

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ESTUDIO DE VENTILADOR CENTRÍFUGO PARA LA RESPIRACIÓN ARTIFICIAL MEDIANTE EL MODELADO EN CAD Y CÁLCULO DE FLUJO EN CFD

Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica
Curso 2020/2021



AUTOR

Korb, Alexey alkor@etsid.upv.es

TUTORES

Navarro García, Roberto ronagar1@mot.upv.es

Tiseira Izaguirre, Andrés Omar anti1@mot.upv.es

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO

13 de enero de 2022

Índice general

I	MEMORIA	1
1.	Planteamiento	2
1.1.	Antecedentes	2
1.2.	Justificación	3
1.3.	Objetivos	3
1.4.	Resumen	4
2.	Modelado del ventilador en CAD	5
2.1.	Introducción	5
2.2.	Escaneo 3D del ventilador	7
2.3.	Modelado en Fusion 360	10
2.3.1.	Tubos de entrada y salida	10
2.3.2.	Tapa superior	10
2.3.3.	Parte inferior	11
2.3.4.	Rotor	11
2.4.	Resumen	12
3.	Simulaciones en CFD	13
3.1.	Introducción	13
3.2.	Condiciones de contorno	14
3.3.	Modelos físicos	14
3.4.	Modelos de turbulencia	15
3.5.	Mallado	16
3.6.	Resultados	21
3.6.1.	Variables globales	21
3.7.	Resumen	22
4.	Análisis de resultados	24
4.1.	Representación de los resultados	24
4.1.1.	Representación gráfica	24
4.1.2.	Líneas de medición	27
4.2.	Explicación del origen de las diferencias	33
4.3.	Comparación entre estacionario y transitorio	39
4.4.	Resumen	40
5.	Conclusiones	41
II	PLANOS	43
III	PRESUPUESTOS	47
IV	PLIEGO DE CONDICIONES	50

Índice de figuras

1.1. Respirador mecánico <i>Evita4</i> de la marca <i>Dräger</i>	3
2.1. Ventilador montado	5
2.2. Piezas del ventilador desmontado	6
2.3. Configuración del sistema de escaneo 3D	7
2.4. Visualización de la tapa superior	8
2.5. Visualización de las piezas escaneadas en <i>Fusion 360</i>	9
2.6. Tubo de entrada y tubo de salida	10
2.7. Tapa superior	11
2.8. Parte inferior del ventilador	11
2.9. Rotor	12
3.1. Visualización de las configuraciones de las interfaces	14
3.2. Ecuaciones del modelo <i>K-Epsilon</i>	15
3.3. Mallado de la Configuración 1 con diferentes tamaños de celda en plano horizontal	17
3.4. Mallado de la Configuración 1 con diferentes tamaños de celda en plano vertical	18
3.5. Mallado de la Configuración 2 con diferentes tamaños de celda en plano horizontal	19
3.6. Mallado de la Configuración 2 con diferentes tamaños de celda en plano vertical	20
4.1. Velocidad en Configuración 1 para diferentes tamaños de malla	25
4.2. Velocidad en Configuración 2 para diferentes tamaños de malla	26
4.3. Localización de las líneas de medición	27
4.4. Velocidad en la línea de entrada	28
4.5. Velocidad en la línea de salida	29
4.6. Velocidad en la línea circular a la salida del rotor	30
4.6. Velocidad en la línea circular a la salida del rotor	31
4.7. Velocidad en la línea circular aguas abajo del rotor	32
4.8. Visualización de los cortes horizontales a 0.03 metros	34
4.9. Visualización de los cortes horizontales a 0.046 metros	35
4.10. Visualización de los cortes horizontales a 0.044 metros	36
4.11. Visualización de los cortes horizontales a 0.042 metros	37
4.12. Visualización de los cortes horizontales a 0.04 metros	38
5.1. Dimensiones del tubo de entrada y el tubo de salida	44

5.2. Dimensiones de la tapa superior	45
5.3. Dimensiones de la parte inferior	45
5.4. Dimensiones del rotor	46

Índice de tablas

3.1. Condiciones de mallado del ventilador	16
3.2. Número de celdas para diferentes mallas	16
3.3. Resultados de los ensayos de la Configuración 1	21
3.4. Resultados de los ensayos de la Configuración 2	22
3.5. Variaciones debido al refinamiento de malla de la Configuración 1 y 2	22
4.1. Resultados de los ensayos en Transitorio	39
4.2. Variaciones entre el Estacionario y Transitorio de la Configuración 1 y 2	39
5.1. Coste de licencias	48
5.2. Coste de equipos	48
5.3. Coste de personal	48
5.4. Coste del proyecto	49

Parte I

MEMORIA

Capítulo 1

Planteamiento

En este primer Capítulo se realizará la introducción a la memoria del presente Trabajo Final de Máster, explicando los antecedentes que inspiraron este trabajo, así como la justificación para la realización del proyecto. Además, se detallarán los objetivos que pretenden alcanzar, terminando con un breve resumen.

1.1. Antecedentes

Hace aproximadamente dos años el mundo quedó conmocionado. En marzo de 2020 se supo de la expansión global del coronavirus, lo que provocó restricciones de movimiento y la obligatoriedad de diferentes medidas preventivas. Lo que es más importante todavía, es que produjo y sigue produciendo, un gran número de infectados, los cuales pueden contraer la enfermedad en diferentes grados de gravedad. Los pacientes en estado más grave, a menudo, tienen que ser sometidos a la respiración artificial.

Dicha respiración artificial, o mecánica, es proporcionada por respiradores artificiales, los cuales son máquinas que ayudan o sustituyen a la ventilación pulmonar en personas con insuficiencia respiratoria, independientemente de si es crónica o aguda. El gas que proporciona suele estar enriquecido con oxígeno, para mantener unos niveles arteriales de oxígeno y dióxido de carbono adecuados para el metabolismo celular.

El uso principal de los ventiladores se centra en pacientes que se encuentran en unidades de cuidados intensivos de los hospitales. Uno de esos ventiladores se puede ver en la Figura 1.1. No obstante, existen ventiladores portátiles para su uso en ambulancias y urgencias, además de su uso personal en domicilios. Por otra parte, los pacientes en estados más grave necesitan de un tratamiento invasivo, es decir, de la intubación a través de la tráquea, complicando su comunicación.



Figura 1.1: Respirador mecánico *Evita4* de la marca *Dräger*

1.2. Justificación

Existen diferentes problemas a la hora de emplear los respiradores mecánicos. El primero de ellos que se pudo observar fue la insuficiente cantidad de ventiladores disponibles durante el comienzo de la pandemia. Otro problema diferente es la presión inadecuada que pueden proporcionar los respiradores a la salida, lo que hace que la ayuda a respirar que proporcionan sea ineficiente, e incluso pueda provocar daños en el tejido pulmonar.

Por este motivo, un diseño adecuado del compresor del respirador mecánico es fundamental para el correcto funcionamiento del mismo, produciendo una presión y un volumen de aire adecuado, el cual podría incluso proporcionar el aire necesario a varios respiradores. Concretamente, en este trabajo se va a explorar un diseño de un ventilador centrífugo para la respiración artificial.

1.3. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es aplicar una metodología de diseño mediante el uso de programas CAD, para conseguir el modelo de un ventilador centrífugo comercial y, posteriormente, utilizarlo con el objetivo de realizar ensayos de flujo mediante CFD.

Durante el desarrollo de la parte del trabajo relacionada con la obtención del modelo digital de ventilador centrífugo, se ha recurrido al uso de herramientas de medición simples, como la regla y el pie de rey, lo que ha producido una necesidad de adoptar algunas simplificaciones geométricas que no serían relevantes en el estudio de flujo posterior. No obstante, para poder conseguir una mejor precisión en el modelo, se ha recurrido al escaneo 3D del mismo, lo cual ha permitido confirmar algunas de las mediciones obtenidas a mano y obtener otras que no eran posibles de obtener con la regla y el pie de rey.

Posteriormente, utilizando un programa de simulación computacional de fluidos (CFD), se ensaya el modelo obtenido con diferentes configuraciones. Los detalles de estas simulaciones se expondrán a lo largo del trabajo.

1.4. Resumen

En pocas palabras, el trabajo consiste en, primeramente, modelar un ventilador real, mediante el uso de herramientas de escaneo 3D y programas CAD, con detalle pero con algunas simplificaciones.

Más adelante, se utiliza el programa de ensayo de flujo de CFD denominado Star CCM+ para ensayar el modelo.

Finalmente, se analizan los resultados de las simulaciones obtenidas.

Capítulo 2

Modelado del ventilador en CAD

En este Capítulo se realizará se explicará el proceso de modelado y digitalización de un ventilador real, disponible comercialmente, en un programa CAD, concretamente, el *Fusion360*. Se comentarán los pasos seguidos, las herramientas utilizadas y algunas simplificaciones aplicadas.

Contenidos

2.1. Introducción	5
2.2. Escaneo 3D del ventilador	7
2.3. Modelado en Fusion 360	10
2.3.1. Tubos de entrada y salida	10
2.3.2. Tapa superior	10
2.3.3. Parte inferior	11
2.3.4. Rotor	11
2.4. Resumen	12

2.1. Introducción

El ventilador centrífugo sin escobillas para sistemas de ventilación de la marca *Haoson*, que se ha utilizado en este trabajo, se puede observar en la Figura 2.1.



Figura 2.1: Ventilador montado

Si se desmonta completamente el ventilador, será posible distinguir cuatro piezas diferentes. Por un lado, se tiene la base, sobre la cual se monta el rotor del ventilador, sujetado por una arandela y una tuerca. Por otra parte, cuando el rotor está unido a la base, se cubren por una carcasa exterior, la cual se une a esta última por medio de seis tornillos. Todas las piezas se pueden ver en la Figura 2.2.



(a) Arandela y tuerca



(b) Rotor



(c) Parte Inferior



(d) Tapa Superior

Figura 2.2: Piezas del ventilador desmontado

2.2. Escaneo 3D del ventilador

Como se comentado anteriormente, se ha realizado un escaneo 3D del ventilador físico para posteriormente poder realizar comprobaciones de las medidas hechas a mano, así como obtener mediciones que eran complicadas o imposibles de hacer, debido a la compleja geometría de las piezas.

