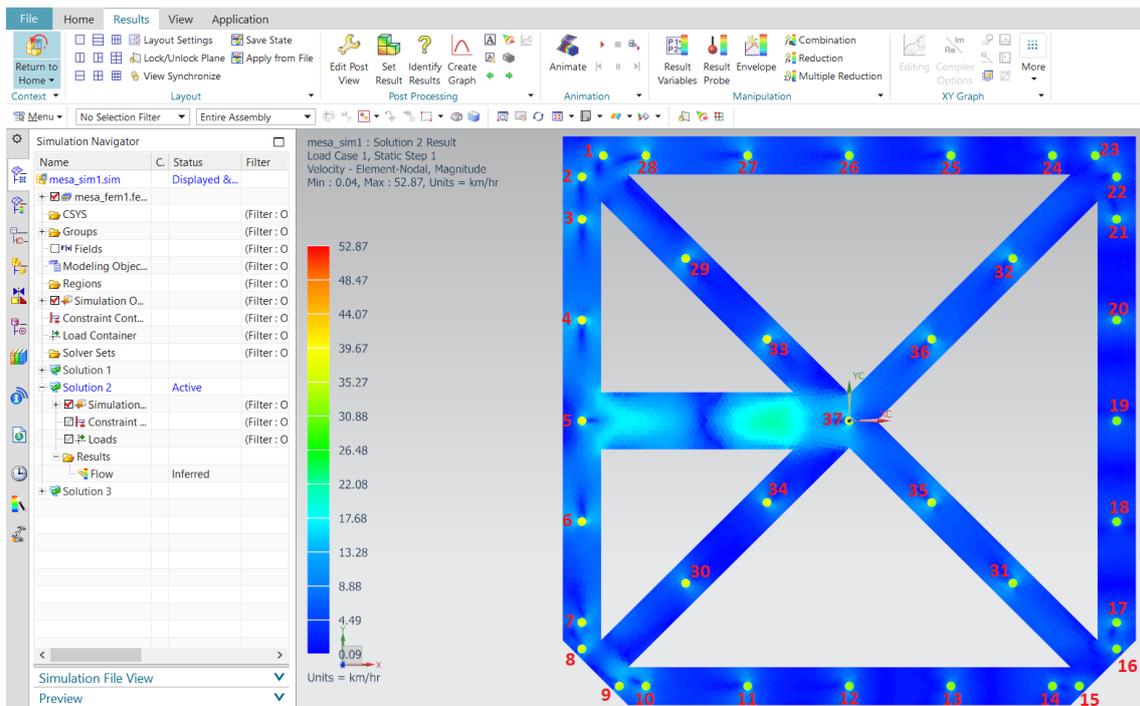
En este caso, el número de elementos a editar manualmente es alto (473) por lo que es un proceso tedioso que no merece la pena si se tiene en cuenta que representa una parte despreciable frente al total de elementos (454285).

En cuanto a las condiciones de contorno, de manera análoga a la realizada con los tubos, se selecciona la cara de la boca de aspiración para definir un “outlet flow” de 1030 l/min y se seleccionan las caras de los taladros como “opening”.



**Figura 19.** Velocidad del flujo; trayectorias.

Como se puede ver en la figura 19, la distribución del flujo de succión dista mucho de ser uniforme en la pieza. Las partes a las que más flujo llega son las diagonales que forman una Y junto con el travesaño donde se haya la toma y el tubo perpendicular a dicho travesaño situado en el centro de la imagen.



**Figura 20.** Velocidad del flujo; taladros de aspiración.

Como era de esperar, los elementos de los agujeros 17 a 22 reflejan un resultado de velocidad de flujo menor que los agujeros 1 a 9. Es curioso como los agujeros 29, 30, 33 y 34 en cambio, reflejan un resultado de velocidad de flujo superior a los agujeros 31, 32, 35 y 36, por los que pasa mayor cantidad de aire por unidad de tiempo.

En la siguiente tabla se recoge el caudal que pasa por cada agujero, promediando los valores de velocidad de flujo de los elementos que hay en ellos y multiplicando por el área de los mismos.

**Tabla 4.** Caudales de aspiración de cada agujero.

Agujero	Caudal (l/min)						
1	28.05	11	26.73	21	26.08	31	27.25
2	28.44	12	26.25	22	25.91	32	27.24
3	29.32	13	25.92	23	26.05	33	29.74
4	30.25	14	25.85	24	25.96	34	29.59
5	29.82	15	25.95	25	26.55	35	27.97
6	30.13	16	26.03	26	26.99	36	27.91
7	29.24	17	26.03	27	27.69	37	29.30
8	28.62	18	25.03	28	28.37		
9	28.30	19	25.19	29	29.23		
10	27.53	20	25.68	30	29.20	Total	1019.38

Como se puede comprobar, hay una diferencia de 5.22 l/min entre la toma de mayor caudal de aspiración (4) y la de menor caudal de aspiración (18). Si se hace el sumatorio de los caudales, se tiene que el sistema pierde 10.5 l/min debido a fenómenos turbulentos del flujo de fluido compresible.

## 7.2 Rodillo de succión.

En este apartado se procede a exponer el trabajo realizado para el desarrollo del rodillo de succión de la instalación.

Para la tarea encomendada se construyó un prototipo cilíndrico hueco con multitud de taladros. Se realizaron pruebas de aspiración con el mismo montaje que el utilizado para la mesa de succión, es decir, un amplificador de caudal neumático, una reguladora de presión con manómetro en la línea que lo alimenta.

En este caso, el caudal de alimentación es más crítico puesto que la función del rodillo es aspirar el velo poroso superior de un buffer, por lo que si el caudal es muy alto es posible que se succionen dos velos en un mismo movimiento y si el caudal es demasiado bajo es posible que no se succione ningún velo.

Tras haber realizado las pruebas con el modelo experimental, se llega a una solución funcional tal que su caudal de aspiración de trabajo es de 1030 l/min.

En este punto hay que puntualizar lo siguiente:

Sin olvidar que el objetivo del presente proyecto es mejorar el rendimiento de la mesa de succión, el rodillo de succión se ha dimensionado de manera tal que el caudal de succión en su toma coincida con la requerida por el diseño actual de la mesa de succión.

Sin embargo, una vez mejorado dicho rendimiento, y suponiendo que se dimensione la instalación correctamente, es seguro que la mesa de succión mejorada consumirá más caudal de aire de la instalación, y por tanto el rodillo consumirá menos si ambos dispositivos funcionan a la vez.

Sin embargo, el propio montaje del rodillo se puede ajustar, pues el velo succiona los velos de una mesa elevadora controlada por un sensor láser que mide la altura. Existe por tanto la posibilidad de regular el tarado del sensor para que la mesa suba más o menos en función de la necesidad.

Si se tiene un distribuidor de flujo simétrico como el de la figura 3 (1) no afectarán de igual manera las pérdidas de caudal del propio distribuidor en el reparto de caudal de succión por ambas tomas.

Se aprovechará la necesidad de una toma de aspiración al aire que requiere la instalación para colocar en ella un accesorio que provoque una pérdida de caudal en la línea que haga que el caudal que tenga la toma del rodillo sea el adecuado.

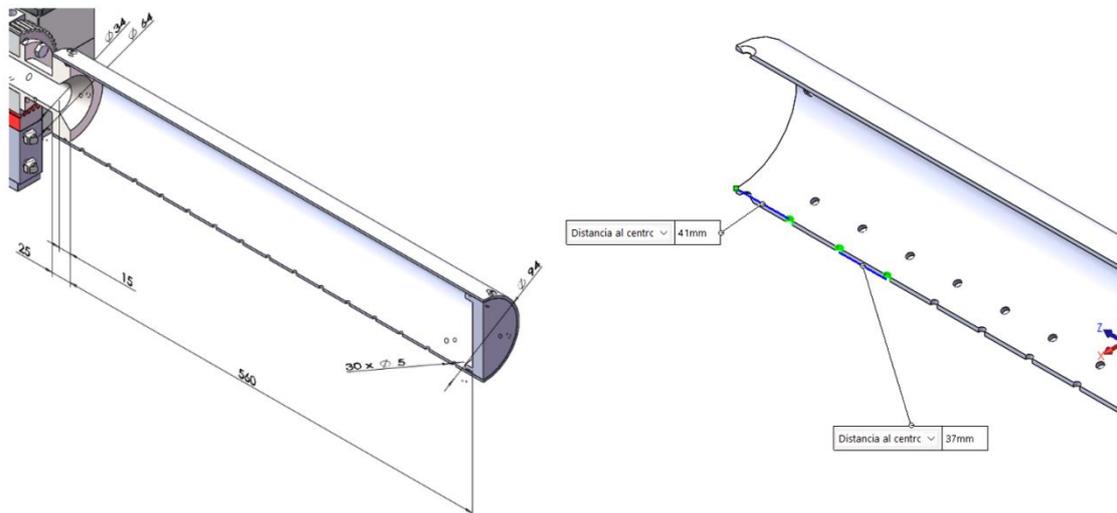
### 7.2.1 Modelado del rodillo de succión.

El diseño final del rodillo de succión se expone a continuación.

**Tabla 5.** Características del rodillo de succión.

Dimensiones	L=600 $\phi$ =100 e=3 mm
-------------	--------------------------

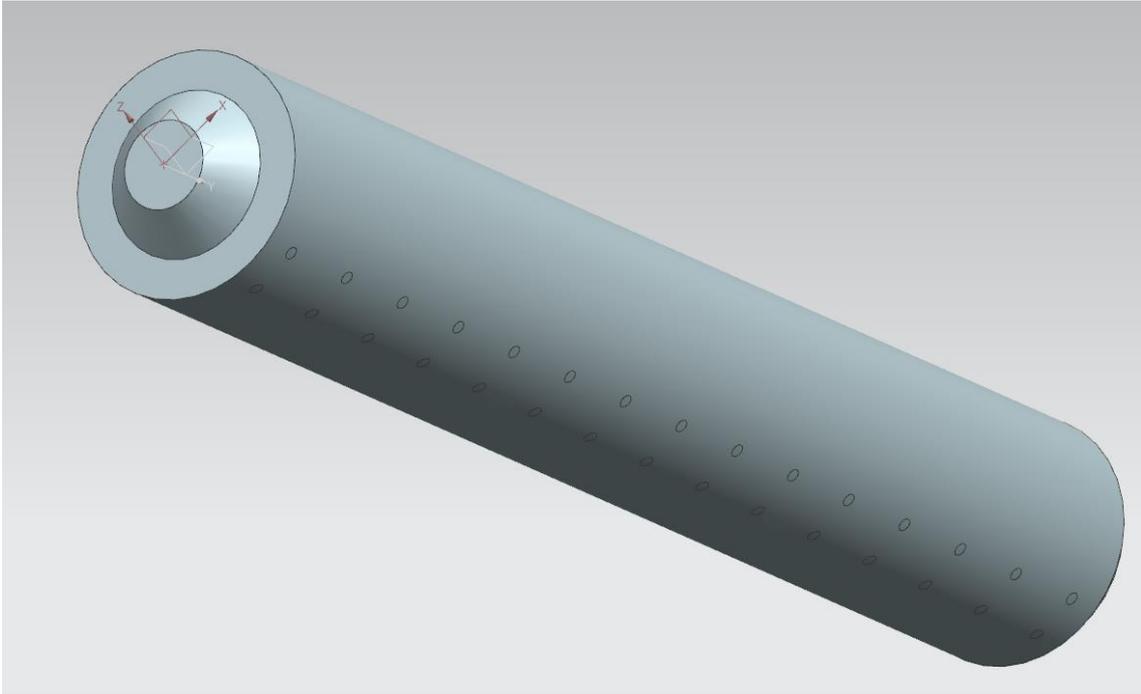
Diámetro perforaciones inferiores de succión	5 mm
Número de perforaciones inferiores	30
Diámetro de la boca de aspiración	34 mm
Construcción	Tubo de aluminio $\varnothing=100$ ; espesor 3 mm. Eje hueco de acero L=195 $\varnothing_{int}=34$ ; tobera L=15 $\varnothing_1=34$ $\varnothing_2=64$ .
Masa de la pieza	2.82 kg
Uniones	Unión atornillada con junta para asegurar la estanqueidad.



**Figura 21.** Perforaciones en el rodillo de succión.

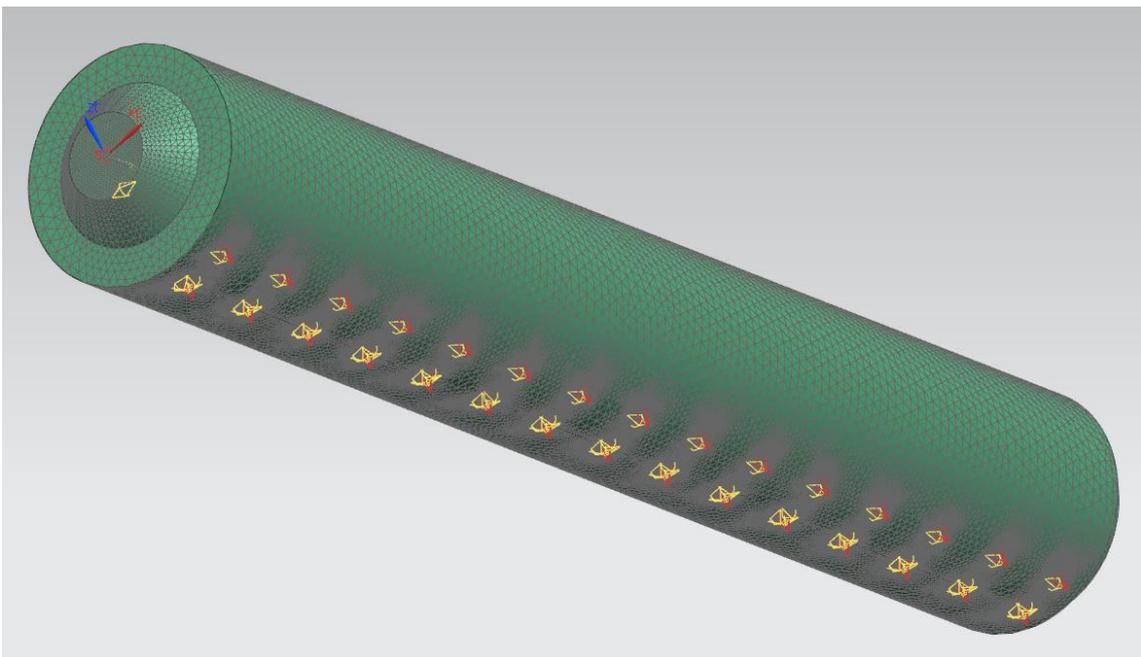
### 7.2.2 Análisis del rodillo de succión.

A continuación se muestra el modelo 3D del volumen de aire del rodillo de succión:



**Figura 22.** Modelo CAE rodillo de succión.

A la hora de hacer el análisis se configura el solver de manera similar a la realizada para el análisis de la mesa de succión y se carga aire como fluido. En el caso del mallado, se escoge un tamaño de elemento de 5 mm, refinando la malla en la boca de succión y en los taladros inferiores de aspiración, determinado por condiciones de “tamaño en el borde” y “tamaño en la cara”. En este caso se ha optado por que el tamaño de elemento en la boca de succión sea de 1.5 mm en la cara y en el borde, mientras que para los taladros de aspiración el tamaño de elementos es de 0.3 mm en la cara y en el borde.

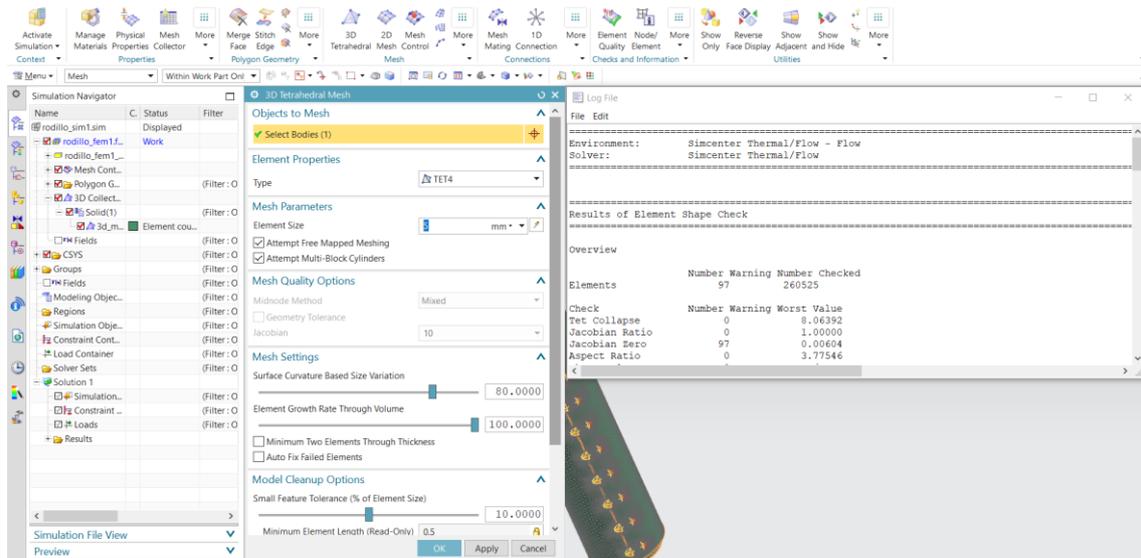


**Figura 23.** Malla del rodillo de succión.

En este modelo, el análisis de la calidad del mallado realizado arrojaba advertencias similares a las mostradas en el primer mallado de la mesa de succión en los parámetros “Jacobian Zero” y “Aspect Ratio”.

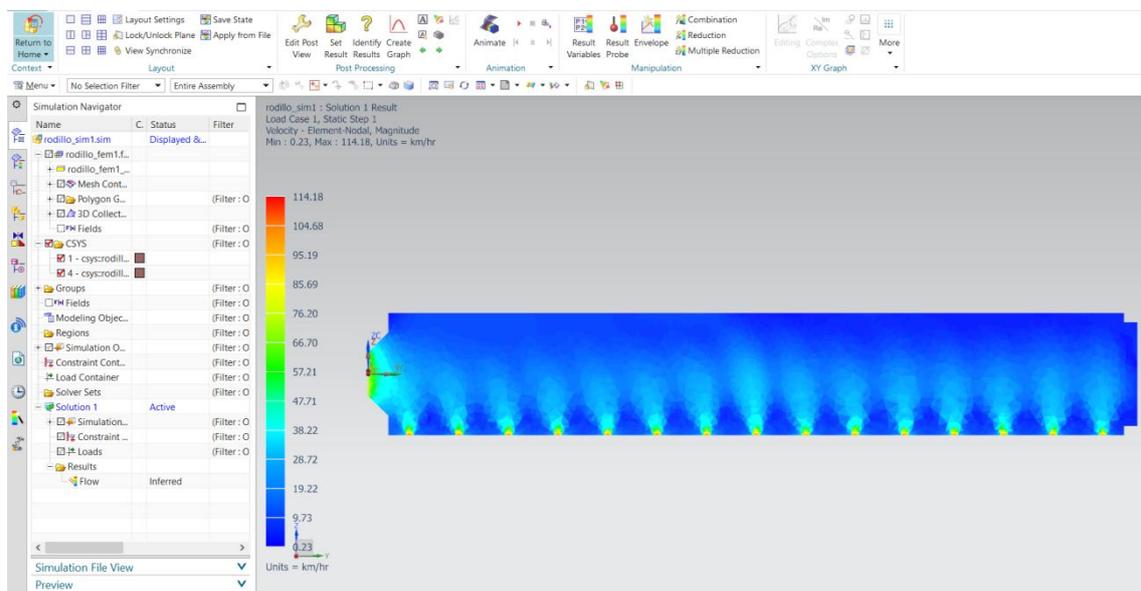
Tras haber modificado de igual modo la configuración de mallado, las advertencias se minoran hasta el punto de dejar de ser relevantes sin necesidad de cambiar las condiciones de los controles de tamaño de malla.

En este caso, el número de elementos mostrado como advertencia es muy bajo (97) en comparación al número total de elementos (260525).



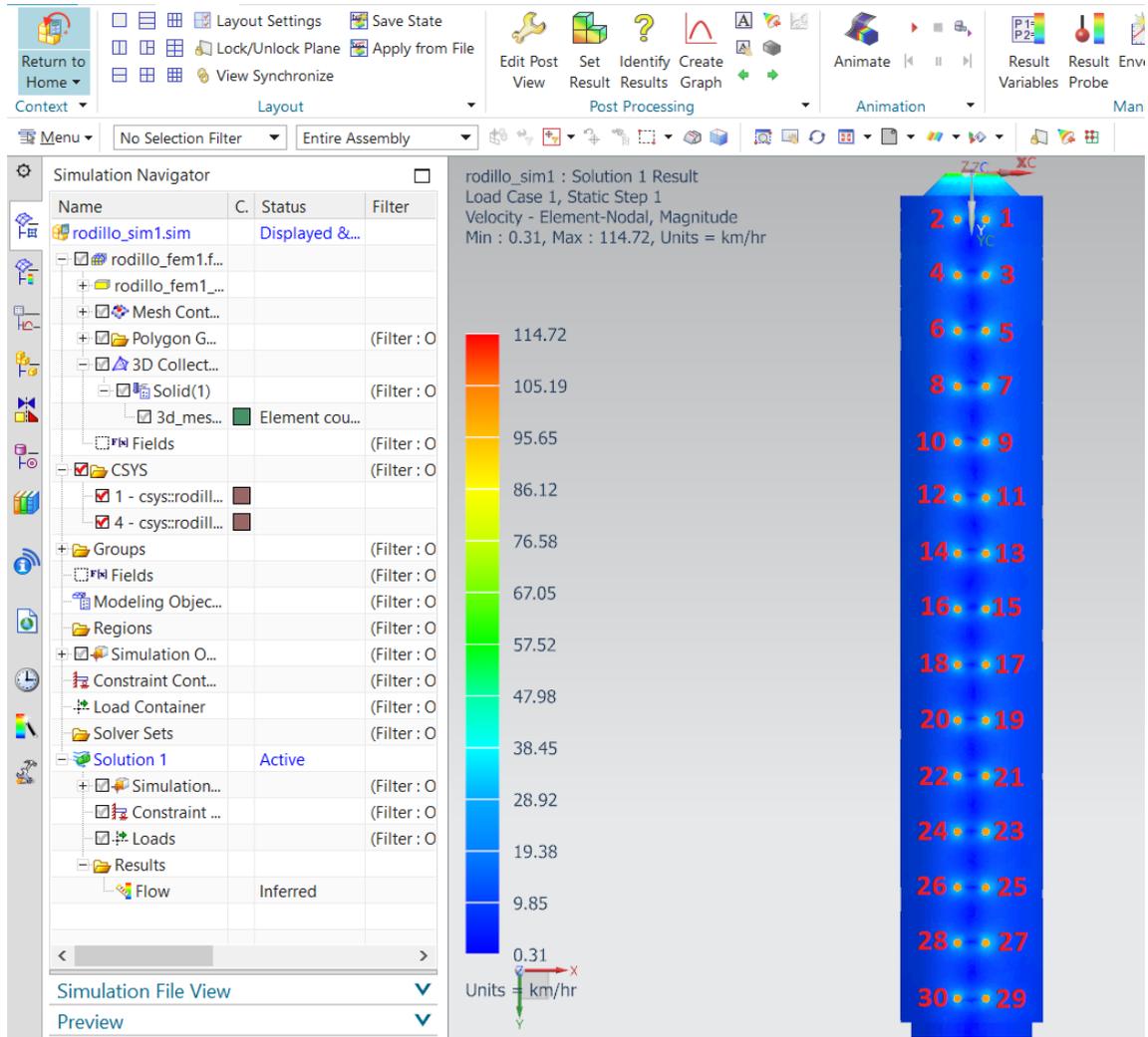
**Figura 24.** Configuración del mallado final y advertencia de calidad de malla.

En cuanto a las condiciones de contorno, de manera análoga a la realizada con la mesa de succión, se selecciona la cara de la boca de aspiración para definir un “outlet flow” de 1030 l/min y se seleccionan las caras de los taladros como “opening”.



**Figura 25.** Velocidad del flujo; taladros de aspiración.

Como se puede ver en la figura 25, la distribución del flujo de es bastante uniforme en la pieza, al contrario de lo que sucedía en la mesa de succión.



**Figura 26.** Velocidad del flujo; taladros de aspiración.

En la siguiente tabla se recoge el caudal que pasa por cada agujero, promediando los calores de velocidad de flujo de los elementos que hay en ellos y multiplicando por el área de los mismos.

**Tabla 6.** Caudales de aspiración de cada agujero.

Agujero	Caudal (l/min)	Agujero	Caudal (l/min)	Agujero	Caudal (l/min)
1	34.00	11	34.10	21	33.71
2	34.26	12	33.97	22	33.68
3	34.13	13	33.80	23	33.72
4	34.03	14	33.74	24	33.74

5	34.04	15	33.69	25	33.82
6	34.53	16	33.89	26	33.92
7	34.14	17	33.63	27	33.93
8	34.02	18	33.99	28	33.69
9	34.07	19	33.84	29	33.61
10	33.89	20	33.90	30	33.71
				Total	1017.20

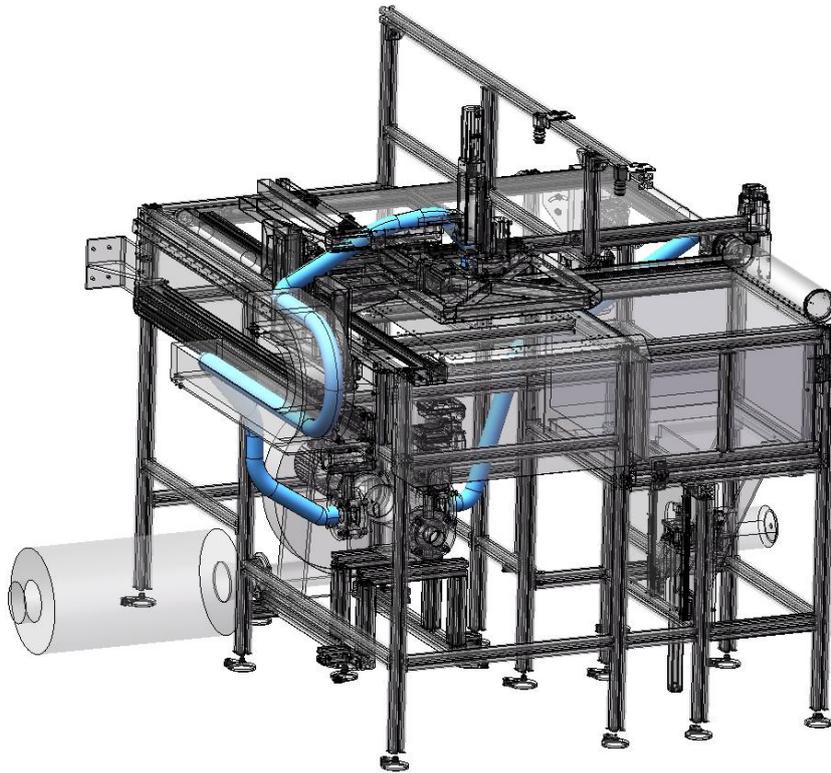
Como se puede comprobar, hay una diferencia de 0.92 l/min entre la toma de mayor caudal de aspiración (4) y la de menor caudal de aspiración (18). Si se hace el sumatorio de los caudales, se tiene que el sistema pierde 12.89 l/min debido a fenómenos turbulentos del flujo de fluido compresible.

### 7.3 Tubos de unión.

#### 7.3.1 Modelado de los tubos de la mesa de succión.

Realizando un croquis 3D en el ensamblaje principal mostrado en la figura 2 se puede determinar la longitud y la forma de los tubos del sistema de aspiración.

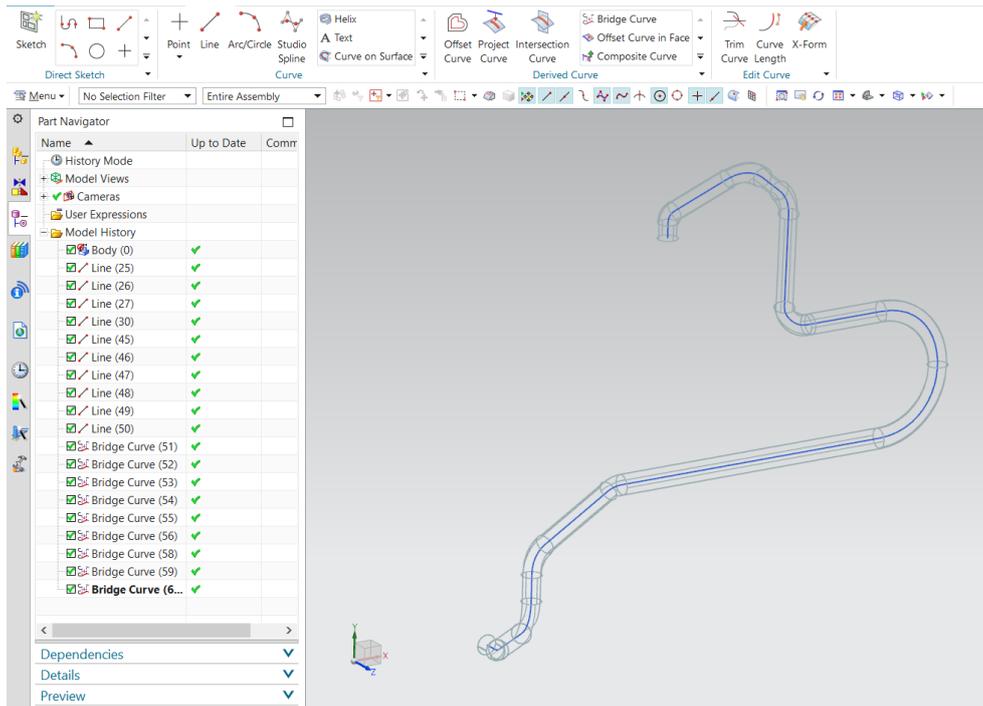
Los tubos modelados tienen una longitud de 3142 milímetros y 1249 milímetros para la instalación de la mesa de succión y el rodillo de succión respectivamente.



**Figura 27.** Modelado de los tubos de succión

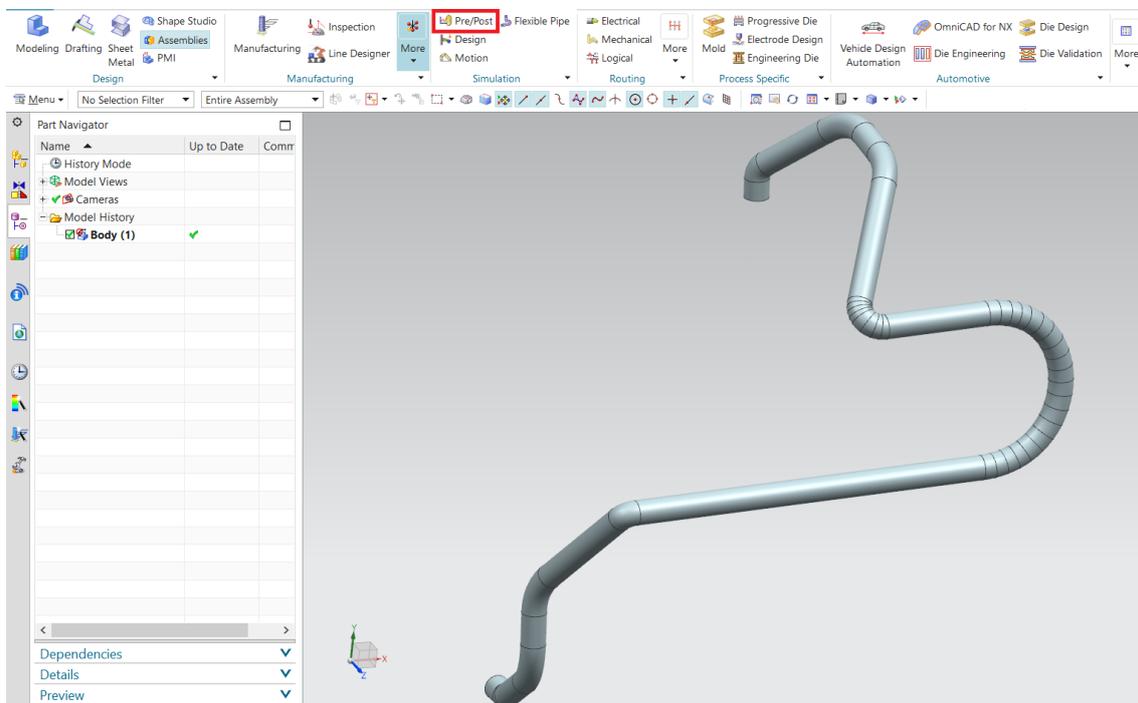
Los tubos se exportan a formato STEP y se abren con el software NX Unigraphics.

Al abrir el programa se carga la ventana "Home". Para poder hacer la simulación se necesita el volumen de aire como sólido macizo (en este caso el interior del tubo). Con las herramientas de "Curve" se pueden obtener fácilmente las fibras neutras de los tubos como croquis, y extruir a través de ellas el diámetro interior macizo para obtener el volumen de aire de los tubos.



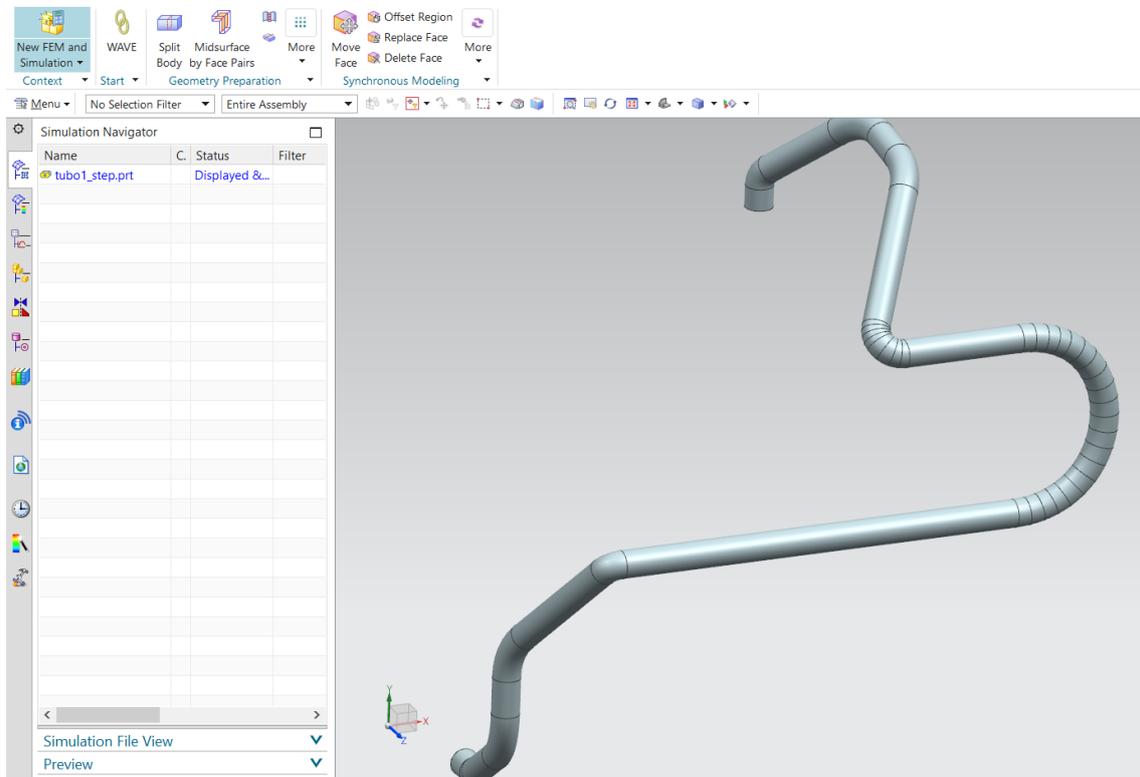
**Figura 28.** Croquis 3D de la fibra neutra del tubo.

Una vez obtenido el volumen de aire se activa la aplicación de Pre/Post para comenzar la edición previa del modelo.