Para realizar el escaneo, se recurre al programa *EXScan Pro*, el cual recibe la información escaneada desde el dispositivo de escaneo llamado *EinScan Pro 2X Plus*, el cual es un escáner 3D profesional, fabricado por el gigante chino *Shining 3D*. El manual que se ha consultado para operar dicho programa se puede encontrar en [1] y [2]. Se basa en la tecnología de luz estructurada, es decir, puede reproducir el objeto de manera digital, a través de un proyector y dos cámaras, que vienen incorporadas en el propio dispositivo. Además para objetos más pequeños o con mayor detalle, existe una placa giratoria automatizada que ayuda a obtener un modelo digital con mejor detalle.

La configuración del escaneo de las piezas se puede observar en la Figura 2.3. Concretamente, se muestra el ordenador con el software de escaneo, donde se puede visualizar la pieza digitalizada. También se puede observar el dispositivo de escaneo junto a la pieza, colocada sobre la placa giratoria.

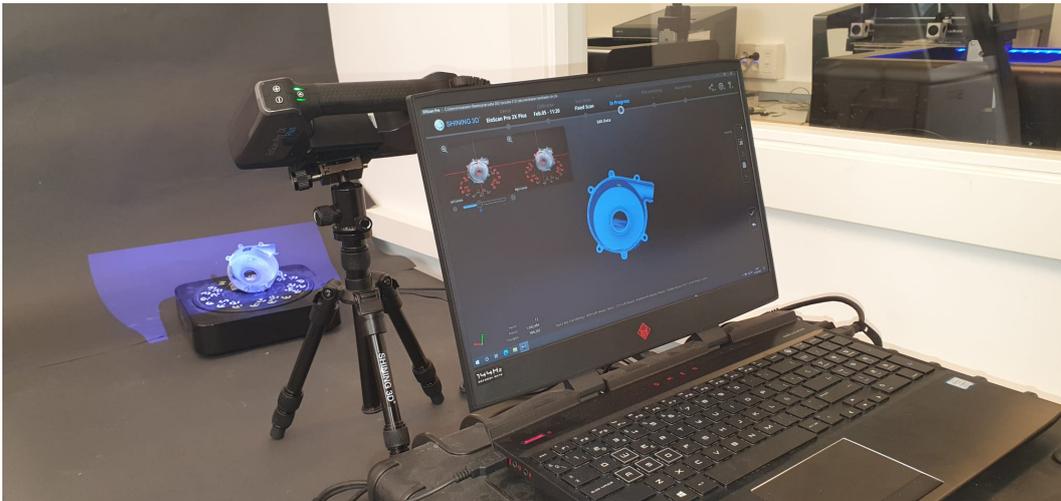


Figura 2.3: Configuración del sistema de escaneo 3D

Cabe mencionar, que el sistema presenta una imperfección a la hora de escanear objetos transparentes o aquellos cuya superficie sea muy brillante bajo la luz del dispositivo. En este caso, las piezas eran negras y muy lisas, por lo que reflejaban mucho la luz. La solución a este problema consiste en pulverizar la superficie con polvo blanco, lo que a su vez reduce el brillo de la superficie y le da cierta rugosidad, lo que facilita la detección por el dispositivo de escaneo. Dicha diferencia entre las piezas se puede observar en la Figura 2.4.

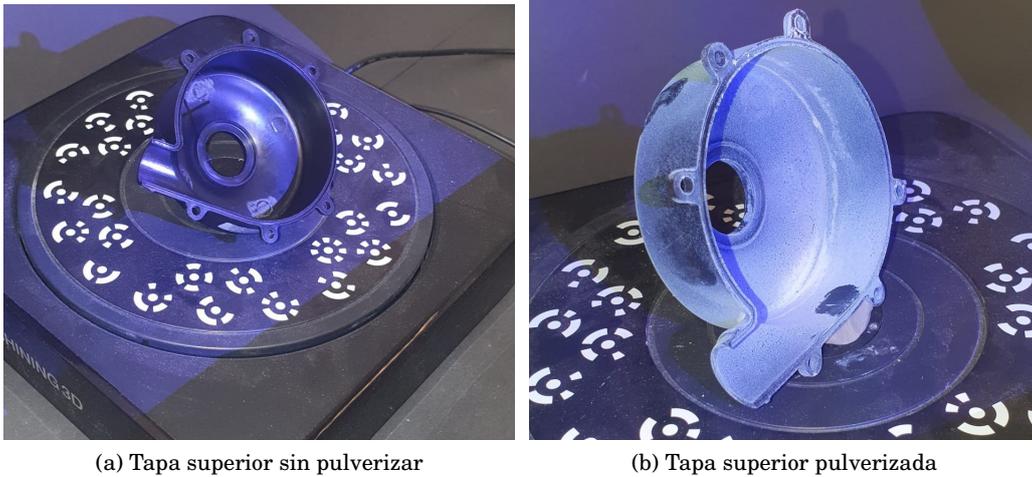


Figura 2.4: Visualización de la tapa superior

El proceso de pulverización y escaneo se repite para todas las partes del ventilador. La plataforma sobre la cual se colocan las piezas es giratoria. Se le puede indicar al programa que ángulo ha de girar la plataforma y, en cada giro, el dispositivo escanea la pieza, sirviéndose de los puntos blancos que están sobre la plataforma como referencia, generando así, un objeto digital tridimensional.

Una vez escaneadas, se puede elegir el detalle con el que el programa procesa la pieza, lo cual determina el tamaño final del archivo generado. Por otra parte, se puede elegir en que formato se guardará el archivo final de la pieza escaneada, dependiendo del software CAD, 3D, u otro, con el se quiera trabajar posteriormente. En este caso, se optó por el *3D Object* (.obj), el uso del cual es relativamente extendido.

Finalmente, los archivos generados se puede visualizar en el software 3D que se desee. En este caso se va a utilizar el *Fusion 360*. En la Figura 2.5 se muestra el resultado final de las piezas escaneadas.

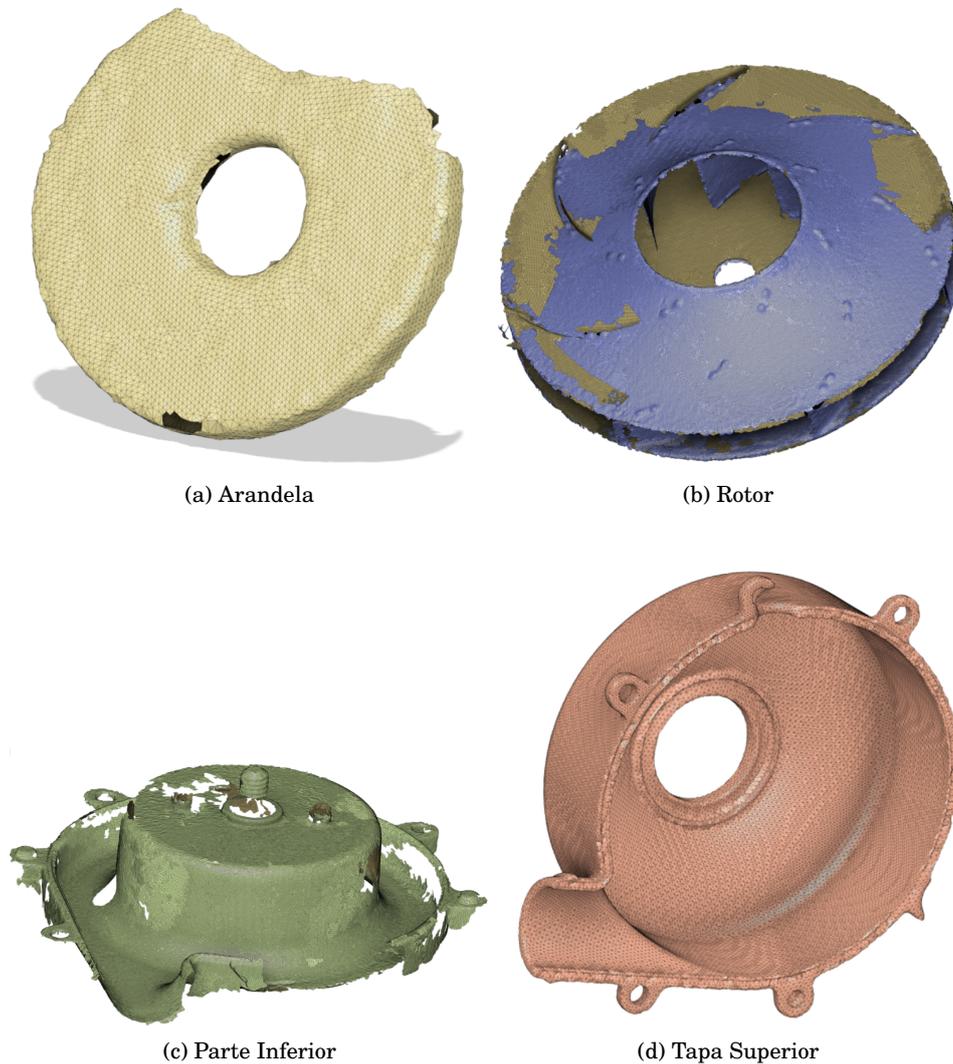


Figura 2.5: Visualización de las piezas escaneadas en *Fusion 360*

Como se puede observar, algunas de las piezas escaneadas presentan imperfecciones, lo cual es debido a que el escáner no ha sido capaz de capturar correctamente la superficie en algunas zonas, ya sea por la elevada reflexión de la superficie o a la insuficiente rugosidad de la misma. A pesar de estas imperfecciones, las piezas escaneadas han servido de apoyo al modelado de las piezas, el cual se detalla en la siguiente sección.