**Figura 29.** Tubo de la mesa de succión en NX Unigraphics.

Tras abrir la aplicación se puede apreciar un menú de inicio con las operaciones más importantes para la simplificación de la geometría y la obtención de un modelo adecuado para su análisis CAE.



**Figura 30.** Nuevo estudio FEM.

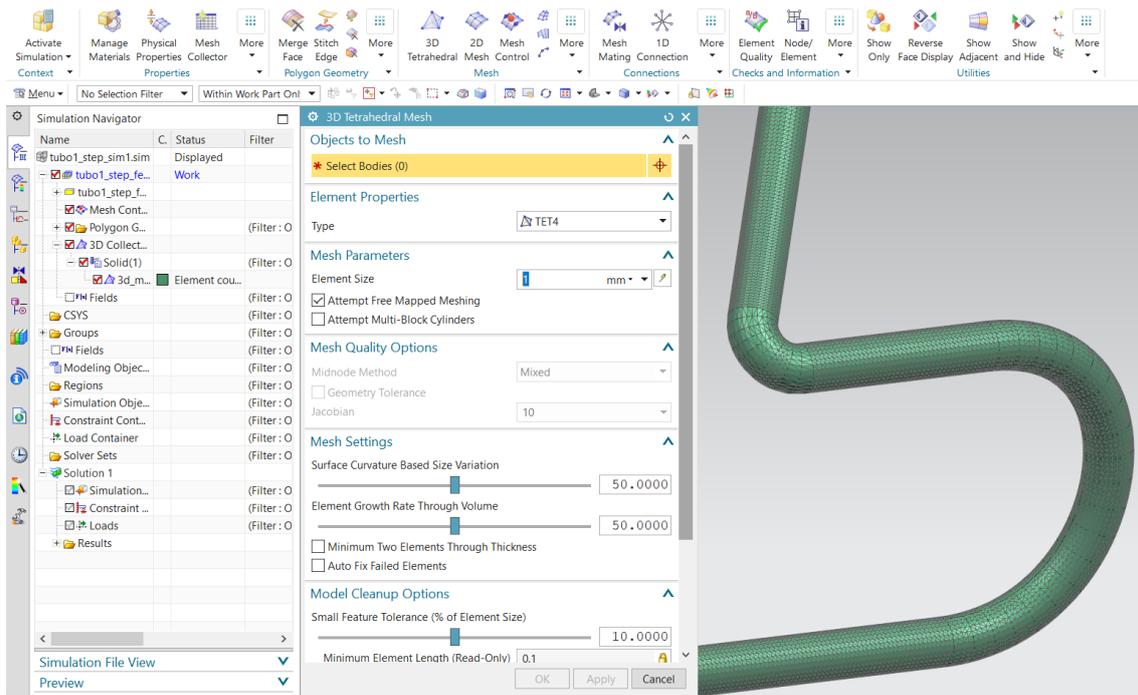
### 7.3.2 Simulación de los tubos de la mesa de succión.

A la hora de hacer el análisis se configura el solver de manera similar a la realizada para el análisis de la mesa de succión y del rodillo y se carga aire como fluido.

Para el mallado del modelo se selecciona el tipo de malla 3D tetraédrica y se clicca en el cuerpo a mallar, seleccionando un tamaño de elemento razonablemente pequeño, en este caso 5 mm.

Los demás parámetros del menú de opciones determinan el ratio de crecimiento de tamaño de elementos de malla, pues crea de manera automática una malla adaptativa.

Para realizar un buen mallado, no se ajustará ningún parámetro de crecimiento porque después se analizará la malla creada y se editará manualmente.



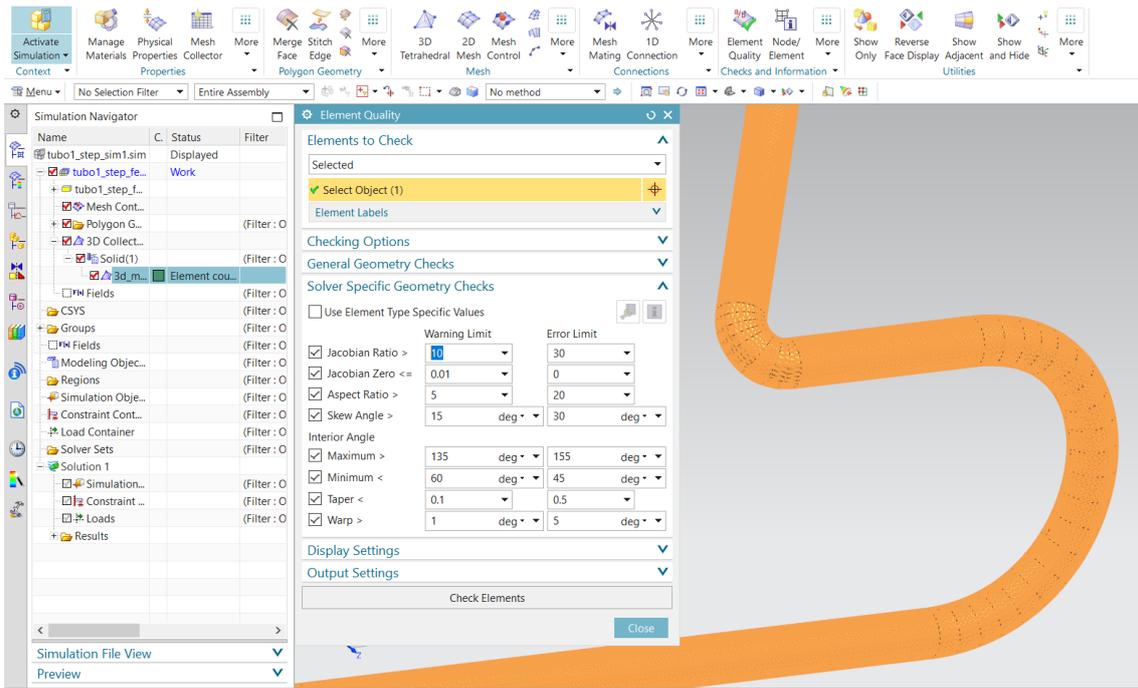
**Figura 31.** Mallado automático del modelo.

Llegados a este punto se revisa la malla en las zonas críticas, con la herramienta de control de calidad de elemento. En ella se pueden seleccionar los valores de las características morfológicas de los elementos a considerar para determinar su calidad.

En principio se comprueban los elementos sin alterar los valores por defecto de los parámetros disponibles. Tras ello, se vuelve a realizar la comprobación una y otra vez bajando los límites admisibles de control en cada iteración, centrando el proceso en el análisis del gradiente de crecimiento de elementos de la malla y en el valor del jacobiano de los elementos (deformidad).

Cuando se llega al primer error o advertencia, se extrae el valor y se investiga si es lo suficientemente bajo como para que sea aceptable en términos prácticos para la precisión que la aplicación requiere.

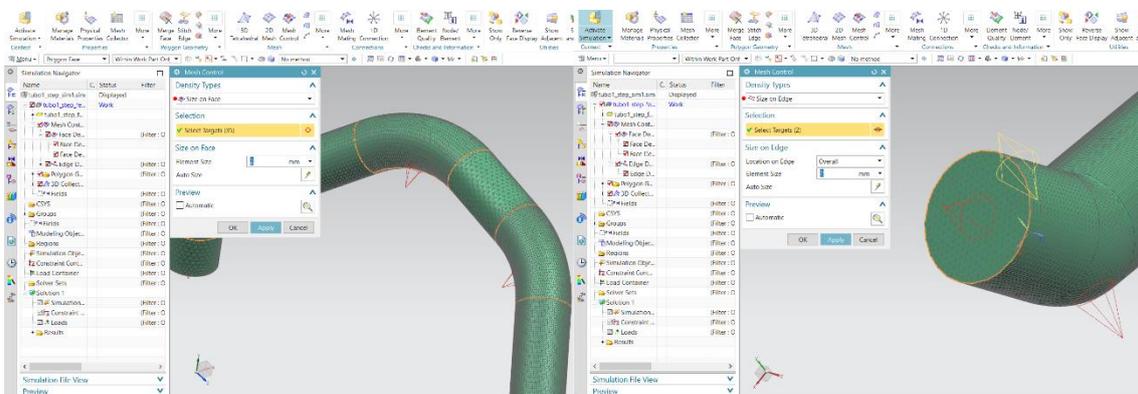
Si la respuesta a lo anterior es negativa, se ha de volver a mallar y repetir el proceso de comprobación.



**Figura 32.** Comprobación de la calidad de elementos de la malla.

Una vez tiene la malla base una calidad lo suficientemente aceptable, se realiza un control pormenorizado de tamaño de elemento en los codos de los tubos de succión y en las tomas de entrada y salida. Con el comando “control de malla” se selecciona el tipo de modificación que se desea realizar en la malla y sus características. Para este caso se realizará una modificación del tamaño de los elementos que mallan las caras de los codos superior y las caras de las tomas de aspiración.

Para ello se selecciona la opción para ambos grupos de caras “tamaño en cara” así como la opción de “tamaño en el borde” para las tomas de succión de los tubos. El tamaño seleccionado de refinamiento de malla en los codos es de 2 mm en las caras, mientras que el tamaño de elemento en las tomas de succión es de 3 mm en las caras y 2 mm en los bordes.



**Figura 33.** Control del tamaño de malla.

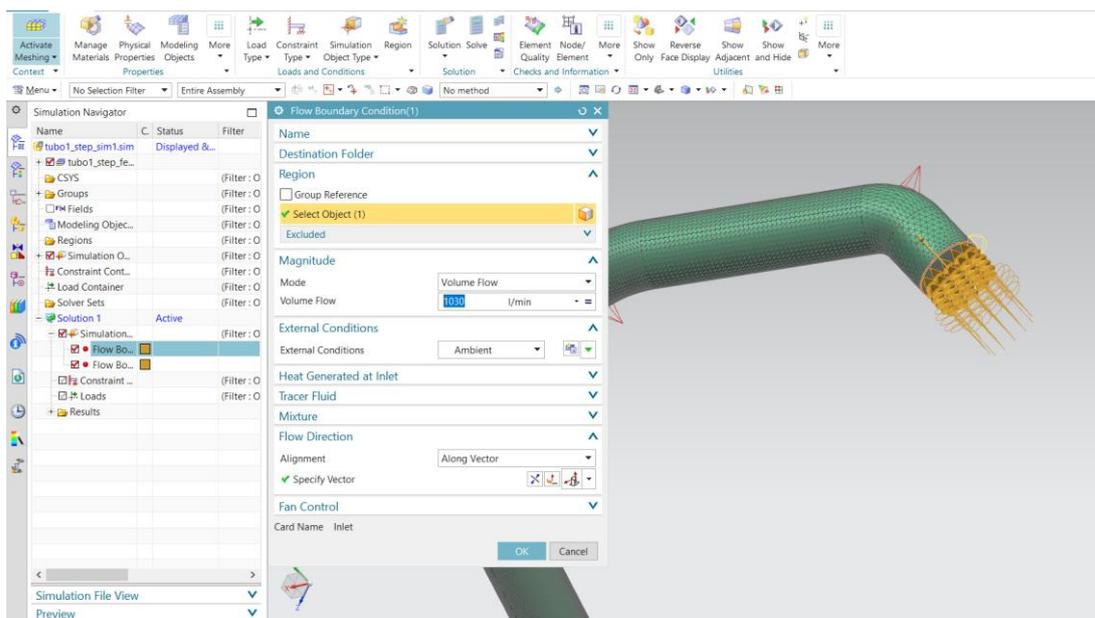
Tras esto, se vuelve a revisar la calidad de la malla de manera análoga a la realizada anteriormente para asegurar que la malla es apta para el cálculo.

Una vez se tiene la malla preparada, se cambia de estado de trabajo y se pasa al menú de simulación, en el cual se determinarán las condiciones de estudio y se procederá a la resolución del modelo.

Este estudio de dinámica de fluidos tiene una boca de succión y otra de expulsión.

Se selecciona el comando “simulation object type” y la opción “outlet Flow” dentro del mismo para, a continuación, seleccionar la cara de expulsión e introducir un valor de caudal determinado.

Como este estudio tiene el propósito de determinar cuán bueno es el diseño, se introducirá un caudal de 1030 l/min que es el valor que debe tener en la boca de conexión de ambos dispositivos.

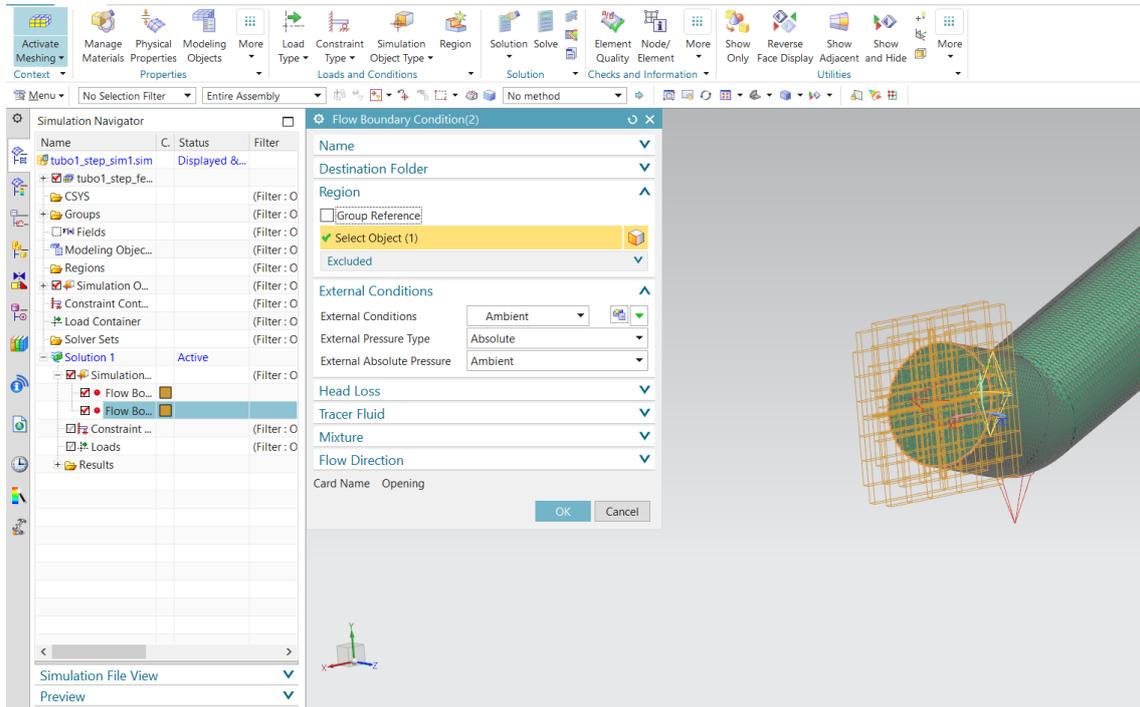


**Figura 34.** Flujo de aspiración en el tubo de la mesa.

Seguidamente se realiza el mismo proceso, pero esta vez seleccionando la opción “opening” y la toma de succión.

Al establecer las condiciones de resolución y la configuración del solver, se pueden editar las condiciones ambientales. La presión ambiental predeterminada es de 101351 Pa y la temperatura de fluido predeterminada es de 20°C. Ambos valores son bastante estándar y no se han de editar.

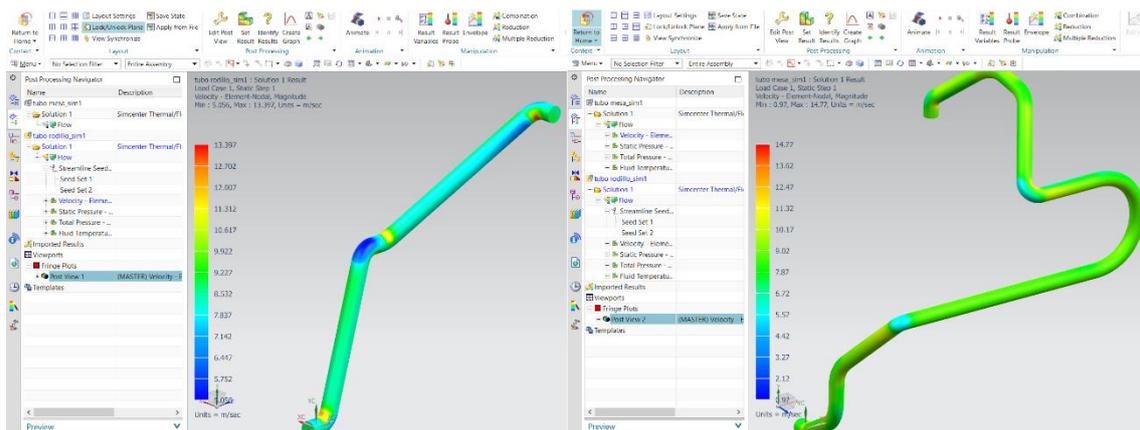
En la opción “opening” se puede definir la condición ambiental externa, si no se introduce ningún parámetro, el solver tomará los valores de ambiente predeterminados.



**Figura 35.** Abertura al distribuidor de succión.

Por último se clic en el comando “solve” para que calcule el resultado del estudio.

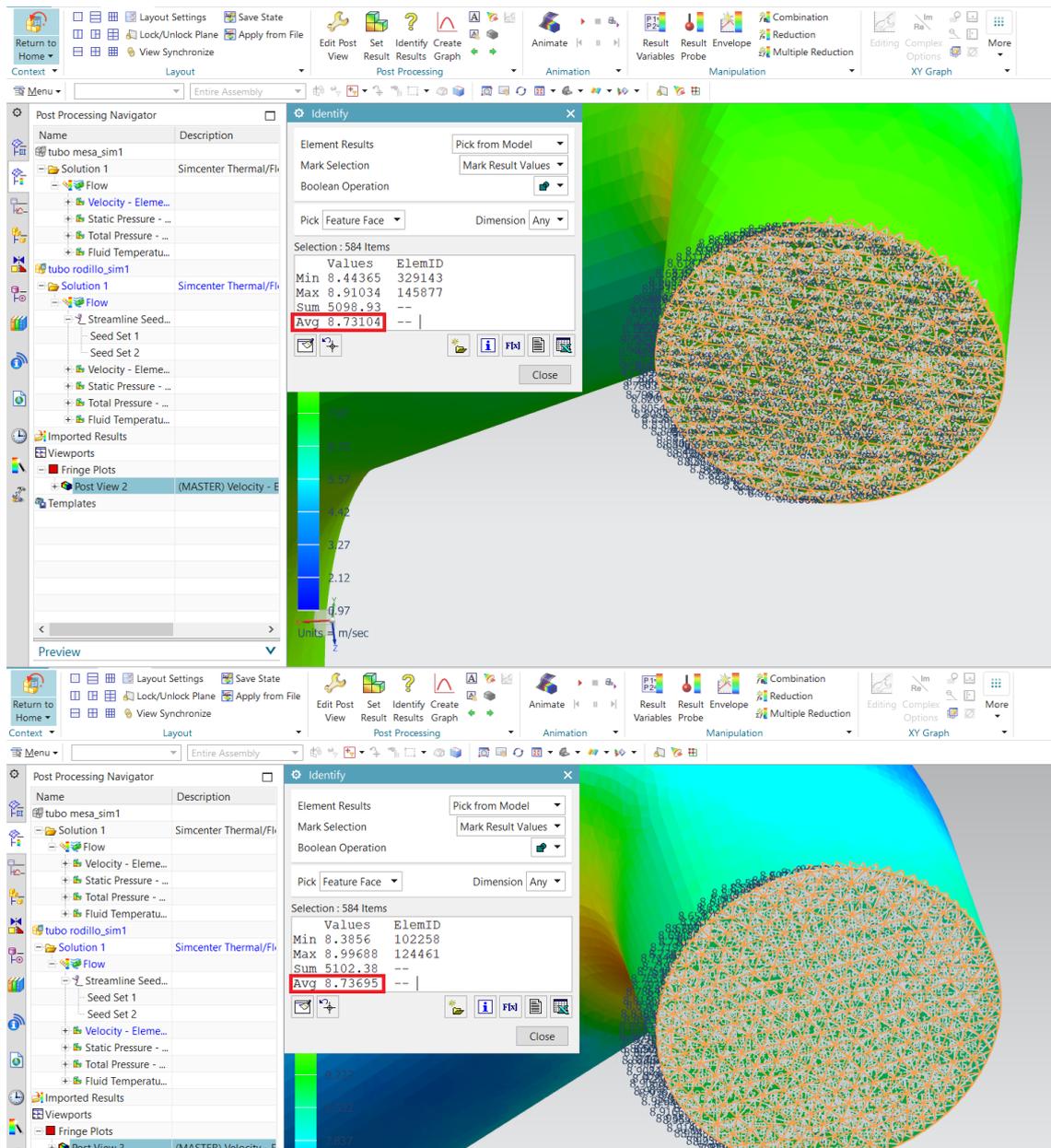
El resultado del estudio se muestra en las siguientes imágenes:



**Figura 36.** Velocidad del flujo; gradiente (element).

Como se puede ver en la figura 25, el perfil de velocidad del flujo de succión dista mucho de ser uniforme en el tubo. A pesar de que hay variaciones de velocidad, ésta se encuentra equilibrada,

pues en los codos el flujo se acelera por la parte interior y se frena por la parte exterior de manera proporcional, por lo que no existe una sección en concreto que tenga grandes pérdidas.



**Figura 37.** Velocidad del flujo; boca de aspiración.

Como era de esperar, si se analizan las velocidades de flujo medias en las bocas de succión, los resultados determinan que las pérdidas de caudal en los tubos son despreciables. Pues si se calcula el caudal que pasa por esa sección, es prácticamente igual a los 1030 l/min.

**Tabla 7.** Cálculo del caudal de aspiración en los tubos.

	MESA	RODILLO
Outlet flow (l/min)	1030	1030

Diámetro (mm)	50	50
Velocidad media (m/s)	8.73104	8.73695
Succión (l/min)	1028.60142	1029.29767

Por ello, a la hora de realizar el posterior análisis del sistema completo, se omitirán la geometría de los tubos para simplificar el modelo.

#### 7.4 Conjunto completo.

En este apartado se simulará el conjunto de distribuidor de succión más los diferentes sistemas acoplados al mismo, con el objetivo de determinar el caudal necesario que debe suministrar el ventilador de aspiración.

Para ello se debe hacer primero un análisis de las pérdidas de caudal en cada dispositivo, analizando su comportamiento y trasladando el resultado a la posterior simulación de todo el conjunto, porque, aunque el distribuidor de succión sea simétrico y se haya definido que los caudales óptimos de funcionamiento para ambos dispositivos sean de 1030 l/min, no se puede determinar el caudal total de suministro sin tener en cuenta que cada sistema consume un caudal diferente debido a su pérdida de caudal propia.

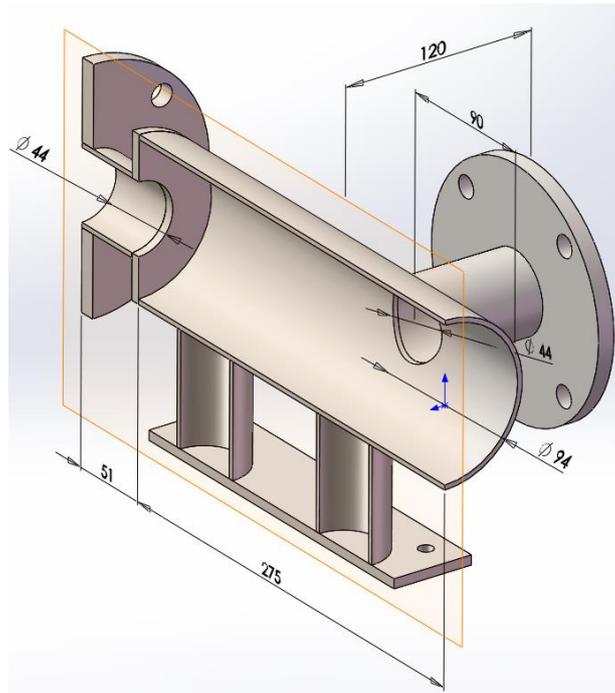
La manera de proceder será la misma que en el apartado anterior; se modelará el volumen de aire del distribuidor a partir de la pieza 3D y se ejecutará un análisis con el mismo grado de refinamiento, asegurando la precisión en los resultados.

##### 7.4.1 Modelado del distribuidor de succión.

Los resultados obtenidos en los análisis de los dos dispositivos de succión se utilizarán para definir las condiciones de contorno del análisis del distribuidor de succión.

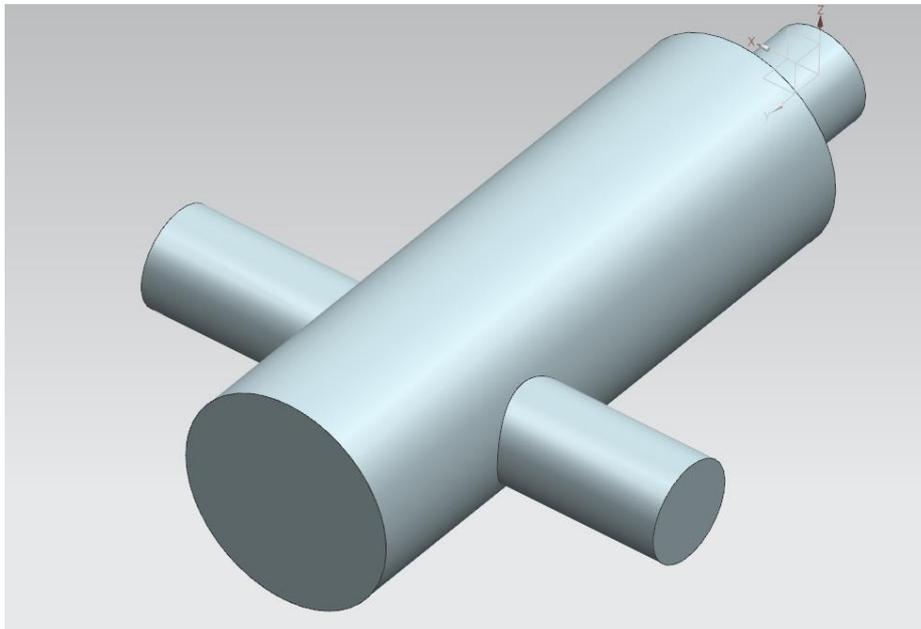
El análisis se realiza siguiendo el mismo procedimiento que el realizado en los modelos anteriores.

Las dimensiones del distribuidor de succión diseñado se detallan en la siguiente imagen:



**Figura 38.** Dimensiones del distribuidor de succión.

A continuación se muestra el modelo 3D del volumen de aire del rodillo de succión:



**Figura 39.** Modelo CAE rodillo de succión.

#### 7.4.2 Análisis del conjunto completo.

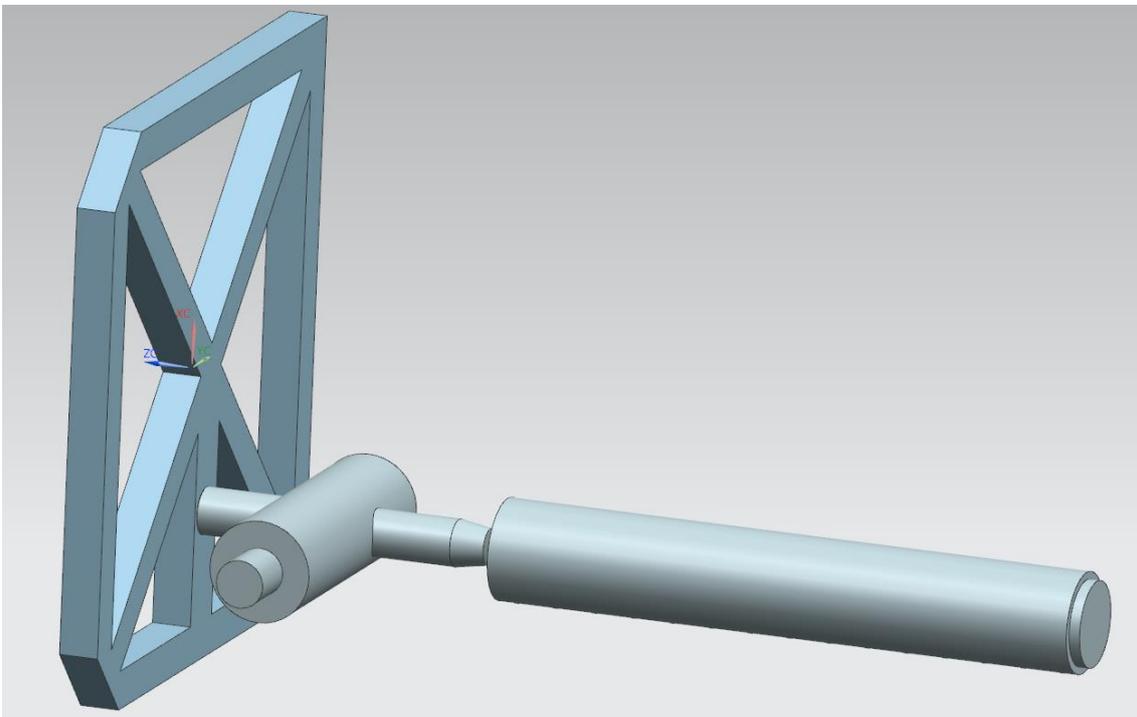
Una vez realizados los análisis de los elementos por separado, se ha realizado una simulación de la instalación completa cuyo objetivo es reproducir un modelo del conjunto para poder

corroborar los resultados obtenidos pormenorizadamente y así llevar a cabo una selección del ventilador de succión.

Además, el modelo será de utilidad en las siguientes fases del proyecto para la evaluación del rediseño de la mesa de succión y la repercusión de su mejora en el resto de la instalación.

Teniendo en cuenta la despreciable pérdida de caudal producida en los tubos de succión, el modelo consta simplemente de los dispositivos directamente acoplados al distribuidor. En el caso del rodillo, dado que la toma de succión es más pequeña que la boca de succión del distribuidor, se ha modelado un volumen de aire cilíndrico entre ambos componentes, simulando la reducción que produce el montaje mostrado en la figura 4.

El modelo del conjunto completo se muestra a continuación:



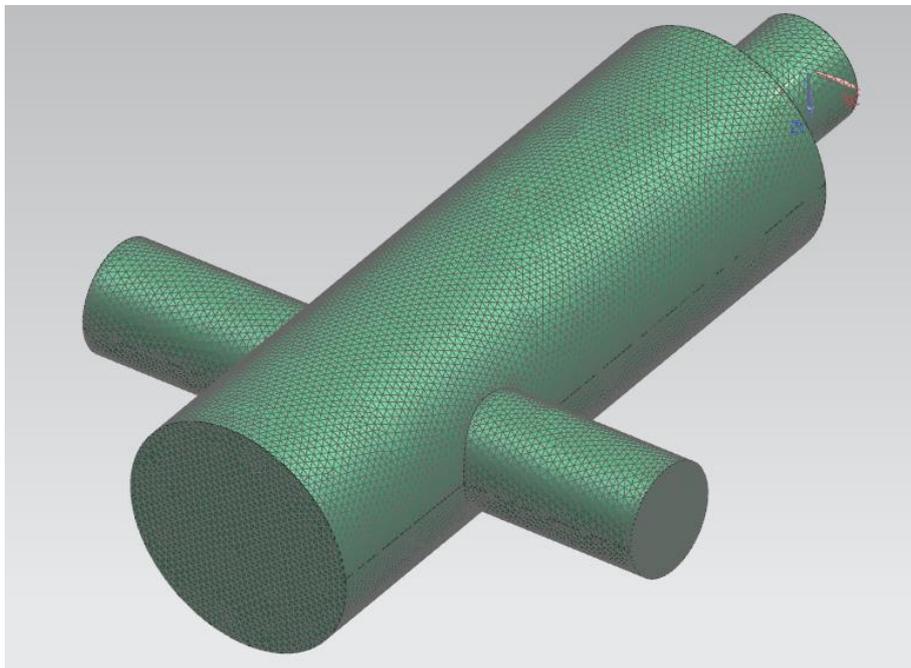
**Figura 40.** Modelo CAE conjunto de succión.

A la hora de hacer el análisis se configura el solver de manera similar a la realizada para el análisis de la mesa y el rodillo de succión y se carga aire como fluido. En este caso, se tienen 4 sólidos diferentes en el modelo, por lo que cada uno se mallará de forma independiente.

Para los mallados pormenorizados de los tres modelos ya estudiados por separado se han replicado los mallados realizados en cada caso, es decir, se han realizado mallados con iguales parámetros y refinamientos en cada sólido.

Para el mallado del distribuidor, se escoge un tamaño de elemento de 2 mm, refinando la malla en la boca de succión y las bocas de conexión con los dispositivos de aspiración, determinado

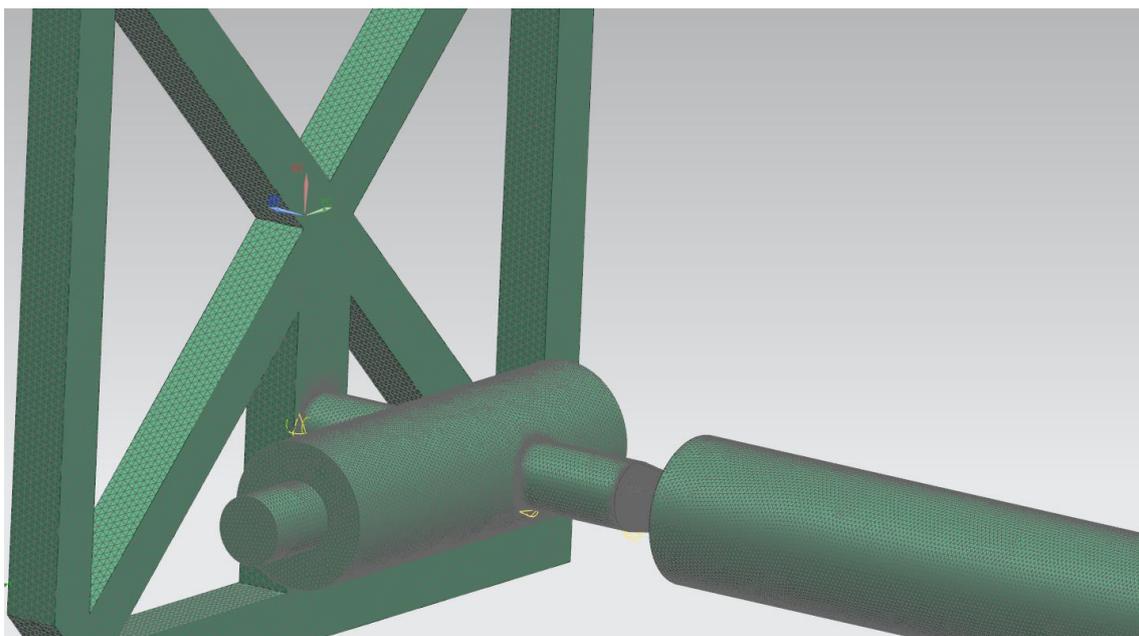
por condiciones de “tamaño en el borde” y “tamaño en la cara”. En este caso se ha optado por que el tamaño de elemento en la tanto en la boca de succión como en las tomas de aspiración sea de 1 mm en las caras y en los bordes.