2.3. Modelado en Fusion 360

En este apartado se va a demostrar como se ha modelado el ventilador en el software CAD conocido como *Fusion 360*, instrucciones del cual se ha consultado en [3] y [7]. Se van a mostrar las partes modeladas, mientras que sus planos con sus dimensiones se muestran en la parte de Plano, dónde sus dimensiones aparecerán en milímetros.

2.3.1. Tubos de entrada y salida

Para comenzar, se tienen el tubo de entrada y el tubo de salida, que se pueden ver en la Figura 2.6. Estas partes del ventilador no existen en el ventilador real y sirven para que, posteriormente, a lo largo de las simulaciones en CFD, el flujo se pueda desarrollar dentro de ellas y no estar influenciado por las condiciones de contorno.

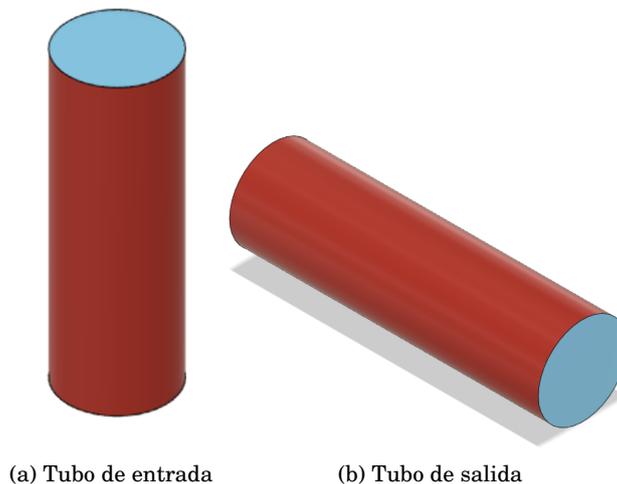


Figura 2.6: Tubo de entrada y tubo de salida

Cabe decir que la longitud estos tubos está relacionada con el radio de los mismos. Concretamente, la longitud de los tubos es como mínimo tres veces el diámetro de los mismos. Por otra parte, el diámetro de estos tubos coincide con el diámetro de los orificios de entrada y salida del ventilador.

2.3.2. Tapa superior

La siguiente parte del modelo que se explica es la tapa superior de la Figura 2.7. Es importante destacar que la parte modelada es distinta a la real por motivos sencillez a la hora de establecer interfaces entre la parte rotatoria y la estacionaria.

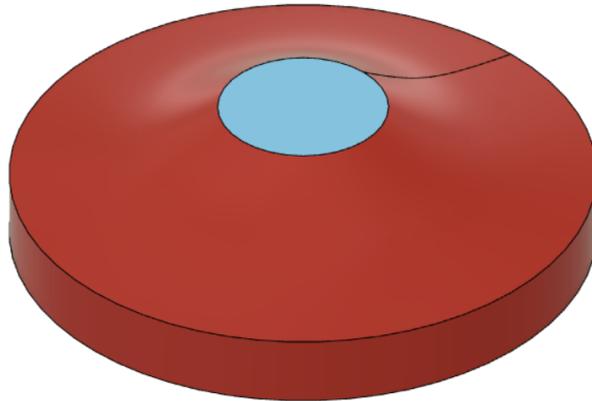


Figura 2.7: Tapa superior

2.3.3. Parte inferior

La penúltima parte a modelar es la parte inferior del ventilador, sobre la cual se sitúa el rotor y cuyo interior el flujo atraviesa una vez sale del mismo. Se muestra en la Figura 2.8.

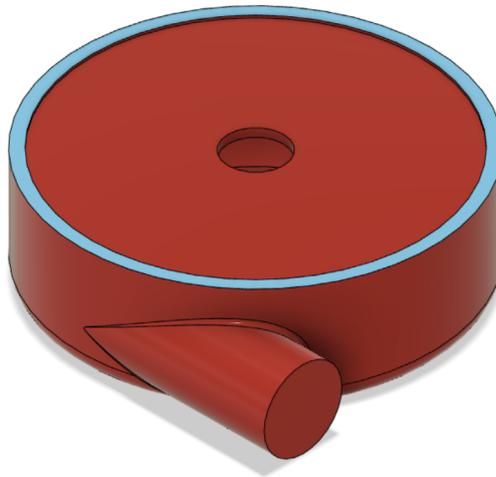


Figura 2.8: Parte inferior del ventilador

Como se puede observar, no se modela la parte sólida del aparato, sino solo aquella zona por la que puede circular el flujo.

2.3.4. Rotor

La última parte del modelo es el rotor, que iría alojado dentro de la tapa superior y colocado sobre el eje de la parte inferior, dentro de la cual estaría el motor que hace que éste gire. Se muestra en la Figura 2.9.

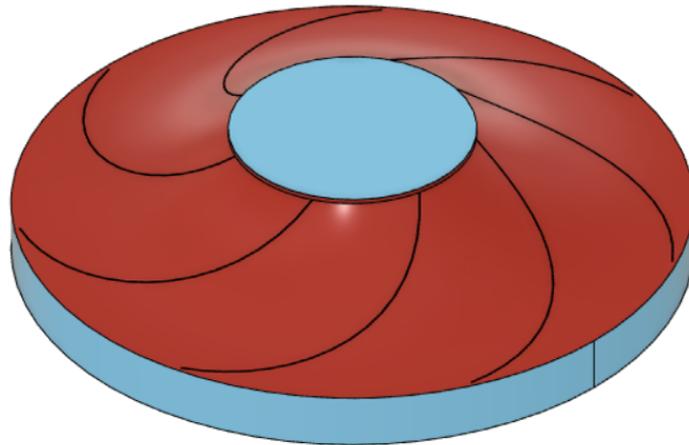


Figura 2.9: Rotor

Como se puede observar, lo que se modela no es el rotor propiamente dicho, sino el espacio que hay entre sus álabes, ya que es por ahí donde circulará el flujo.

2.4. Resumen

En resumen, en este Capítulo se ha explicado el modelado del ventilador real en el programa CAD *Fusion 360*. Para ello, se ha realizado un escaneo en 3D del modelo real, explicando el proceso, para poder realizar comprobaciones de medidas. Posteriormente, se ha explicado como se han modelado las diferentes partes del ventilador en el programa, mostrando además las dimensiones de dichas partes.

Capítulo 3

Simulaciones en CFD

En este Capítulo se van a explicar las diferentes simulaciones que se han realizado en el software de CFD *Star-CCM+*. Para este programa se ha consultado [4] y [5]. Concretamente, se van a mostrar diferentes configuraciones del modelo que se ha ensayado, los modelos físicos y de turbulencia elegidos y el proceso de independencia de malla.

Contenidos

3.1. Introducción	13
3.2. Condiciones de contorno	14
3.3. Modelos físicos	14
3.4. Modelos de turbulencia	15
3.5. Mallado	16
3.6. Resultados	21
3.6.1. Variables globales	21
3.7. Resumen	22

3.1. Introducción

En primer lugar, es necesario explicar las dos configuraciones del modelo que se han ensayado. La diferencia entre las configuraciones radica en la distinta localización de sus interfaces. Una interfaz es una zona de contacto entre regiones, a través de la cual se pueden transferir diferentes cantidades de solución. Masa, momento, energía y cualquier otra variable de simulación, no podrían pasar de una región a otra si no fuera por la interfaz.

En el modelo que se estudia, existe una región que rota, para la cual será necesaria definir una zona por donde entra el flujo y otro por la que sale. La primera configuración tiene las zonas de entrada y salida justo en el límite de la región que rota, mientras que la segunda, las tiene colocadas en una posición más alejada de la región rotatoria, aguas arriba para la zona de entrada y aguas abajo para la zona de salida.

El objetivo de estudiar y ensayar dos configuraciones de interfaces es ver las diferencias que generan en los resultados, para luego poder discutir cual de las dos es mejor.

La disposición de las interfaces se puede ver en la Figura 3.1, en la cual se muestra un corte vertical del modelo. La línea roja representa la interfaz 1, la de entrada y la azul, la 2, la de salida.

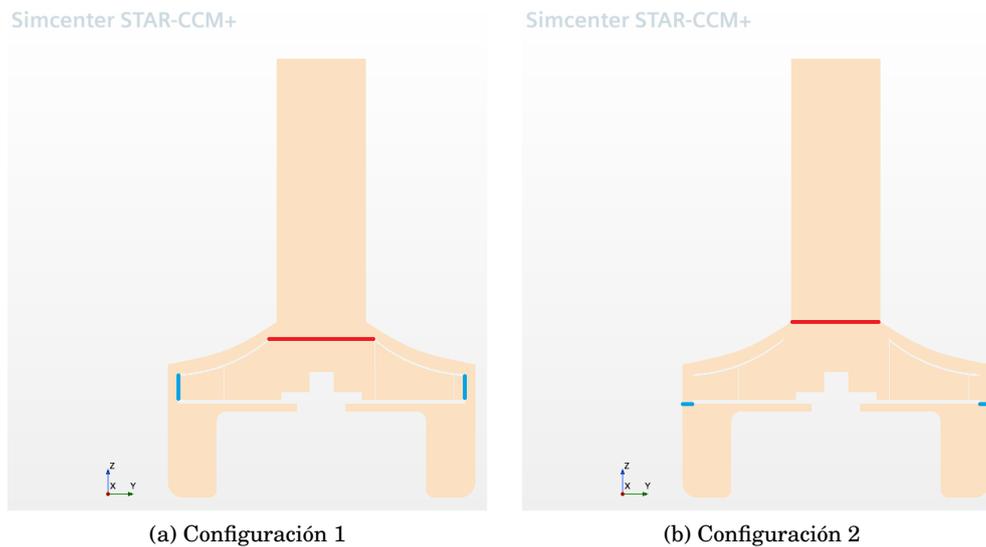


Figura 3.1: Visualización de las configuraciones de las interfaces

3.2. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno son iguales para las dos configuraciones de interfaces. En primer lugar, se definen las condiciones de contorno a la entrada del ventilador, utilizando la condición de *Velocity Inlet*, para la cual se introdujo una velocidad de $14 \frac{m}{s}$, lo cual corresponde a un caudal de aproximadamente $300 \frac{L}{min}$. El resto de valores de la condición se dejaron por defecto. Dicho caudal corresponde a un valor intermedio en el rango de funcionamiento del ventilador real.