**Figura 41.** Malla del rodillo de succión.

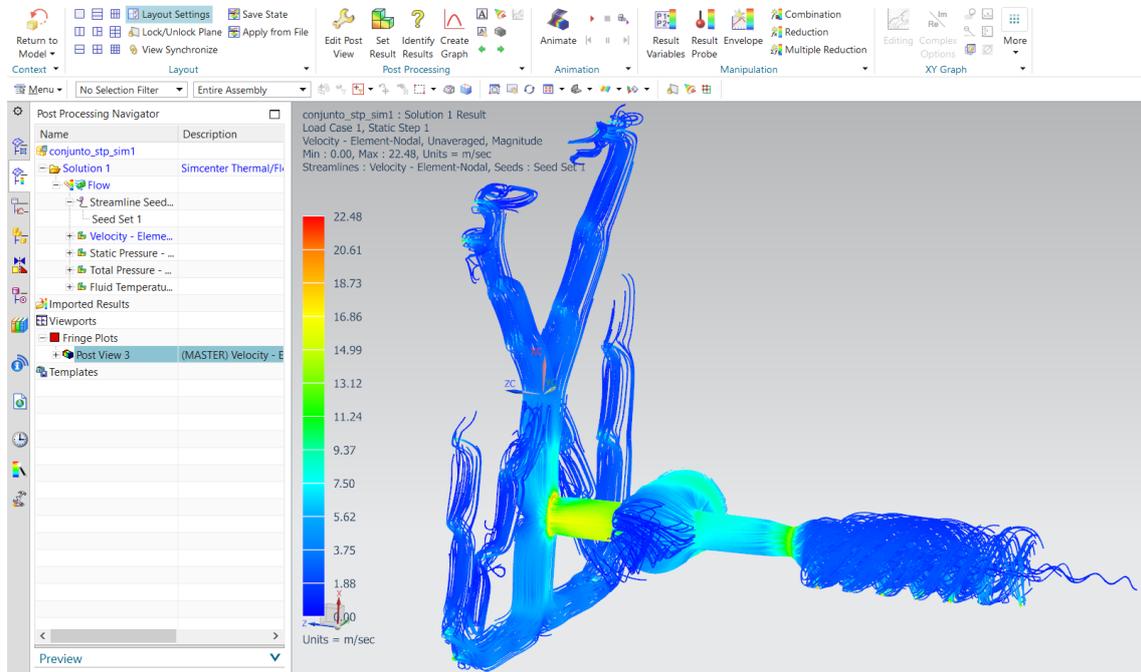
En este modelo, el análisis de la calidad del mallado realizado no arrojaba advertencias, por lo que la malla generada automáticamente no se ha modificado.

En lo que se refiere a la unión de las mallas entre sí se ha hecho uso de la herramienta “mesh mating”, mediante la cual se pueden seleccionar dos mallas con caras y/o aristas coincidentes para su fusión.



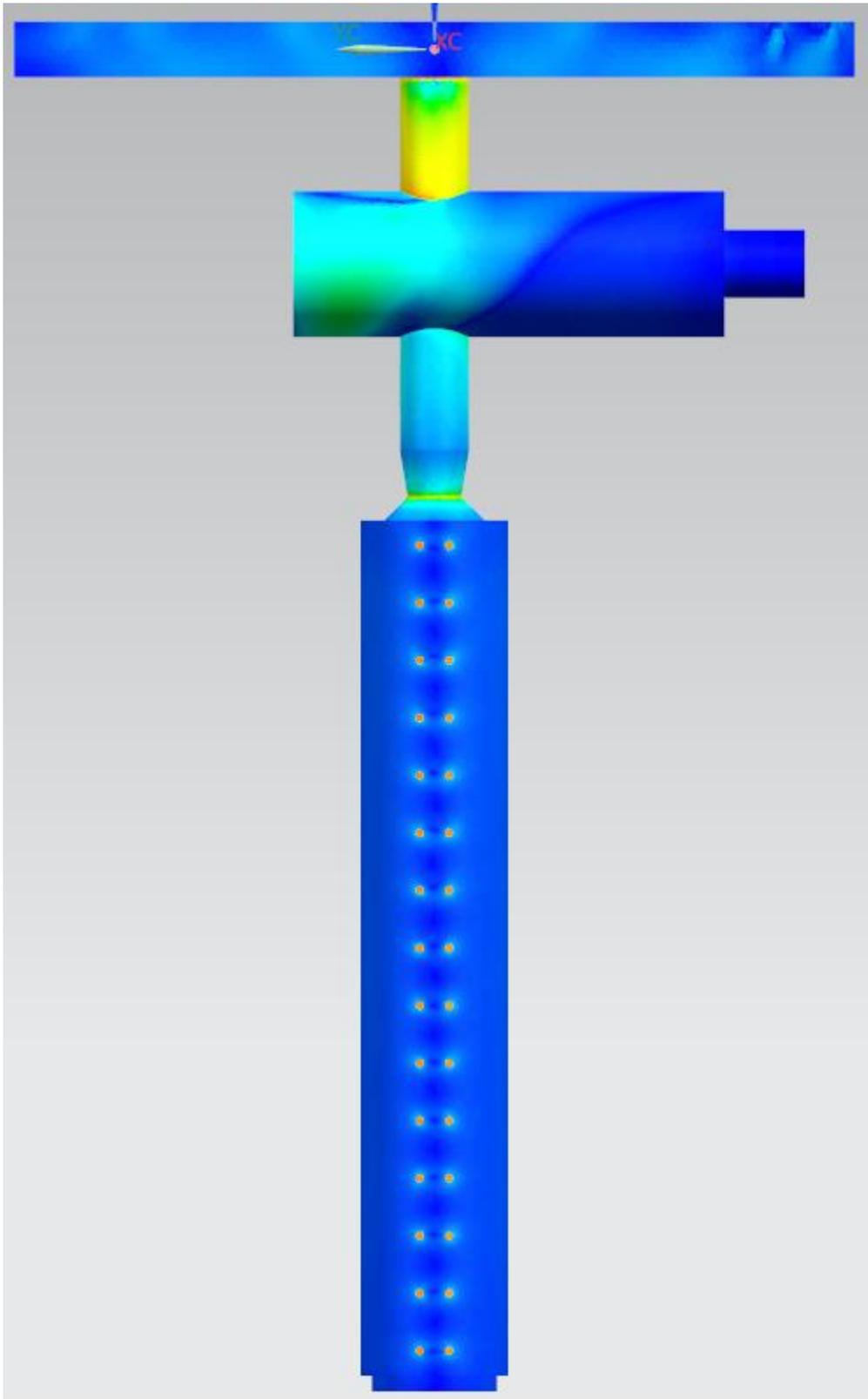
**Figura 42.** Fusión de mallas, creación de malla multicuerpo.

En cuanto a las condiciones de contorno se selecciona la boca de alimentación del distribuidor para definir unas condiciones de “outlet flow” de 2070 l/min, dejando los taladros de aspiración de ambos dispositivos como “opening”.



**Figura 43.** Velocidad del flujo; conjunto completo.

En la figura se representan las líneas de flujo salientes de todos los nodos de la toma de aspiración. Es curioso observar cómo en el rodillo de succión el flujo genera un vórtice en el volumen, sin aparentemente llegar aspirar por los taladros más alejados. Sin embargo, la siguiente figura en la que se muestran dichos taladros contradice esta suposición, por lo que el motivo de esta representación debe achacarse al propio número limitado de líneas de flujo, determinado por el número de nodos de la cara de succión.



**Figura 44.** Velocidad de flujo, taladros de aspiración (conjunto completo).

Es interesante observar en esta imagen cómo el flujo no se distribuye simétricamente a ambos dispositivos, si observamos el distribuidor de succión central.

Ello es debido a la mayor pérdida de caudal que tiene el rodillo de succión, tal y como se concluye comparando los resultados de los análisis expuestos en los apartados 5.1.2 y 5.2.2.

A continuación se tabularán los valores de caudal de cada taladro de aspiración de ambos dispositivos, con el objetivo de equiparar los resultados a los obtenidos en los análisis por separado.

Si ambos resultados coinciden, se puede afirmar que el conjunto rinde tal y como se espera, si no sucede esto, habrá que iterar la resolución del problema variando el valor de la condición de contorno “outlet flow”.

**Tabla 8.** Caudales de aspiración de cada taladro en la mesa de succión (conjunto completo).

Agujero	Caudal (l/min)						
1	38.27	11	36.42	21	35.72	31	37.06
2	38.90	12	35.89	22	35.27	32	37.17
3	39.91	13	35.36	23	35.45	33	40.46
4	41.41	14	35.22	24	35.31	34	40.40
5	40.50	15	35.36	25	36.24	35	37.96
6	41.09	16	35.30	26	36.89	36	38.04
7	39.68	17	35.67	27	37.58	37	39.77
8	39.05	18	34.26	28	38.71		
9	38.04	19	34.52	29	39.84		
10	37.48	20	34.96	30	39.70	Total	1388.88

**Tabla 9.** Caudales de aspiración de cada taladro en el rodillo de succión (conjunto completo).

Agujero	Caudal (l/min)	Agujero	Caudal (l/min)	Agujero	Caudal (l/min)
1	21.96	11	21.86	21	21.82
2	21.98	12	21.82	22	21.90
3	21.99	13	21.91	23	21.81
4	22.08	14	21.80	24	21.81
5	21.89	15	21.72	25	21.79

6	22.01	16	21.73	26	21.79
7	21.85	17	21.61	27	21.68
8	22.06	18	21.69	28	21.71
9	21.91	19	21.87	29	21.68
10	22.02	20	21.72	30	21.90
				Total	655.37

A la vista de los resultados se tiene que la mesa de succión aspira con mayor caudal del anteriormente determinado, mientras que el rodillo lo hace con menor caudal del necesario para funcionar correctamente tal y como está diseñado el sistema.

Si se aumenta el caudal de succión en la simulación, se tendrá que el caudal de ambos dispositivos variará de manera directamente proporcional, obviamente no teniendo por qué ser lineal su distribución.

Se supondrá sin embargo una linealidad en el comportamiento solamente para establecer un punto de partida en la iteración de la condición de “outlet flow”.

Dado que con un input de 2070 l/min el rodillo aspira un caudal de 655.37 l/min, que es aproximadamente la mitad de lo que requiere para que funcione bien según las pruebas empíricas realizadas, se determina un primer valor de partida para el “outlet flow” de 4140 l/min, que es el doble del valor de la primera simulación.

Tras haber realizado la iteración definida, se ha concluido que con un caudal de succión de 3225 l/min el rodillo de succión aspira un total de 1017.84 l/min, valor muy cercano al determinado en el apartado 5.2.

**Tabla 10.** Caudales de aspiración de cada taladro en el rodillo de succión (iteración final).

Agujero	Caudal (l/min)	Agujero	Caudal (l/min)	Agujero	Caudal (l/min)
1	34.09	11	33.95	21	33.88
2	34.12	12	33.89	22	34.00
3	34.14	13	34.02	23	33.89
4	34.30	14	33.87	24	33.87

5	34.00	15	33.72	25	33.85
6	34.17	16	33.75	26	33.83
7	33.94	17	33.56	27	33.68
8	34.25	18	33.70	28	33.72
9	34.05	19	33.95	29	33.66
10	34.19	20	33.75	30	34.04
				Total	1017.84

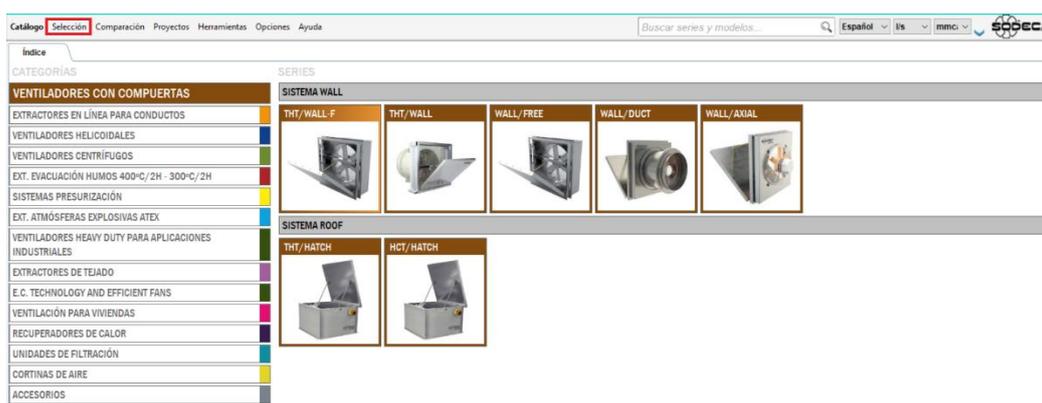
Por tanto, la selección del ventilador se realizará teniendo en cuenta que debe proporcionar un caudal en la boca de aspiración de **3225 l/min.**

### 7.5 Selección del ventilador de succión.

En este apartado se explicará el proceso de selección del ventilador con la herramienta de selección de Sodeca; Sodeca Quick fan selector.

La herramienta de selección es un software gratuito y se puede descargar en la web del proveedor de manera sencilla.

Pinchando en el recuadro especificado se accede al menú de selección, mediante el cual se podrán especificar los requisitos que se precisan para dimensionar y seleccionar el ventilador.



**Figura 45.** Menú de inicio Quick fan selector.

En el menú de selección se puede filtrar los resultados para ignorar ciertos productos y/o gamas de producto. En este caso se ha seleccionado la familia de producto “Ventiladores centrífugos” para mostrar sólo los productos compatibles con los requisitos del sistema de esta familia de

productos. Los motivos por los cuales se ha decidido escoger un producto de esta familia son los siguientes:

1. Facilidad de montaje y sujeción: Los ventiladores centrífugos se pueden acoplar fácilmente al sistema con unas bridas suministradas por el proveedor.
2. Factor económico: Un ventilador centrífugo de tamaño medio tiene precios inferiores a otros productos del proveedor, según consulta técnica realizada telefónicamente.

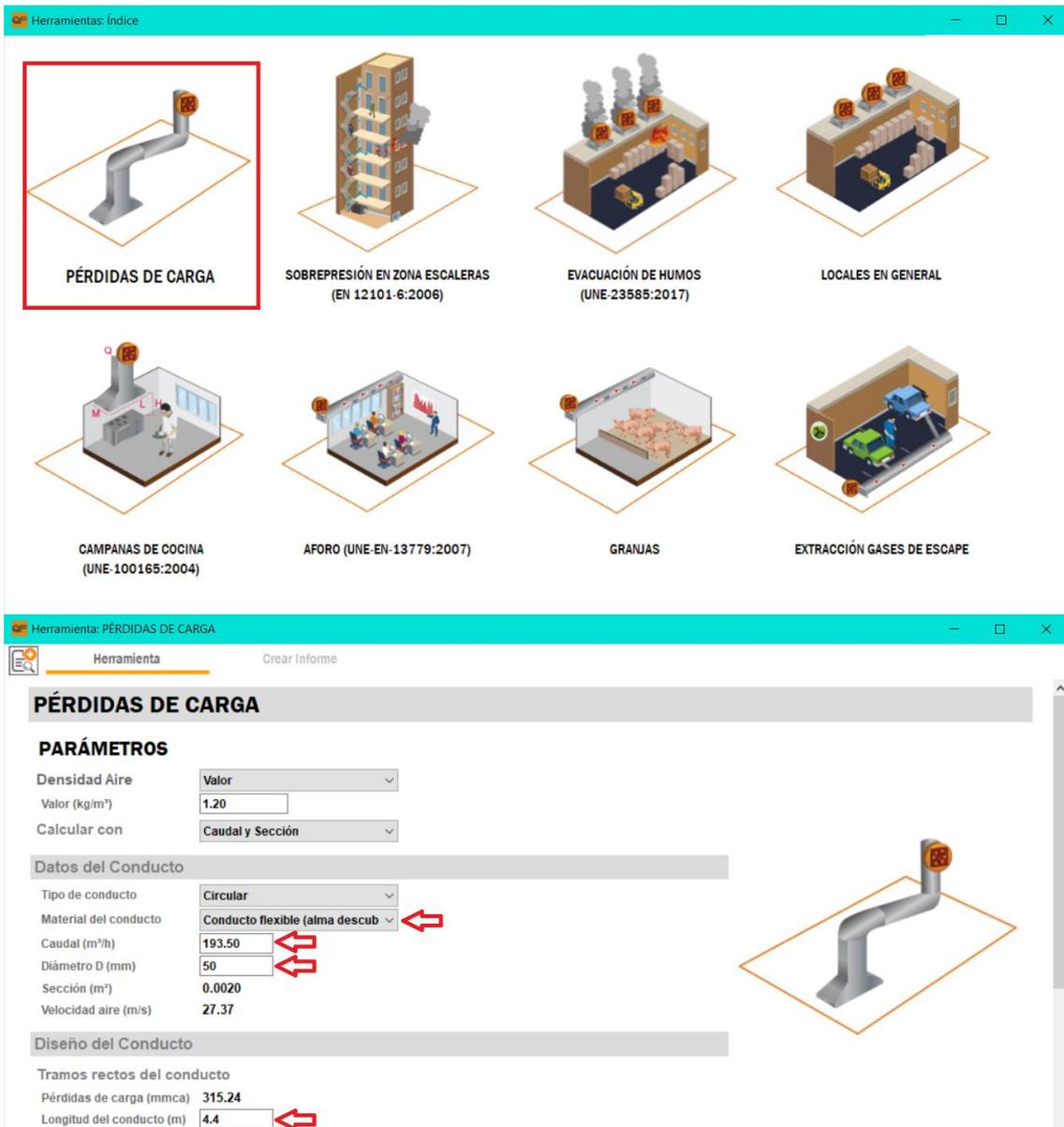
Una vez marcada la familia se ha de clicar en el submenú de configuración para definir los requisitos del sistema.

Es importante tener en cuenta que el caudal que se requiere debe ser el producido por la boca de aspiración, por lo que tras obtener un resultado con esta herramienta, se profundizará en su selección consultando el catálogo virtual mostrado en la figura 45.



**Figura 46.** Menú de selección Quick fan selector.

En el submenú recuadrado en la imagen anterior se selecciona el tipo de instalación que se desea dimensionar, y a continuación se rellenan los campos requeridos para obtener el valor de pérdidas de presión estática de la instalación, necesarios para obtener el punto de trabajo del ventilador en base al cual se dimensiona.



**Figura 47.** Submenú de configuración Quick fan selector.

En dicho submenú se selecciona la opción de “pérdidas de carga” y dentro del mismo se introducen los siguientes datos:

**Tabla 11.** Requisitos del sistema de succión para selección de ventilador.

Característica	Valor
Tipo de tubo	Conducto flexible (alma descubierta)
Caudal	193.5 m <sup>3</sup> /h (3225 l/min)
Diámetro interior del tubo	50 mm
Longitud del tubo	4.4 m (3142 + 1249 mm)

Aunque en el análisis se han obviado los tubos de succión por sus prácticamente nulas pérdidas de caudal, la herramienta de selección utilizada establece las pérdidas de presión estática en base al tipo, tamaño y extensión de las tuberías utilizadas en la instalación. De hecho, los términos de energía potencial de la ecuación de continuidad de Bernoulli definen la energía del

flujo (o fluido estacionario) relativos a la presión estática del mismo; no siendo objeto de estudio de los análisis realizados.

The screenshot shows the 'Selección' (Selection) screen of the SODECA QuickFan Selector software. The search criteria are: Punto Diseño: Presión estática, Q (m³/h): 193.5, Pe (mmca): 315.24, and Densidad Aire: 1.20 kg/m³. The search results table is as follows:

Modelo	Q (m³/h)	Pe (mmca)	Velocidad salida aire (m/s)	Velocidad (rpm)	Potencia Mec. Nominal (kW)	Nivel potencia sonora dB(A)	Peso aprox. (kg)
CA-148-2T-0.75	227.04	434.35	15.38	2760	0.55	88	28.0
CAS-248-2T-0.75	215.41	390.63	8.55	2760	0.55	88	43.5
CAS-9-248-2T-0.75	215.41	390.63	8.55	2800	0.55	82	46.5
CA-148-2T-1.1E3	230.14	446.05	15.39	2840	0.75	89	30.0
CAS-248-2T-1.1E3	216.00	391.87	8.57	2855	0.75	89	45.0
CAS-9-248-2T-1.1E3	216.00	391.87	8.57	2855	0.75	83	48.0
CA-148-2T-1.5.1E3	231.91	453.48	15.71	2950	1.10	90	32.0

Figura 48. Resultados de selección de producto Quick fan selector.

Los resultados obtenidos en el proceso de selección se muestran en la figura 48. De entre los modelos válidos para el sistema se preseleccionan los dos modelos de la gama “CA” por ser más compactos y livianos que los de la gama “CAS”.

A continuación se clic en ambos modelos y se compara su rendimiento en la instalación definida para elegir uno de ellos.

The screenshot shows the 'Comparación: Unidades de Ventilación' (Comparison: Ventilation Units) screen. It displays a graph titled 'Curva característica para 1.2kg/m³' (Characteristic curve for 1.2kg/m³) with the design point: Caudal Q(m³/h)=431.59 / Presión(mmca)=345.08. The graph plots static pressure (mmca) on the y-axis (0 to 500) against flow rate (m³/h) on the x-axis (0 to 600). Two curves are shown: a blue curve for model 1 (CA-148-2T-0.75) and a green curve for model 2 (CA-148-2T-1.1E3). The design point is marked with a grey dot and a vertical line extending to the x-axis at 431.59 m³/h.

Below the graph, the 'Modelos a comparar' (Models to compare) table is shown:

Núm.	Modelo	Caudal (m³/h)	Presión (mmca)	Velocidad (rpm)	Intensidad máx. admisible (A)	Potencia (kW) [*]	Nivel potencia sonora dB(A)	Peso aprox. (kg)
1	CA-148-2T-0.75	227.18	434.52	2760	1.49	0.55	88	28.0
2	CA-148-2T-1.1E3	230.17	446.05	2840	1.62	0.75	89	30.0

Footnote: [\*] Potencia Mecánica Nominal excepto para valores con \* que son Potencia Eléctrica Máx.

Figura 49. Comparación de los modelos preseleccionados.

A la vista de los resultados se puede determinar que ambos modelos van prácticamente igual de sobrados en cuanto a capacidad de suministro, por lo que, teniendo en cuenta su escasa diferencia, se puede decir que ambos modelos funcionarán más o menos igual de bien.

Desde el departamento de ingeniería mecánica de INREMA se tomó la decisión de seleccionar el modelo CA-148-2T-1-IE3, el segundo de los preseleccionados. El punto de trabajo de este modelo en la instalación es tal que el caudal suministrado es de **230.17 m<sup>3</sup>/h**, es decir, **3836.17 l/min**.

Es importante destacar que el proceso de selección realizado en la empresa fue siguiendo el método de prueba y error, contactando frecuentemente con el departamento técnico del proveedor del ventilador de succión, resultando así que el segundo modelo de ventilador testeado fuese el adecuado.

## **8. Mejora de la mesa de succión.**

### **8.1. Introducción.**

En este apartado se expone el proceso iterativo mediante el cual se mejora a nivel técnico el diseño de la mesa de succión.

Se cambia la dinámica de lo hasta ahora realizado, pues lo que se plantea y expone en el presente apartado se corresponde con un proceso de desarrollo a diferencia de lo anteriormente expuesto, un proceso de estudio funcional y dimensionado de componentes.

El diseño se realizará modificando el volumen de la mesa de succión del modelo del conjunto completo mostrado en la figura 40 y llevando a cabo un proceso iterativo de rediseño y análisis CAE.

En primer lugar se han de definir unos criterios de diseño que limiten, en base a factores funcionales externos y de fabricación, el tamaño y la forma de la mesa de succión.

El segundo paso es reevaluar el funcionamiento teórico del modelo de la mesa de succión, comparando el actual diseño con el desarrollado. Para ello se tomará como referencia el análisis realizado en el apartado 5.1.2, realizando análisis similares a los nuevos diseños y comparando los resultados.

Tras establecer el punto de partida que se, se determinan las limitaciones de diseño para la mesa de succión.

Una vez definidas las limitaciones de diseño de la pieza se procede al diseño y análisis iterativo del modelo, determinando en cada iteración si el diseño es más eficiente que el anterior.

Por último, se modela una pieza fabricable que coincida con el volumen de aire resultante del estudio. Se establece con ello el proceso de fabricación de dicha pieza.

### **8.2 Limitaciones de diseño.**

A continuación se recogen tales condiciones con su correspondiente justificación técnica.

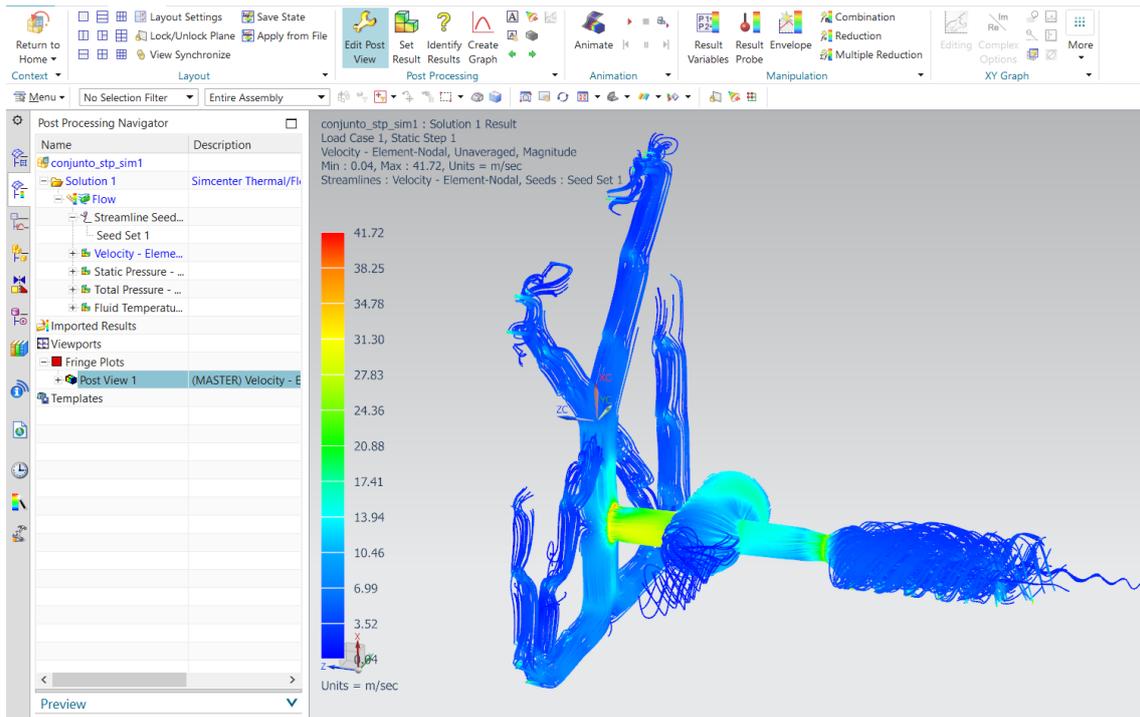
1. Las dimensiones del nuevo diseño deben ser similares a las del modelo original. El resto de los componentes (soportes, accionamientos...) han sido diseñados e integrados en conjunción con el diseño actual, por lo que un cambio en sus dimensiones implicaría un cambio en más componentes que no se desea acometer.
2. El nuevo diseño debe tener un anclaje al manipulador cartesiano similar al original. Por la misma razón que la explicada en el punto 1, los puntos de anclaje deben coincidir y ser perfectamente compatibles con el manipulador del sistema.
3. Se debe respetar la distancia y dimensión de los chaflanes en las esquinas. El motivo de los chaflanes de las esquinas es liberar el campo de visión a unas cámaras situadas en un punto de inspección que permiten ubicar el velo para su correcto posicionado. Un cambio en la ubicación del sistema de visión artificial no es factible. Las cámaras deben tener una clara visión de las esquinas del velo.
4. El nuevo diseño de la mesa de succión debe tener un peso similar al original. Puesto que el manipulador que lo gobierna será el mismo, el peso total del nuevo diseño debería rondar valores similares al del modelo original, para no penalizar en ningún aspecto en relación al diseño anterior.
5. La nueva mesa de succión deberá asegurar la estanqueidad en todo el volumen salvo en las tomas de succión.
6. El nuevo diseño deberá reducir la diferencia de caudal de succión de los agujeros de succión que contenga, homogeneizando el caudal de succión total.

### 8.3 Diseños y simulaciones

Antes de acometer el diseño de la mesa de succión se simula y evalúa el modelo completo para el punto de trabajo definido en el apartado 5.5.

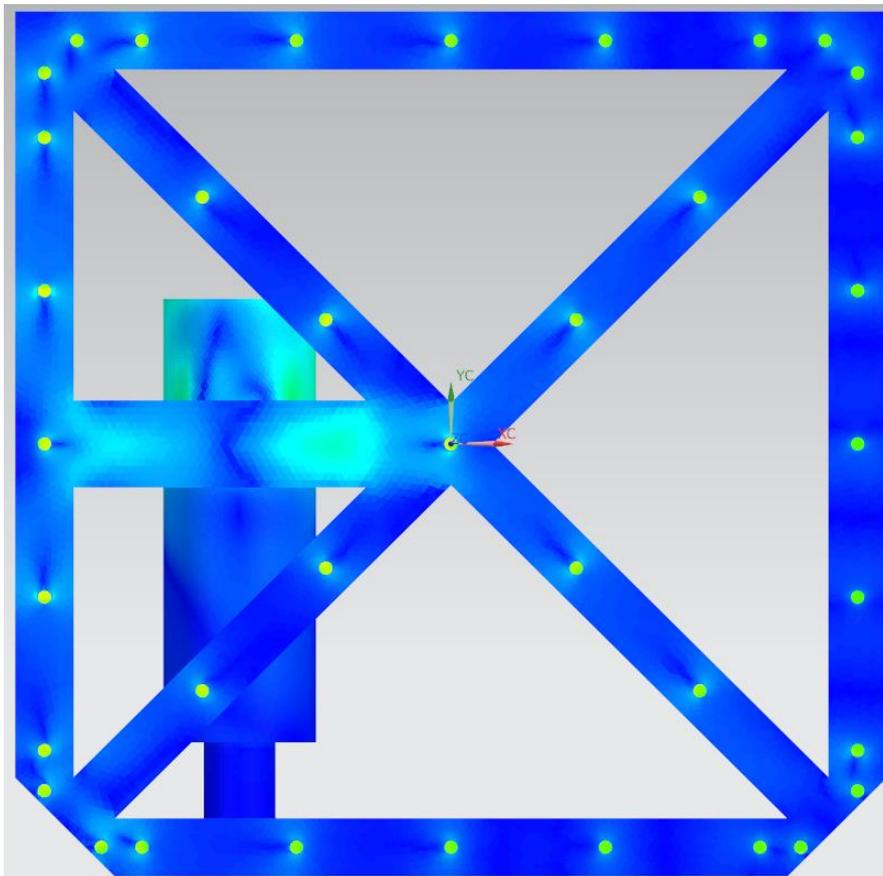
La simulación se realiza de manera sencilla, reemplazando el valor de caudal en la boca de aspiración de la última simulación realizada (apartado 5.4.2) que era de **3225 l/min** por el determinado en el apartado 5.5; **3836.17 l/min**.

En la siguiente imagen se pueden ver las trayectorias del flujo en el conjunto:



**Figura 50.** Velocidad del flujo; conjunto completo.

Como es lógico no se aprecian diferencias en las trayectorias del flujo entre el resultado de este análisis y el realizado en el apartado 5.4.2.



**Figura 51.** Velocidad de flujo, taladros de aspiración de la mesa de succión (conjunto completo).

Al igual que sucede en la simulación del apartado 5.4.2, se tiene que los agujeros de la mesa de succión no succionan uniformemente.

En la siguiente tabla se recoge el caudal que pasa por cada agujero, promediando los valores de velocidad de flujo de los elementos que hay en ellos y multiplicando por el área de los mismos.

**Tabla 12.** Caudales de aspiración de cada agujero.

Agujero	Caudal (l/min)						
1	70.51	11	67.15	21	65.98	31	68.34
2	71.70	12	66.21	22	65.12	32	68.58
3	73.56	13	65.26	23	65.53	33	74.45
4	76.28	14	64.99	24	65.18	34	74.32
5	74.43	15	65.23	25	66.94	35	69.92
6	75.54	16	65.10	26	68.12	36	70.08
7	73.03	17	65.90	27	69.36	37	73.16
8	71.82	18	63.18	28	71.39		
9	70.06	19	63.78	29	73.37		
10	69.07	20	64.60	30	73.06	Total	2560.31

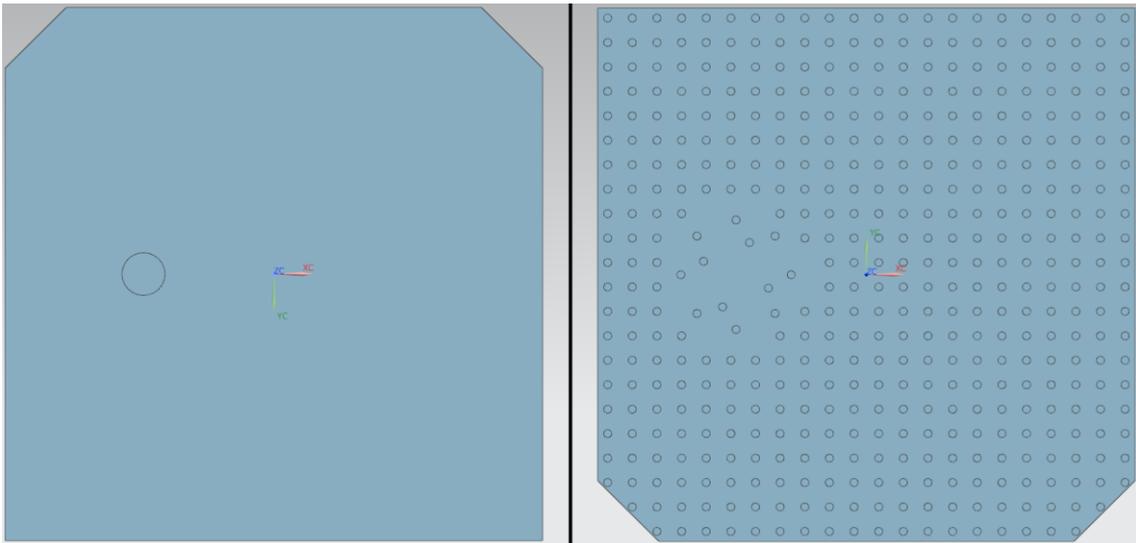
Como se puede observar, el valor de caudal de succión total es de **2560.31 l/min** para una alimentación del sistema de **3836.17 l/min**.

También se tiene que entre el agujero por el que más caudal pasa y por el que menos, la diferencia es de **13.1 l/min**.

El objetivo de este apartado es aumentar el caudal de succión total para un mismo valor de alimentación del sistema y llegar a un modelo que reparta la succión más uniformemente.

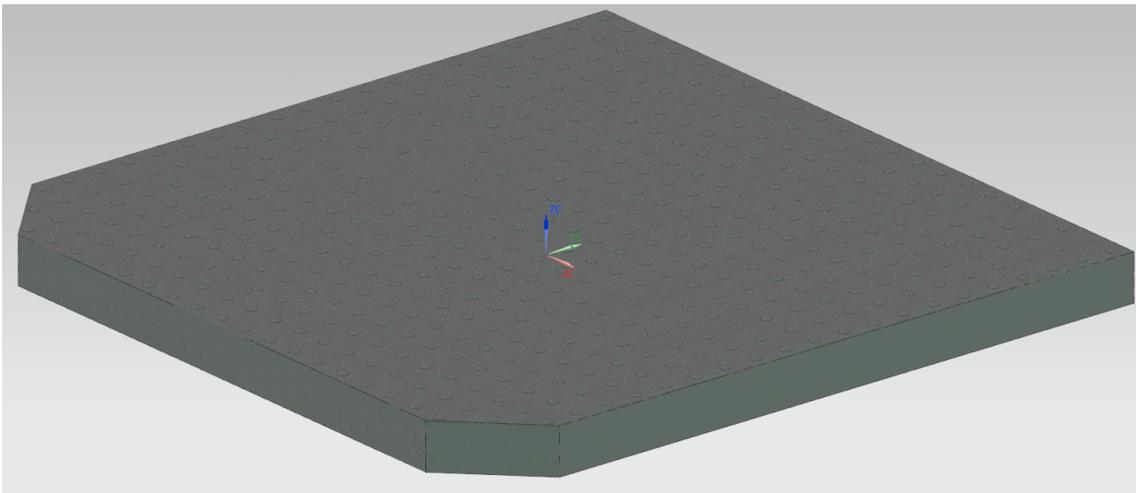
### 8.3.1. Iteración 1.

En la siguiente imagen se puede ver un diseño alternativo de un volumen de aire para su simulación.