En cuanto a la salida, se impone la condición de contorno de *Pressure Outlet*, para la cual se define la presión estática de cero pascales, dejando el resto de campos inalterados. Por otra parte, cabe mencionar el rotor, para el se establece una velocidad de rotación de $28000 \frac{rev}{min}$. Este es un valor de funcionamiento que se podría observar en el ventilador real.

3.3. Modelos físicos

Tras establecer las condiciones de contorno, se eligen los modelos físicos adecuados para representar de una manera correcta el flujo dentro del ventilador. Se han escogido los siguientes modelos:

- Gas ideal
- Tridimensional
- Estacionario

- Turbulento
- *Reynolds Averaged Navier-Stokes*
- *Segregated Flow*
- *Segregated Fluid Enthalpy*
- *K-Epsilon Turbulence*

En cuanto a los modelos elegidos, cabe explicar los motivos de selección para algunos de ellos. En primer lugar, se ha elegido el régimen estacionario en lugar de uno transitorio, a pesar de que el ventilador tiene un parte rotatoria. Esto se consigue utilizando un marco de referencia móvil para simular la rotación. La diferencia entre el régimen estacionario y el transitorio sobre los resultados se analizará posteriormente, al hacer simulaciones con régimen transitorio.

Otro aspecto a resaltar, es la elección del modelo *Segregated Fluid Enthalpy*, el cual resuelve la ecuación de la energía. Dicho modelo no es estrictamente necesario para la simulación, pero resulta útil para comprobar si existen variaciones de temperatura en la simulación y, si son apreciables o no.

3.4. Modelos de turbulencia

El modelo de turbulencia que se ha elegido es *Reynolds Averaged Navier-Stokes*. Los modelos RANS consisten en promediar las ecuaciones del fluido, es decir, las ecuaciones de Navier-Stokes, sustituyendo todas las magnitudes por la suma de su valor promedio y la componente fluctuacional. Tras reformular las ecuaciones de Navier-Stokes en términos de variables promediadas, se tiene un nuevo sistema de ecuaciones con un término adicional, para el cual hacen falta otras ecuaciones para poder cerrar el sistema. La complejidad el cierre del sistema radica en la elección de ecuaciones para representar el tensor τ_{ij} , en el cual se incluyen las tensiones turbulentas.

Para modelar el tensor τ_{ij} existen diversos modelos y, el que se ha usado en este trabajo es el modelo *K-Epsilon*, utilizado en trabajos de investigación similares donde existe un rotor en un espacio cerrado, como el de [6]. El modelo de turbulencia *K-Epsilon* ($k-\epsilon$) es un modelo de dos ecuaciones, que sirve para cerrar las ecuaciones RANS. Este modelo predice la turbulencia mediante dos ecuaciones diferenciales en derivadas parciales para dos variables, k y ϵ , donde la primera es la variable de la energía cinética turbulenta y la segunda representa la tasa de disipación de energía cinética turbulenta. Ambas ecuaciones se muestran a continuación en la Figura 3.2.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \epsilon$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

Figura 3.2: Ecuaciones del modelo *K-Epsilon*

3.5. Mallado

En cuanto al mallado del modelo del ventilador, se busca obtener una malla adecuada. Esto quiere decir que malla tendrá que ser lo suficientemente refinada como para representar el comportamiento del flujo dentro del ventilador de una manera correcta y, a la vez no ser tan refinada como para exceder la capacidad del ordenador en el cual se simule. Cabe decir, que no se persigue representar el flujo de una manera completamente realista, sino acercarse a un resultado que sea representativo del flujo real.

El mallado se basa en discretizar el espacio que ocupa un volumen en el que se pretende estudiar el y, con esa discretización, calcular diferentes variables por aproximación numérica sobre él. La operación del mallado requiere realizar un estudio de independencia de malla, es decir, comprobar que un refinamiento de malla no cambie de manera significativa los resultados. A continuación, en la Tabla 3.1, se puede ver las condiciones de mallado para los dos configuraciones de interfaces, con mallas de 4, 1 y 0.4 milímetros.

		Malla 4 mm	Malla 1 mm	Malla 0.4 mm
Target Surface Size	m	0.00400	0.00100	0.00040
Minimum Surface Size	m	0.00050	0.00010	0.00010
Surface Growth Rate	–	1.20000	1.20000	1.20000
Number of Prism Layers	–	5.00000	5.00000	5.00000
Prism Layer Stretching	–	1.30000	1.30000	1.30000
Prism Layer Total Thickness	m	0.00015	0.00015	0.00015

Tabla 3.1: Condiciones de mallado del ventilador

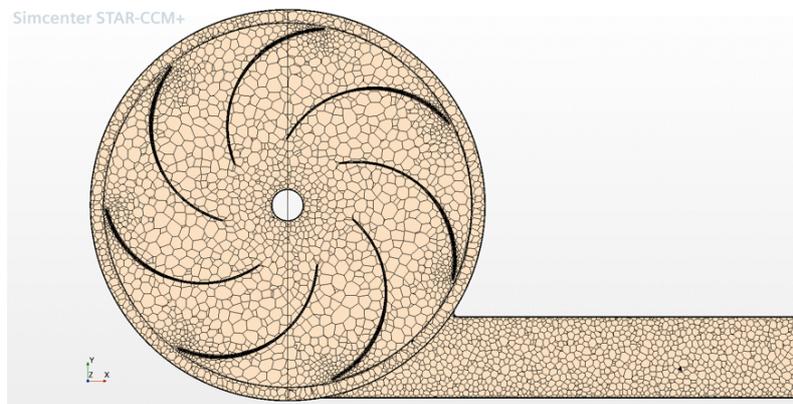
Uno de los resultados más relevantes al mallar con las mallas anteriormente mencionadas es el número de celdas que generan, ya que es un factor en el propio proceso de simulación, limitado por la memoria disponible. El número de celdas generadas por cada malla y por cada tipo de interfaz se puede ver en la Tabla 3.2.

Tipo de Interfaz	Número de celdas		
	Malla 4 mm	Malla 1 mm	Malla 0.4 mm
Configuración 1	349541	1016754	3010586
Configuración 2	314419	1097593	2983789

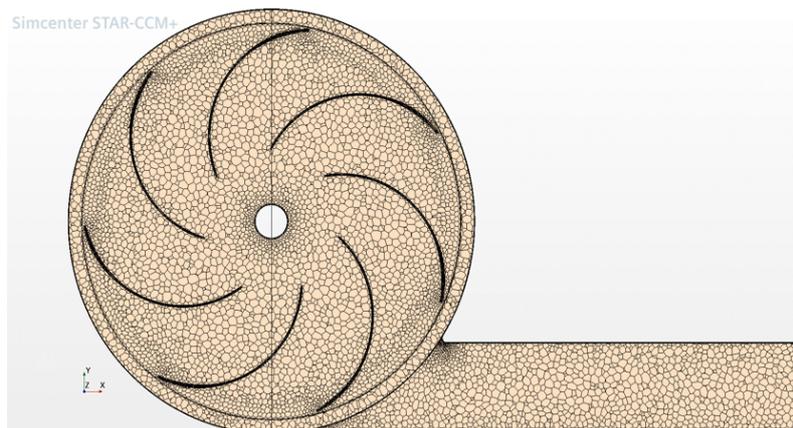
Tabla 3.2: Número de celdas para diferentes mallas

A la hora de realizar un estudio de independencia de malla, siempre se busca que el cambio del número de celdas entre una malla y otra esté alrededor de 3 o 4 veces, como una garantía de obtener cambios significativos. En este caso, la razón del incremento se sitúa en 2.9 y 2.96, al pasar de 4 a 1 milímetros y de 1 a 0.4 milímetros, respectivamente, para la Configuración 1. Para la Configuración 2, se tiene una razón de 3.5 y 2.7, para los mismos pasos.

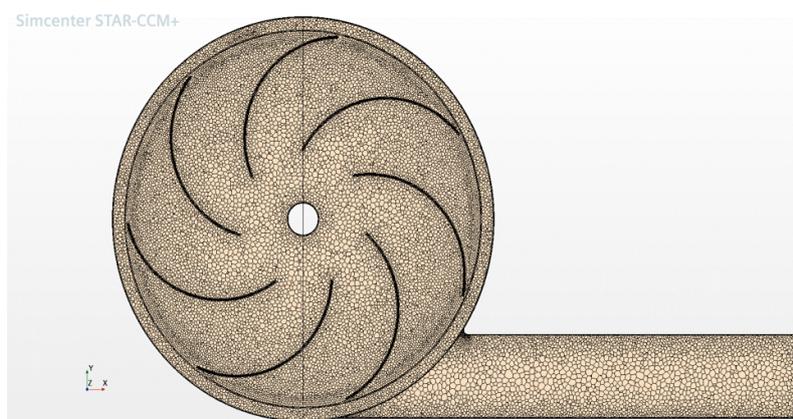
A continuación, se va a mostrar el detalle del mallado para cada caso de la malla. Concretamente, se mostrará un plano horizontal(en la Figura 3.3) de la malla y otro plano vertical(en la Figura 3.4).