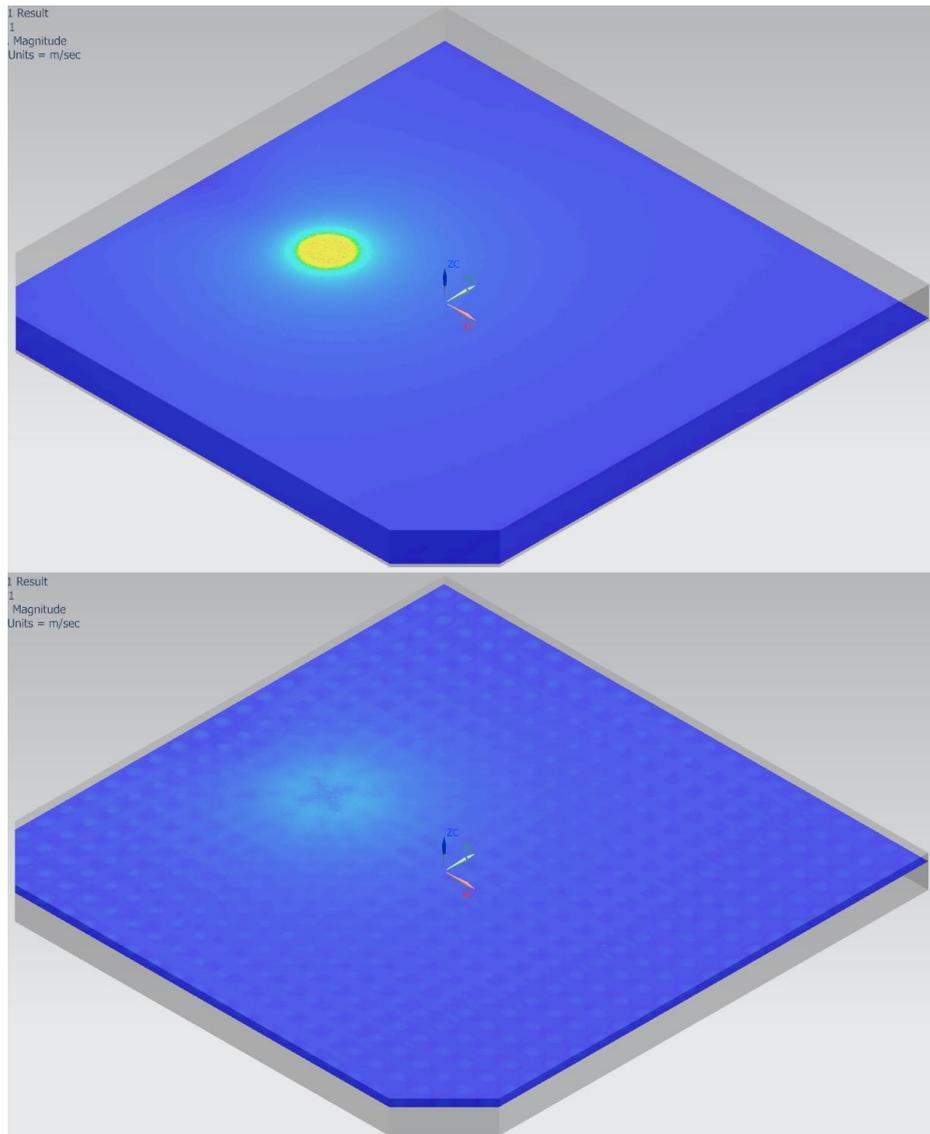
**Figura 52.** Diseño de mesa de succión alternativa 1.

A la hora de hacer el análisis se configura el solver de manera similar a la realizada para el análisis de la mesa de succión original y se carga aire como fluido. En el caso del mallado, se escoge un tamaño de elemento de 2 mm, refinando el mallado en los taladros de aspiración al igual que en la simulación del diseño original.



**Figura 53.** Malla de la mesa de succión 1.

En cuanto a las condiciones de contorno, de manera análoga a la realizada con la mesa de succión, se selecciona la cara de la boca de aspiración para definir un “outlet flow” de 1030 l/min y se seleccionan las caras de los taladros como “opening”.



**Figura 54.** Velocidad del flujo; taladros de aspiración.

Como se puede ver en la figura 54, la distribución del flujo de es bastante uniforme en la pieza, al contrario de lo que sucedía en la mesa de succión original.

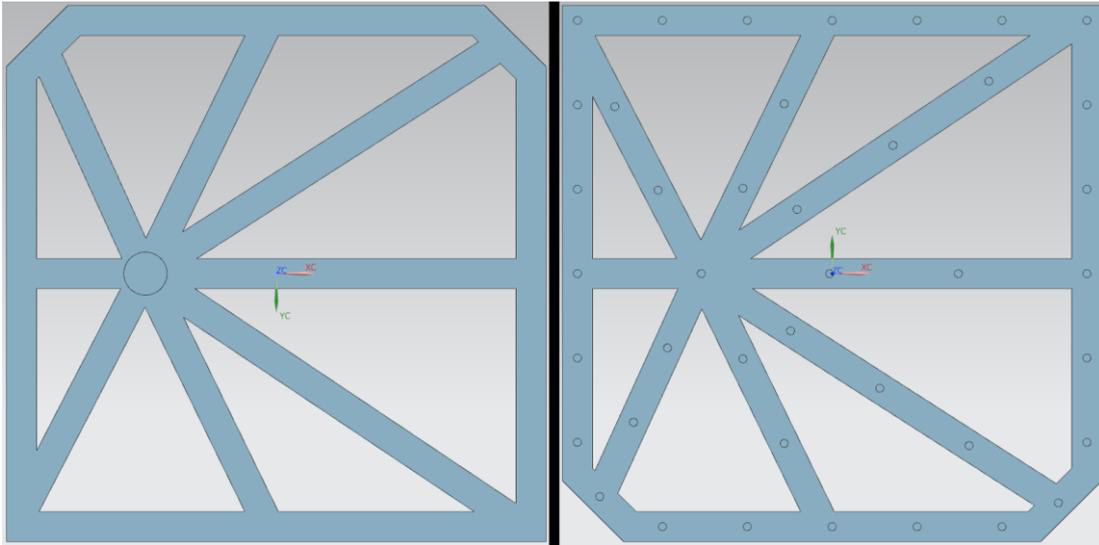
En lo que se refiere al caudal total de aspiración que pasa por los agujeros, el resultado se ha obtenido agrupando todos los agujeros, de modo que se tiene un valor promediado del caudal total. Dicho valor es de **2.11 l/min**, es decir, por cada agujero pasa una media de 2.11 l/min. Multiplicando este valor por el número de agujeros totales se obtiene una aproximación al caudal total; **975.57 l/min**.

Este valor es significativamente más bajo que los 1019.38 l/min que se obtenían en la mesa de succión original, por lo que, aunque se aspira de manera más uniforme, se aspira con menor caudal y por tanto este diseño alternativo es peor.

El motivo por el cual sucede lo anteriormente descrito puede ser el hecho de que, al crear una campana de aspiración de tan poca altura, el aire se dispersa en gran medida perdiendo mucha energía. Se deduce por tanto que si el aire está más canalizado tendrá menor pérdida de caudal.

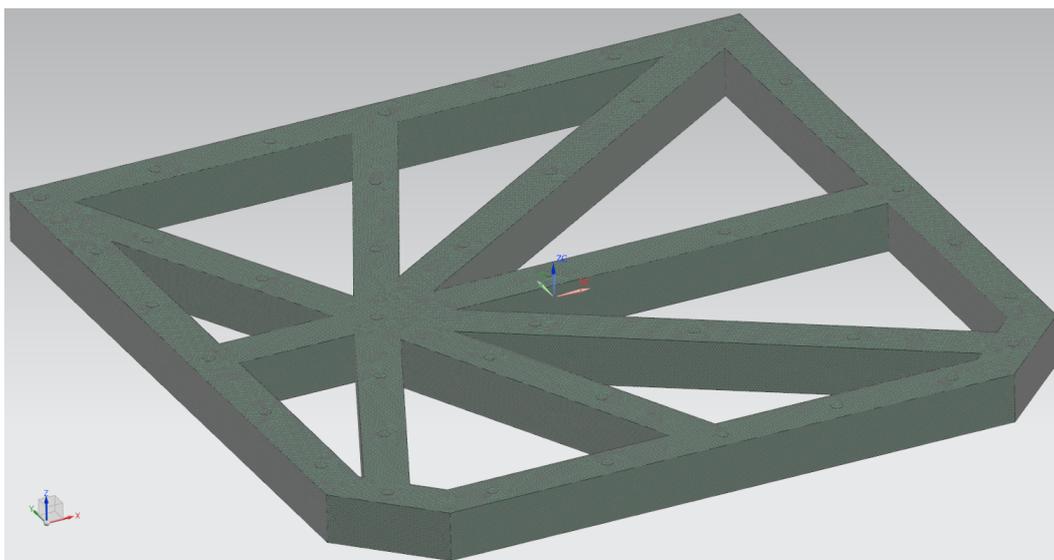
### 8.3.2. Iteración 2.

En la siguiente imagen se puede ver otro diseño alternativo de un volumen de aire para su simulación.



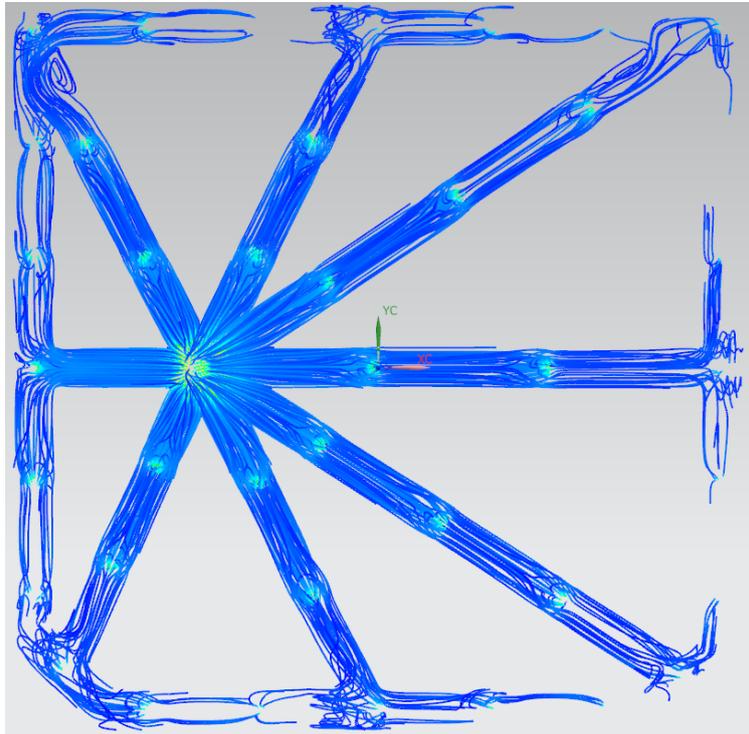
**Figura 55.** Diseño de mesa de succión alternativa 2.

A la hora de hacer el análisis se configura el solver de manera similar a la realizada para el análisis de la mesa de succión original y se carga aire como fluido. En el caso del mallado, se escoge un tamaño de elemento de 2 mm, refinando el mallado en los taladros de aspiración al igual que en la simulación del diseño original.



**Figura 56.** Malla de la mesa de succión 2.

En cuanto a las condiciones de contorno, de manera análoga a la realizada con la mesa de succión, se selecciona la cara de la boca de aspiración para definir un “outlet flow” de 1030 l/min y se seleccionan las caras de los taladros como “opening”.



*Figura 57. Velocidad del flujo; trayectorias.*

Como se puede ver en la figura 5, la distribución del flujo de es muy poco uniforme en la pieza, al igual de lo que sucedía en la mesa de succión original.

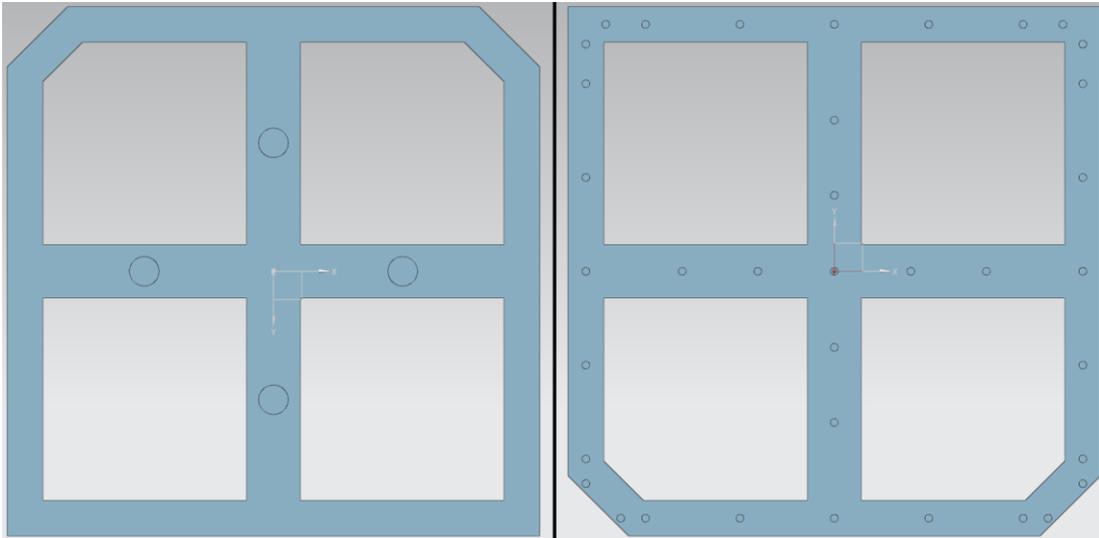
En lo que se refiere al caudal total de aspiración que pasa por los taladros, el resultado se ha obtenido agrupando todos los taladros, de modo que se tiene un valor promediado del caudal total. Dicho valor es de **8 l/min**, es decir, por cada agujero pasa una media de 8 l/min. Multiplicando este valor por el número de taladros totales se obtiene una aproximación al caudal total; **989.45 l/min**.

Este valor es significativamente más bajo que los 1019.38 l/min que se obtenían en la mesa de succión original. Se determina por tanto que se aspira con menor caudal y con igual o peor uniformidad en la succión, ergo este diseño alternativo es peor.

Ciertamente el caudal de aspiración obtenido es mayor que el resultante del prototipo de la primera iteración. Ello indica que la conclusión sacada del modelo de la primera iteración podría ser cierta. Por desgracia el modelo de esta iteración no es tan eficiente como se esperaba, probablemente por las bifurcaciones del flujo. En esencia se tiene que en el camino que recorre el flujo hay lo que se puede considerar el equivalente a varios codos de ángulo agudo. Convendría pues evitar estas situaciones.

### 8.3.3. Iteración 3.

En la siguiente imagen se puede ver otro diseño alternativo de un volumen de aire para su simulación.

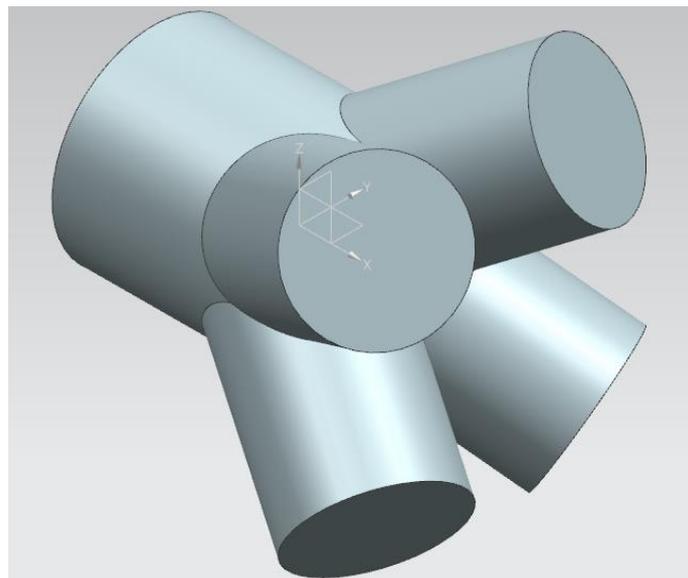


**Figura 58.** Diseño de mesa de succión alternativa 3.

Este diseño se diferencia de los demás en que tiene 4 tomas de succión en lugar de una. Se ha probado este diseño suponiendo que este diseño puede resultar en que el flujo se distribuya de manera más uniforme por el volumen. Además, se han prescindido de conexiones que formen ángulos agudos.

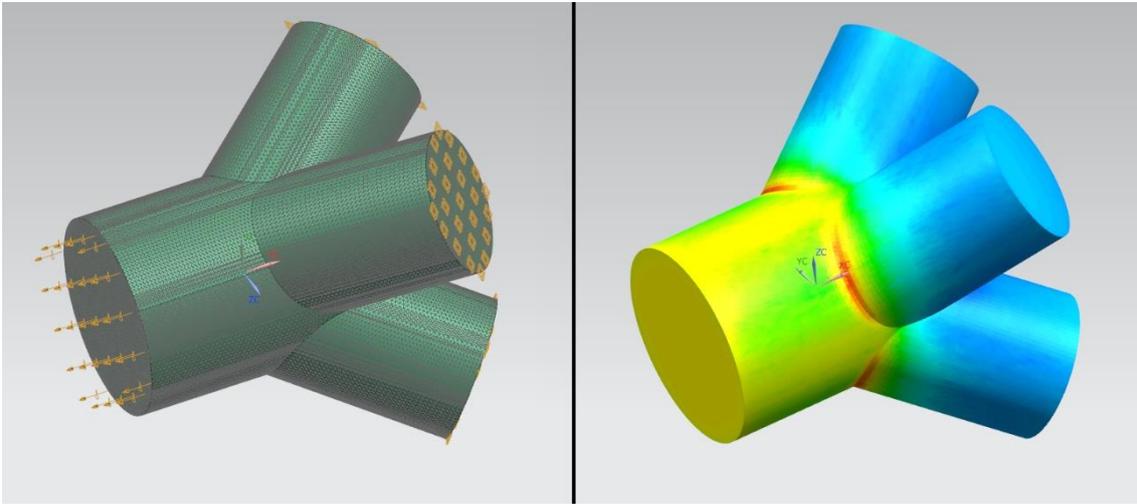
Para bifurcar el flujo se ha diseñado un útil para su fabricación mediante impresión 3D.

Para evaluar el efecto que este elemento tiene en la instalación se ha simulado al igual que el resto de componentes. El diseño de la pieza es muy simple, y su volumen interior negativo se muestra en la siguiente imagen.