(a) Horizontal 4 mm



(b) Horizontal 1 mm



(c) Horizontal 0.4 mm

Figura 3.3: Mallado de la Configuración 1 con diferentes tamaños de celda en plano horizontal

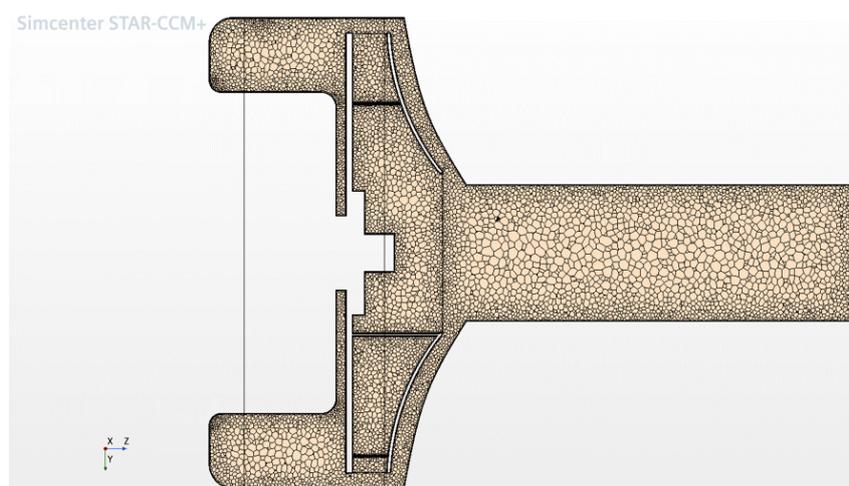
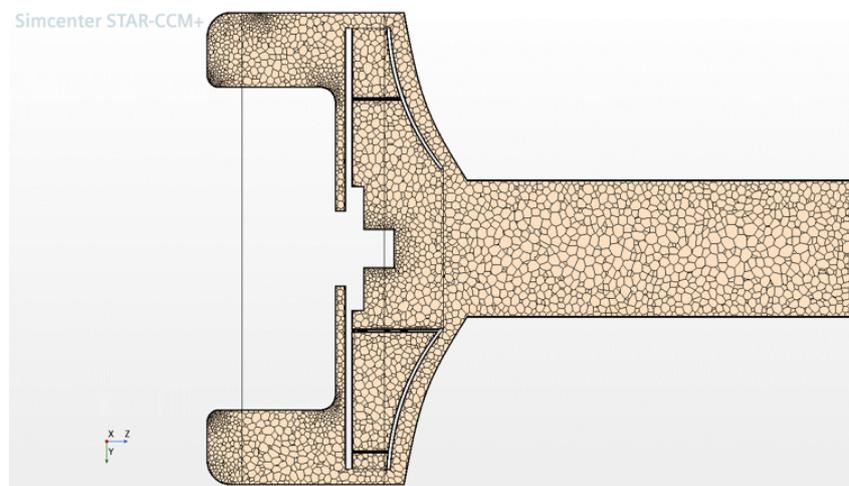
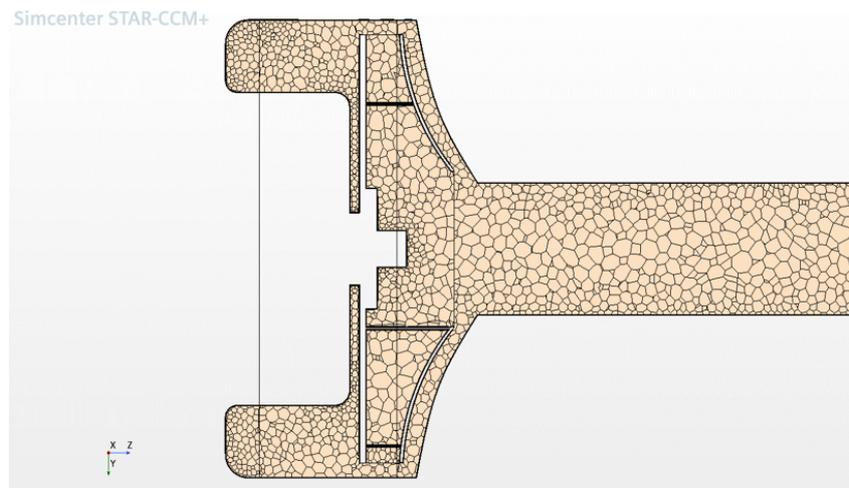
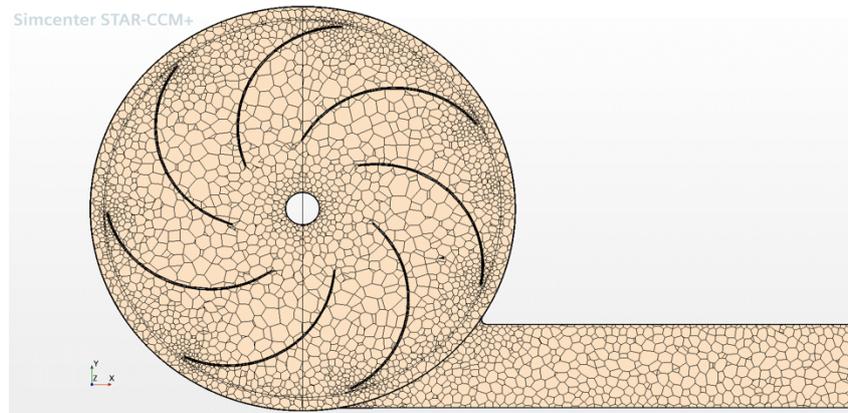
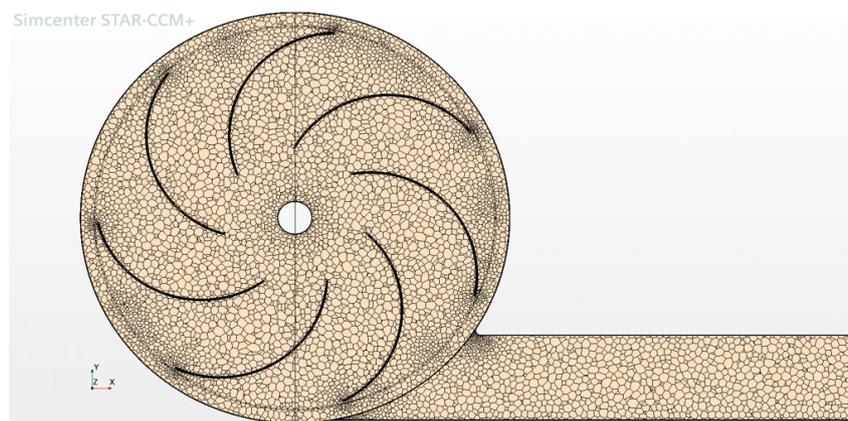


Figura 3.4: Mallado de la Configuración 1 con diferentes tamaños de celda en plano vertical

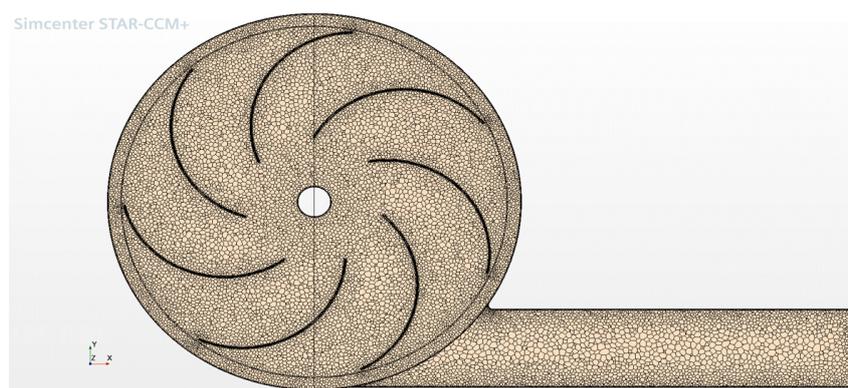
Por otro lado, el mallado de la Configuración 2 se puede ver en las siguientes imágenes, con los mismos planos, horizontal (en la Figura 3.5) y vertical (en la Figura 3.6).



(a) Horizontal 4 mm



(b) Horizontal 1 mm



(c) Horizontal 0.4 mm

Figura 3.5: Mallado de la Configuración 2 con diferentes tamaños de celda en plano horizontal

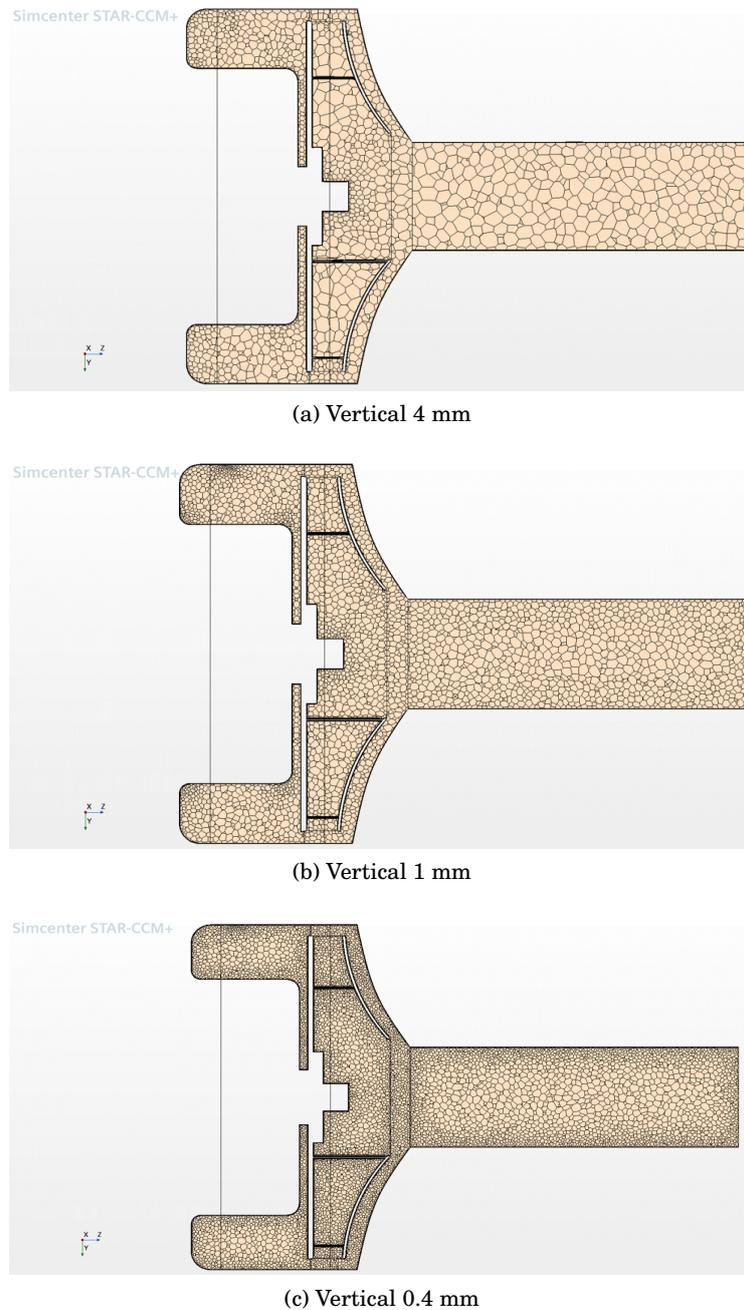


Figura 3.6: Mallado de la Configuración 2 con diferentes tamaños de celda en plano vertical

Para terminar este apartado, cabe decir que la malla, escogida como representativa del modelo para las dos configuraciones, es la de 0.4 milímetros. Esto se debe en parte a que esta malla se sitúa dentro del límite de la memoria RAM disponible en el ordenador en el que se simula, con un tiempo por iteración de simulación razonable, de 14 segundos aproximadamente.