**Figura 59.** Divisor de flujo.

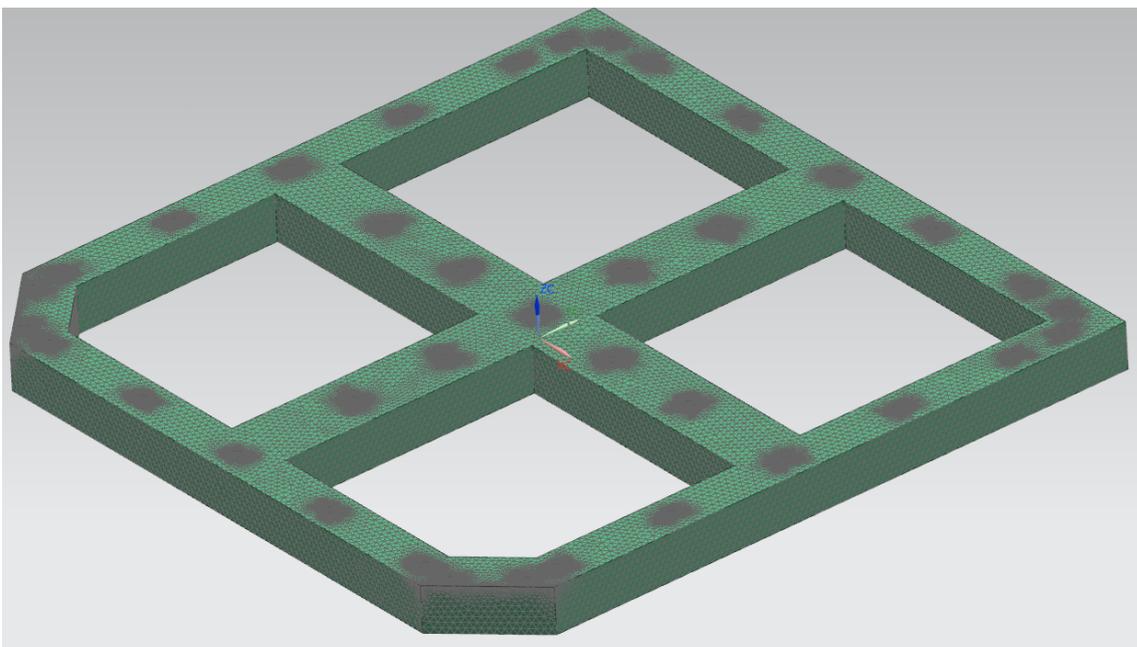
Como puede verse en la figura 59, las bocas secundarias son de menor diámetro que la principal, concretamente de 30 mm, mientras que el diámetro de la boca principal es el mismo al de la boca de aspiración del diseño original; 43 mm.



**Figura 60.** Simulación del divisor de flujo.

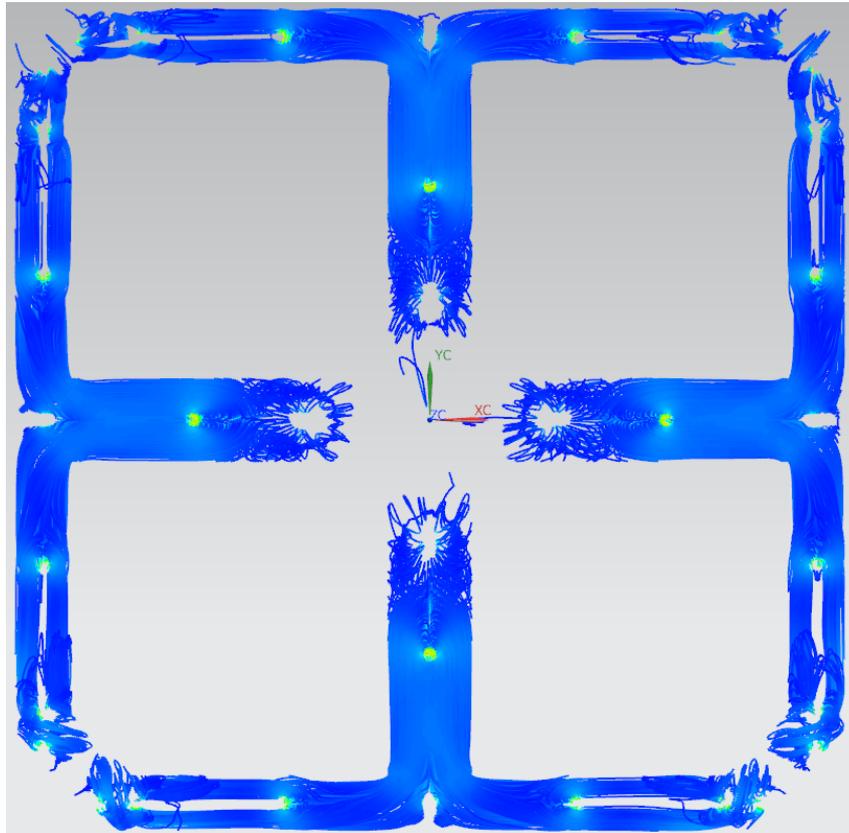
Simulando el divisor de flujo de manera análoga al resto de cuerpos, con un flujo saliente de 1030 l/min de caudal por la boca principal y aberturas en las bocas secundarias, se tiene que por cada boca fluyen **256.4 l/min** de caudal.

Volviendo con este dato a la mesa de succión, se configura el solver de manera similar a la realizada para el análisis de la mesa de succión original y se carga aire como fluido. En el caso del mallado, se escoge un tamaño de elemento de 2 mm, refinando el mallado en los taladros de aspiración al igual que en la simulación del diseño original.



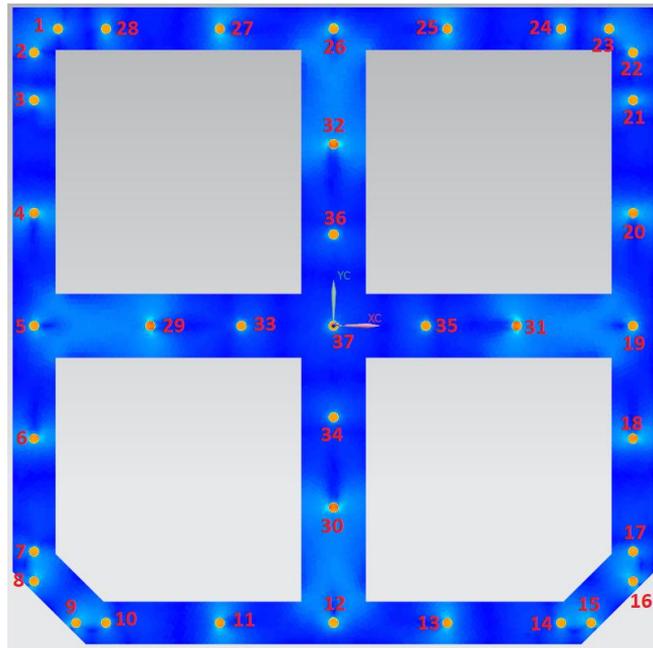
**Figura 61.** Malla de la mesa de succión 2.

En cuanto a las condiciones de contorno, de manera análoga a la realizada con la mesa de succión, se selecciona la cara de la boca de aspiración para definir un “outlet flow” de 1030 l/min y se seleccionan las caras de los taladros como “opening”.



**Figura 62.** Velocidad del flujo; trayectorias.

Como se puede ver en la figura 62, la distribución del flujo de es muy poco uniforme en la pieza, al igual de lo que sucedía en la mesa de succión original.



**Figura 63.** Velocidad del flujo; taladros de aspiración.

Como era de esperar, los elementos presentan una capacidad de succión más uniforme. Aunque en la figura 62 no se aprecie, el flujo pasa por el taladro central 37, el cual presenta un tono similar al resto de taladros de aspiración.

En la siguiente tabla se recoge el caudal que pasa por cada agujero, promediando los valores de velocidad de flujo de los elementos que hay en ellos y multiplicando por el área de los mismos.

**Tabla 13.** Caudales de aspiración de cada agujero.

Agujero	Caudal (l/min)						
1	27.19	11	27.86	21	27.27	31	28.76
2	27.07	12	27.29	22	27.11	32	28.82
3	27.24	13	27.90	23	27.15	33	27.70
4	27.91	14	27.35	24	27.27	34	27.54
5	27.48	15	27.41	25	27.85	35	27.63
6	27.91	16	27.58	26	27.53	36	27.67
7	27.40	17	27.39	27	27.88	37	27.56
8	27.52	18	27.98	28	27.28		
9	27.52	19	27.53	29	28.70		
10	27.36	20	27.98	30	28.72	Total	<b>1023.30</b>

Como se puede comprobar, hay una diferencia de **1.75 l/min** entre la toma de mayor caudal de aspiración (32) y la de menor caudal de aspiración (2). Si se hace el sumatorio de los caudales, se tiene que el sistema pierde **6.7 l/min** debido a fenómenos turbulentos del flujo de fluido compresible.

Con una pequeña modificación en la geometría y la adición de un divisor de flujo relativamente simple, se consigue una mejora en la capacidad de succión del conjunto, aumentando el rendimiento del mismo.

## 9. Líneas futuras.

Existen una serie de puntos a mejorar en caso de continuar este proyecto:

- El programa de CAD/CAE NX Unigraphics ha sido ejecutado en un ordenador portátil relativamente capaz, sin embargo, la finura del mallado se ha visto comprometida en relación a unos tiempos de cálculo razonables. Con ordenador específicamente concebido a la simulación los resultados podrían haber sido presumiblemente más precisos.
- El proceso de construcción del prototipo de la mesa resultante proporcionaría una valiosa experiencia práctica y su inclusión en el presente proyecto complementaría al marco teórico del proceso de iteración del mismo.
- Con la realización del punto anterior, se podrían comparar los resultados reales en funcionamiento y los esperados en diseño, pudiendo realizar las modificaciones que fuesen oportunas.
- Una elección de una tipología de fabricación diferente que permita una mayor polivalencia geométrica (como la impresión 3D) podría traducirse en un diseño más eficiente.

## 10. Análisis económico.

Para realizar el análisis económico del proyecto se han tenido en cuenta los costes de cuatro partes diferentes: Recursos humanos, software, hardware y consumo eléctrico.

Hay que tener en cuenta que el coste asociado a cada fase del proceso varía. Así pues, se contempla el tiempo dedicado a la recopilación de información, el aprendizaje de software, el procesamiento (mallado y configuración de los parámetros de simulación), el post-procesamiento y la redacción de toda la documentación.

La parte de recursos humanos engloba los costes relacionados con el personal que ha intervenido en el proyecto, que básicamente lo constituye el autor del mismo. Los compañeros de trabajo de la empresa INREMA S.L. involucrados en este proyecto en concreto no se han de

incluir en el análisis económico de este trabajo, pues no han realizado labores de búsqueda de información, cálculo, redacción...

Tal y como indica las propiedades de este documento de Word en concreto, el tiempo de edición de este ha sido de 13500 minutos. Se supone que ello también incluye el tiempo de simulación, puesto que, tanto para labores de cálculo como de búsqueda de información, el documento de Word ha estado abierto en modo edición de manera simultánea al software NX Unigraphics y al buscador de internet respectivamente. El coste del trabajo del ingeniero junior en su primer año se puede obtener dividiendo el salario anual bruto entre el número de horas laborales al año.

En lo que respecta a las licencias de software, anualmente el paquete office cuesta un total de 69 €/año, mientras que la licencia del programa NX Unigraphics es de 10.000 €/año aproximadamente. Posteriormente se calculará el coste de cada programa en el proyecto en función de su uso.

El ordenador personal tuvo un coste de 750 €, con una vida útil estimada de 6 años.

En cuanto al consumo eléctrico del ordenador personal, según el cargador del mismo, tiene un consumo de 148.3 Wh y el precio de la luz es de aproximadamente 0.112 €/kWh.

**Tabla 14.** Presupuesto.

RECURSOS HUMANOS	COSTE (€/H)	TIEMPO INVERTIDO (H)	TOTAL (€)
Labores de realización del TFM	11.11 (1)	225 (2)	2500
SOFTWARE	PRECIO AÑO (€)	TIEMPO INVERTIDO (H)	TOTAL (€)
Paquete Office	69	225	8.62 (4)
NX Unigraphics	10000	157.5 (3)	875
HARDWARE	PRECIO AÑO (€)	TIEMPO INVERTIDO (H)	TOTAL (€)
Ordenador personal	125 (5)	225	13.47
CONSUMO ELÉCTRICO	COSTE (€/KWH)	TIEMPO INVERTIDO (H)	TOTAL (€)
Ordenador personal	0.112	225	3.73 (6)
			<b>TOTAL (€)</b>
			<b>2934.11</b>

(1). Cálculo realizado dividiendo el actual salario bruto anual del autor (20000 €) entre el número de horas laborables de un año natural (1800 h).

(2). Cálculo realizado pasando a horas los 13500 minutos de edición del documento anteriormente citados.

(3). Estimación realizada suponiendo que se ha invertido un 70 % del tiempo total de edición del documento en labores de diseño y simulación.

(4). Cálculo realizado dividiendo el precio por año entre el número de horas laborables de un año natural (1800) y multiplicando el resultado por el tiempo invertido.

(5). Cálculo realizado dividiendo el coste del ordenador entre el período estimado de vida útil.

(6). Cálculo realizado multiplicando el coste del kilovatio hora por el tiempo invertido y por el consumo en kWh del ordenador (0.1483 kWh).

## 11. Conclusiones

A modo de conclusión se puede decir que la ingeniería asistida por ordenador es muy recomendable a nivel industrial, puesto que gracias al mismo se pueden determinar ciertos valores o características de un sistema que de otro modo sólo se podrían determinar experimentalmente, con el incremento de recursos que ello supone comparativamente hablando.

Para la industria relacionada con el dimensionamiento y cálculo de instalaciones que contemplen algún tipo de dinámica fluidos, el uso de herramientas CAE se antoja prácticamente imprescindible siempre y cuando se requiera un determinado flujo crítico, a priori desconociendo si el sistema o instalación objeto de trabajo es válida.

A nivel técnico se puede concluir que una herramienta solvente que integre todas las funcionalidades de CAD/CAE es lo más recomendable siempre que la exigencia no sea extremadamente específica. Al integrar en la misma herramienta todo lo necesario se ahorran costes, tiempos y se evitan fallos de migración de archivos.

## 12. Referencias

- [1] Placas de techo de THU; Disponible en web [<https://thu.es/product/bandeja-modena-t24/>]. Consultado el 05/04/2019.
- [2] MECÁNICA DE FLUIDOS: Flujo interno de fluidos incompresibles y compresibles; Disponible en web [[https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/20299/1/tema1\\_Flujo%20interno.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/20299/1/tema1_Flujo%20interno.pdf)]. Consultado el 02/04/2019.
- [3] Explicación de mecánica de fluidos computacional; Disponible en web [[https://en.wikipedia.org/wiki/Computational\\_fluid\\_dynamics#Reynolds-averaged\\_Navier%E2%80%93Stokes](https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics#Reynolds-averaged_Navier%E2%80%93Stokes)]. Consultado el 12/04/2019.
- [4] Explicación del modelo de cálculo K-Epsilon; Disponible en web [[https://en.wikipedia.org/wiki/K-epsilon\\_turbulence\\_model](https://en.wikipedia.org/wiki/K-epsilon_turbulence_model)]. Consultado el 05/05/2019.
- [5] Documento histórico acerca del desarrollo de las herramientas de cálculo CFD; Disponible en web [<https://www.osti.gov/servlets/purl/244662>]. Consultado el 07/05/2019.

- [6] Guía de buenas praxis para el modelado de análisis CFD; Disponible en web [<https://pronet.atkinsglobal.com/marnet/publications/bpg.pdf>]. Consultado el 12/05/2019.
- [7] Web de asistencia y consulta de análisis CFD; Disponible en web [<https://www.cfd-online.com/>]. Consultado el 16/05/2019.
- [8] Rubén Jacob D. Tesina de máster: “Establecimiento de metodologías para la realización de CFD mediante NX y planteamiento de propuestas de re-diseño en la carrocería del vehículo para la competición “SHELL ECO-MARATÓN 2010””. Universidad Politécnica de Valencia. Año 2010.
- [9] Web de asistencia y consulta de análisis CFD; Disponible en web [<https://fetchcfd.com/>]. Consultado el 21/05/2019.
- [10] Formulación y desarrollo de las ecuaciones de Navier-Stokes; Disponible en web [<https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/nseqs.html>]. Consultado el 10/05/2019.
- [11] Índices de principios aerodinámicos; Disponible en web [<https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/short.html>]. Consultado el 10/05/2019.
- [12] Web de asistencia y consulta de análisis CFD; Disponible en web [<http://www.bakker.org/>]. Consultado el 21/05/2019.
- [13] Alexandra Lisbeth Camaño Camaño. Tesina de máster: “Desarrollo de una metodología mediante CFD para el proceso de combustión en una bomba a volumen constante”. Universidad de Valladolid. Año 2016.
- [14] Guía de buenas praxis para el mallado de análisis CFD; Disponible en web [<http://help.autodesk.com/view/SCDSE/2015/ENU/?guid=GUID-BE8C3B02-3613-4237-AD18-033FE3002C34https://pronet.atkinsglobal.com/marnet/publications/bpg.pdf>]. Consultado el 30/05/2019.
- [15] Guía de buenas praxis para el mallado de análisis CFD; Disponible en web [[https://www.altairatc.com/india/previous-events/atc/2009/HTC09/FEM\\_04\\_Grid\\_Generation\\_Platform\\_For\\_CFD\\_CRL.pdfhttps://pronet.atkinsglobal.com/marnet/publications/bpg.pdf](https://www.altairatc.com/india/previous-events/atc/2009/HTC09/FEM_04_Grid_Generation_Platform_For_CFD_CRL.pdfhttps://pronet.atkinsglobal.com/marnet/publications/bpg.pdf)]. Consultado el 30/05/2019.
- [16] Samuel Gómez González. Tesina de máster: “Mallado y simulación CFD de automóvil”. Escola Tècnica superior d’Enginyeria Industrial de Barcelona. Año 2017.