Por otra parte, el cambio de los resultados en las variables globales es relativamente pequeño al bajar de 1 a 0.4 milímetros, manteniéndose por debajo del 3% en la mayoría de ellas. Dichos resultados se analizarán con más detalle en la siguiente sección.

3.6. Resultados

En este apartado se van a mostrar los resultados que se han obtenido tras ensayar los dos configuraciones de interfaces del ventilador, en el programa de CFD Star CCM+. Se van a mostrar los resultados de las diferentes mallas para ver su influencia.

Como ya se ha indicado anteriormente, se mantiene una velocidad de entrada de $14 \frac{m}{s}$, lo que corresponde a un caudal de aproximadamente $300 \frac{L}{min}$. Asimismo, la velocidad de rotación del rotor de ventilador se establece en 28000 revoluciones por minuto. El objetivo de estos ensayos es determinar un tamaño de malla adecuado, así como visualizar las diferencias de flujo producidas por las configuraciones de interfaces.

Para representar adecuadamente los resultados de los ensayos se van a escoger unas magnitudes representativas, cuyo valor refleje el comportamiento del flujo. Concretamente, las magnitudes que se van a medir son: el flujo másico y la presión total absoluta en la entrada del ventilador, el flujo másico a través de las interfaces que se separan dos regiones, es decir, la región que rota y las que no y el flujo másico en la salida del ventilador. Además, se mostrarán el momento aplicado sobre el rotor y el incremento de presión a lo largo del ventilador.

3.6.1. Variables globales

En primer lugar, se tienen los resultados de las mallas de la Configuración 1, que se muestran en la Tabla 3.3.

		4 mm	1 mm	0.4 mm
Presión Total Absoluta	Pa	95424	95266	95331
Flujo Másico de Entrada	$\frac{kg}{s}$	-6.389	-6.395	-6.414
Flujo Másico de Salida		6.372	6.385	6.418
Flujo Másico Interfaz 1 Fluido		8.394	8.481	8.704
Flujo Másico Interfaz 1 Rotor		-8.394	-8.481	-8.704
Flujo Másico Interfaz 2 Fluido		-8.398	-8.457	-8.726
Flujo Másico Interfaz 2 Rotor		8.398	8.457	8.726
Momento en el Rotor		$N \cdot m$	-0.0214	-0.0214
Incremento de Presión	Pa	6330	6481	6423

Tabla 3.3: Resultados de los ensayos de la Configuración 1

En cuanto a los resultados de la tabla anterior, cabe hacer una aclaración acerca de los signos de los flujos másicos. En este caso, el signo negativo indica que el flujo está entrando en una región, y el positivo, indica que está saliendo. Concretamente, el flujo entra por la cara de entrada a la región del fluido, sale de la región del fluido para entrar a la región del rotor, sale de la región del rotor y vuelve a entrar a la región del fluido y, finalmente, sale por la cara de salida.

Del mismo modo, se muestran los resultados de los ensayos de la Configuración 2 en la Tabla 3.4.

		4 mm	1 mm	0.4 mm
Presión Total Absoluta	Pa	95259	95107	95165
Flujo Másico de Entrada	$\frac{kg}{m^2 \cdot s}$	-6.344	-6.405	-6.414
Flujo Másico de Salida		6.330	6.406	6.418
Flujo Másico Interfaz 1 Fluido		6.342	6.409	6.392
Flujo Másico Interfaz 1 Rotor		-6.342	-6.409	-6.392
Flujo Másico Interfaz 2 Fluido		-6.336	-6.408	-6.391
Flujo Másico Interfaz 2 Rotor		6.336	6.408	6.391
Momento en el Rotor		$N \cdot m$	-0.0207	-0.0215
Incremento de Presión	Pa	6508	6628	6566

Tabla 3.4: Resultados de los ensayos de la Configuración 2

Para demostrar que se ha alcanzado la independencia de malla, se va a calcular la variación entre las variables globales al pasar de una malla gruesa a otra más fina, para ambas configuraciones de interfaces. Dichas variaciones se muestran en la Tabla 3.5.

		Configuración 1		Configuración 2	
		4 a 1mm	1 a 0.4 mm	4 a 1mm	1 a 0.4 mm
Presión Total Absoluta	%	0.166	-0.073	0.159	0.060
Flujo Másico de Entrada	%	-0.093	0.133	-0.962	0.133
Flujo Másico de Salida	%	-0.205	0.239	-1.188	0.196
Flujo Másico Interfaz 1 Fluido	%	-1.037	2.091	-1.060	-0.264
Flujo Másico Interfaz 1 Rotor	%	-1.037	2.091	-1.060	-0.264
Flujo Másico Interfaz 2 Fluido	%	-0.717	2.586	-1.138	-0.264
Flujo Másico Interfaz 2 Rotor	%	-0.717	2.586	-1.138	-0.264
Momento en el Rotor	%	-0.082	4.162	-4.038	-0.139
Incremento de Presión	%	-2.385	0.410	-1.842	-0.934

Tabla 3.5: Variaciones debido al refinamiento de malla de la Configuración 1 y 2

Como se observar en los resultados de la tabla anterior, la variación de las magnitudes de la mayoría de las variables globales se sitúa alrededor del 1 o 2%, lo que indica que dicha variación no es significativa con el refinamiento de la malla. Por este motivo, es posible afirmar que se ha alcanzado la independencia de malla. Concretamente, se escoge la malla de 0.4 milímetros, porque es la que mayor precisión aporta, pero también sería posible coger una más gruesa como la de 1 milímetro u otra intermedia.

3.7. Resumen

En resumen, en este capítulo se ha explicado cómo se ha usado el programa de ensayo de flujo CFD. Se ha explicado las condiciones establecidas para las simulaciones, tanto de entrada como de salida, así como la velocidad de giro del rotor. También se han resumido los modelos físicos que se han utilizado, junto a la explicación del modelo de turbulencia empleado. Además, se ha explicado las dos configuraciones de

interfaces del modelo, incluyendo sus diferencias y su influencias en los resultados.

La independencia de malla se ha realizado utilizando tres mallas diferentes, estudiando su variación en su número de celdas, así como su influencia en los valores de las variables globales. Se ha podido comprobar que la variación en el número de celdas es adecuada y la variación de las variables globales es pequeña, por lo que se ha logrado la independencia de malla. Por otra parte, se han mostrado las diferentes mallas en los planos horizontal y vertical.

Capítulo 4

Análisis de resultados

En este Capítulo se va a realizar un análisis de los resultados de las dos configuraciones de interfaces del ventilador y se van a buscar los motivos por los cuales se observan diferencias entre ellas. Además, se van a comparar los resultados de las simulaciones hechas en régimen estacionario, con otras hechas en modos transitorio, con el fin comprobar y validar los resultados.

Contenidos

4.1. Representación de los resultados	24
4.1.1. Representación gráfica	24
4.1.2. Líneas de medición	27
4.2. Explicación del origen de las diferencias	33
4.3. Comparación entre estacionario y transitorio	39
4.4. Resumen	40

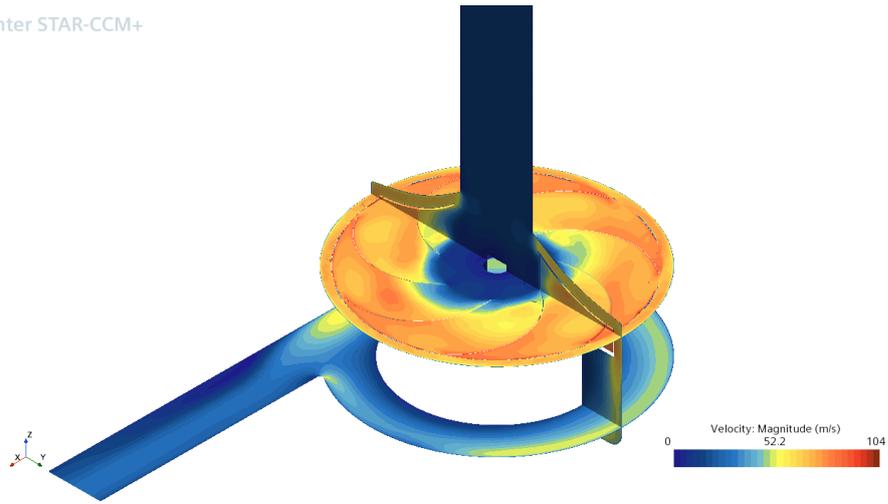
4.1. Representación de los resultados

En primer lugar, es necesario visualizar los resultados que se obtienen para ambas configuraciones. Esto se realiza de dos maneras que se pueden ver a continuación.

4.1.1. Representación gráfica

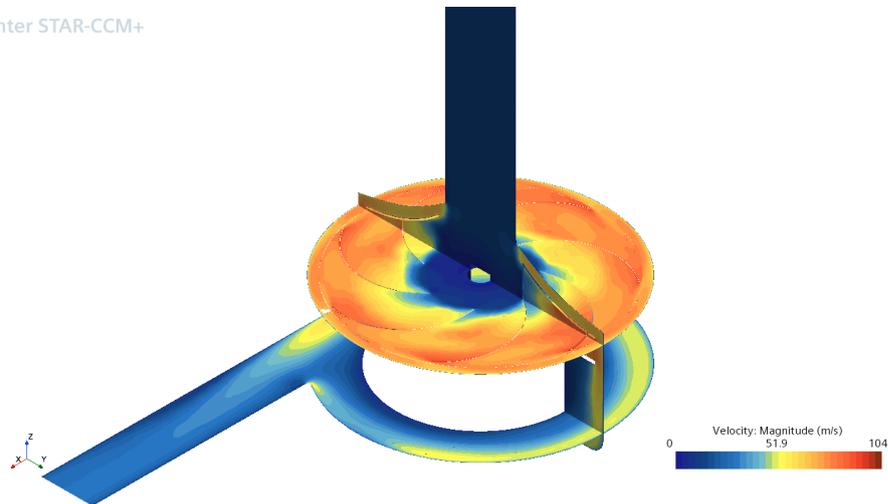
Una manera de visualizar los resultados es realizar una representación gráfica de alguna variable representativa sobre el modelo, para obtener una idea sobre como se comporta el flujo. A continuación se muestra la distribución de la velocidad para la Configuración 1 (en la Figura 4.1) y para la Configuración 2 (Figura 4.2), para diferentes tamaños de malla.

Simcenter STAR-CCM+



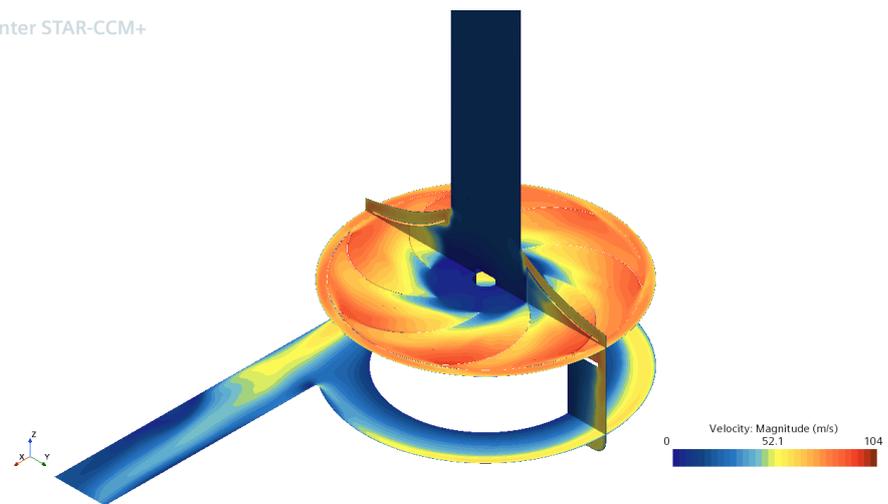
(a) Tamaño de malla 4 mm

Simcenter STAR-CCM+



(b) Tamaño de malla 1 mm

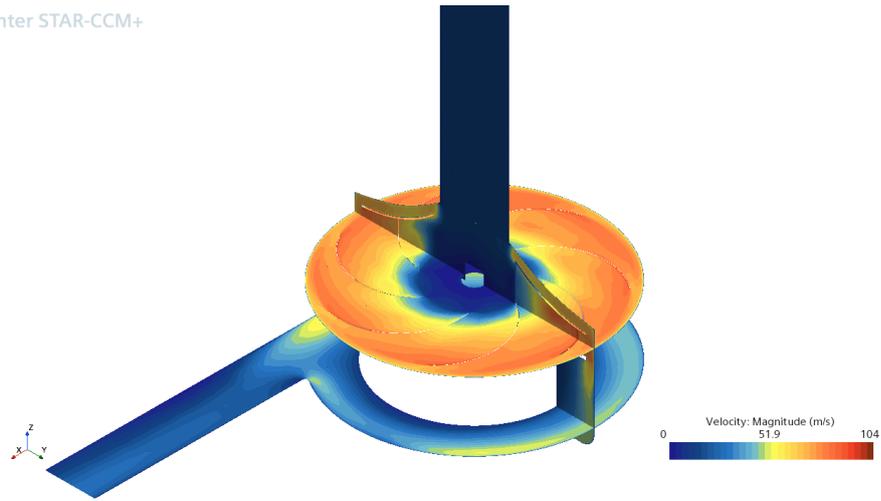
Simcenter STAR-CCM+



(c) Tamaño de malla 0.4 mm

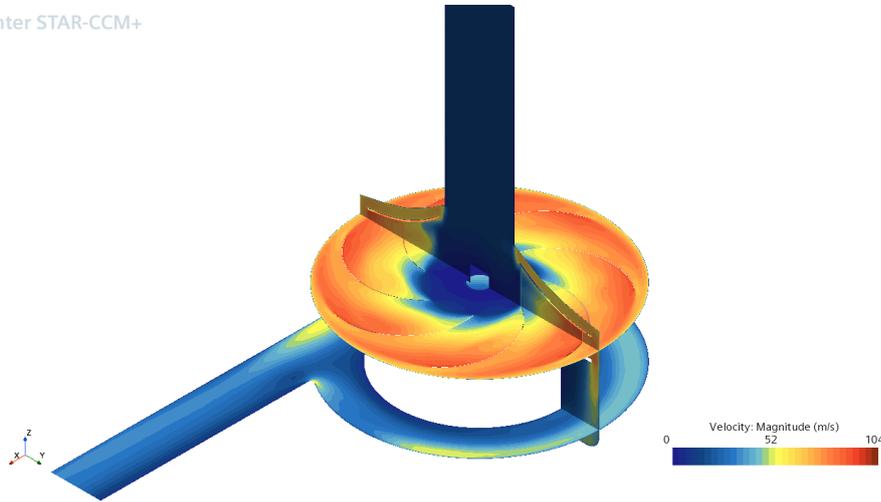
Figura 4.1: Velocidad en Configuración 1 para diferentes tamaños de malla

Simcenter STAR-CCM+



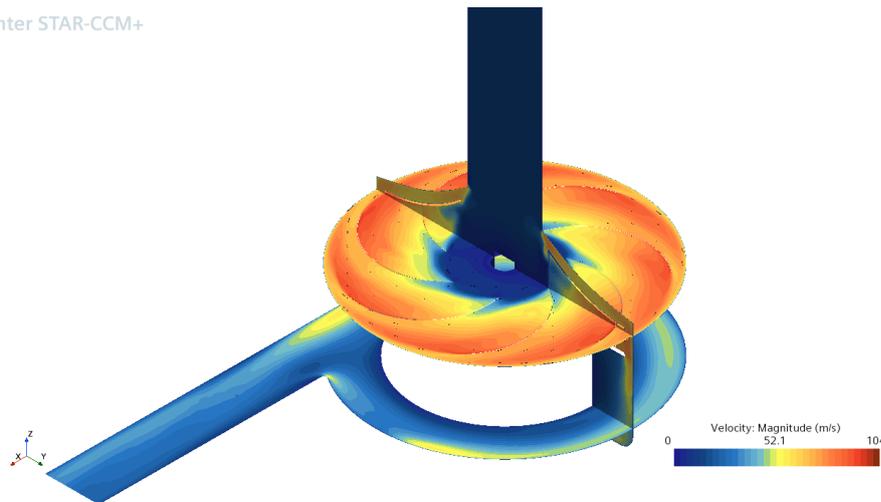
(a) Tamaño de malla 4 mm

Simcenter STAR-CCM+



(b) Tamaño de malla 1 mm

Simcenter STAR-CCM+



(c) Tamaño de malla 0.4 mm

Figura 4.2: Velocidad en Configuración 2 para diferentes tamaños de malla

A la vista de las representaciones anteriores, es posible extraer dos conclusiones. En primer lugar, dentro una misma configuración, al reducir el tamaño de malla, se puede observar que por una parte, el flujo se vuelve más simétrico en su paso por los siete álabes del rotor y, por otra parte, tarda ligeramente más en comenzar a acelerarse al pasar por la entrada de los álabes. Este hecho se puede justificar con el refinamiento de malla.

Otra tipo de diferencia que se observa es la que existe entre las dos configuraciones de interfaz. Si se coge la malla de 0.4 milímetros, se puede observar que la distribución del flujo es diferente, tanto en el plano vertical, como en los planos horizontales. Una de la diferencias que se percibe a primera vista, es que el flujo está más acelerado hacia la salida en la Configuración 1 que en la Configuración 2.

4.1.2. Líneas de medición

Otra manera de poder visualizar las diferencias en mayor detalle, es colocar diferentes líneas de medición en varios puntos del modelo. Concretamente, se colocan dos líneas rectas, una en el tubo de entrada del modelo, y otro en el tubo de salida. Además, se colocan dos líneas circulares, la primera de las cuales se sitúa justo a la salida del rotor y, la segunda, aguas abajo del rotor. La localización de dichas líneas de medición en el modelo, se muestra en la Figura 4.3.

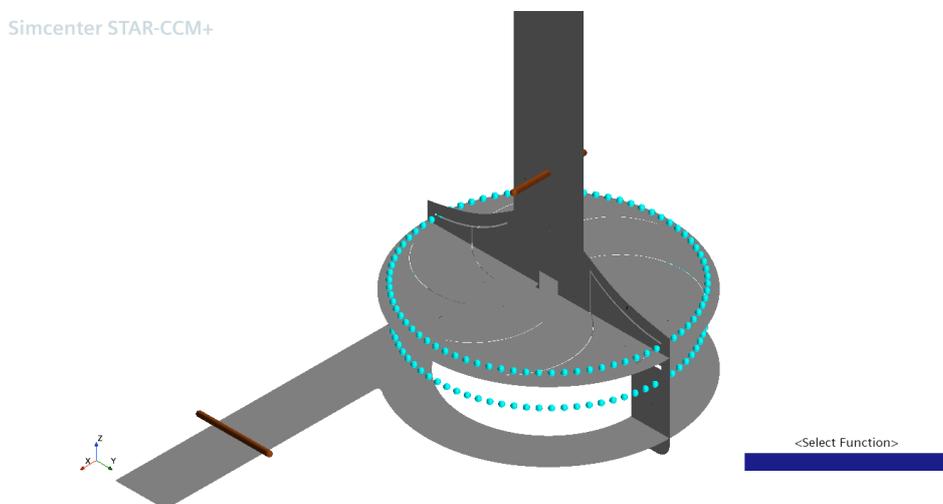
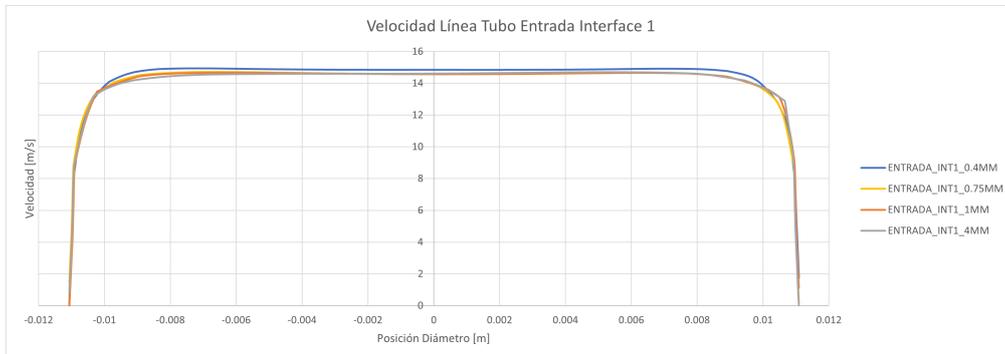


Figura 4.3: Localización de las líneas de medición

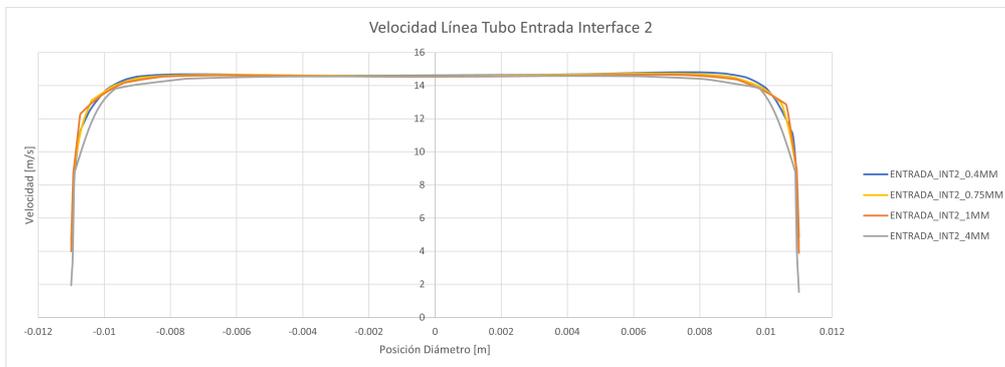
A partir de dichas líneas, se puede realizar todo tipo de mediciones. En este caso, se van a realizar mediciones del módulo de velocidad. Además, para estas mediciones se añade el modelo con una malla de 0.75 milímetros. Esto se hace para tener más puntos de referencia a la hora de hacer análisis y extraer conclusiones.

En primer lugar, se muestra la velocidad en la línea de entrada en la Figura 4.4. Primero, se muestra la velocidad de la Configuración 1, para diferentes tamaños de malla, luego para la Configuración 2 y, por último se compara la distribución en la

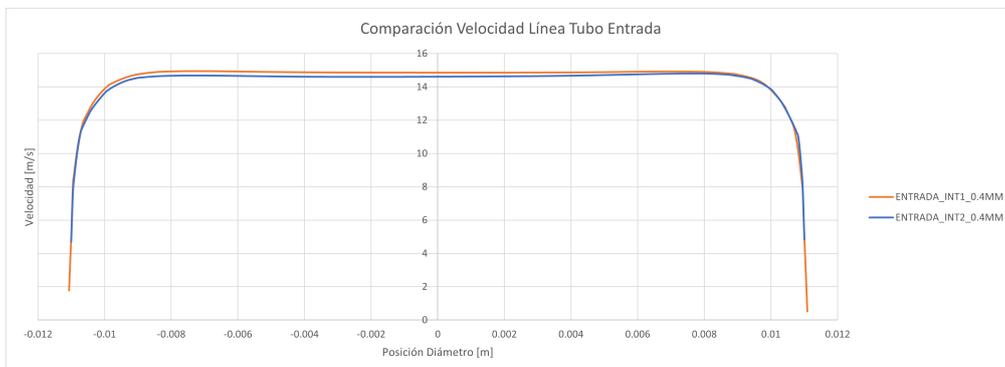
mallas de 0.4 milímetros de ambas configuraciones.



(a) Velocidad de línea de entrada de la Configuración 1



(b) Velocidad de línea de entrada de la Configuración 2



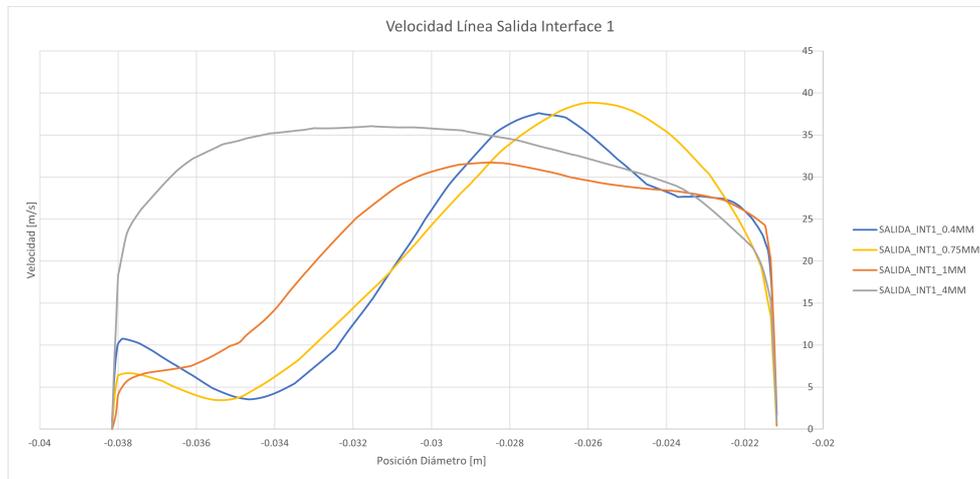
(c) Comparación de velocidad entre Configuración 1 y 2 de la malla de 0.4 milímetros

Figura 4.4: Velocidad en la línea de entrada

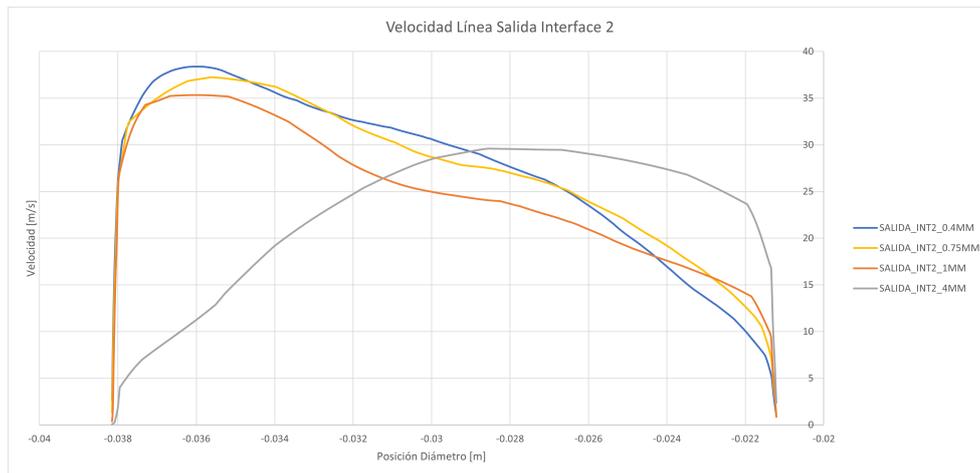
Como se puede observar en las gráficas anteriores, la variación de la velocidad entre tamaños de malla y configuraciones diferentes es muy pequeña, debido a que el flujo no ha sido afectado por ningún elemento del ventilador.

A continuación, se muestra la velocidad en la línea de salida en la Figura 4.5. Primero, se muestra la velocidad de la Configuración 1, para diferentes tamaños de malla, luego para la Configuración 2 y, por último se compara la distribución en la malla de

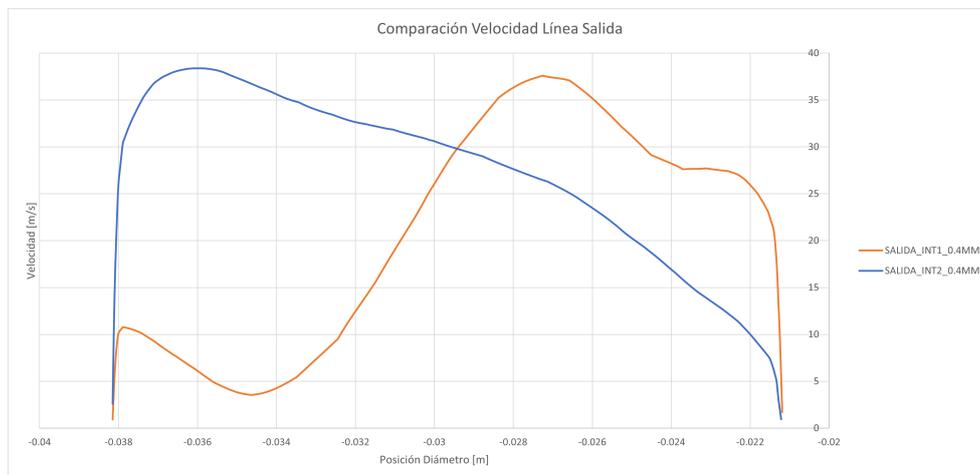
0.4 milímetros de ambas configuraciones.



(a) Velocidad de línea de salida de la Configuración 1



(b) Velocidad de línea de salida de la Configuración 2

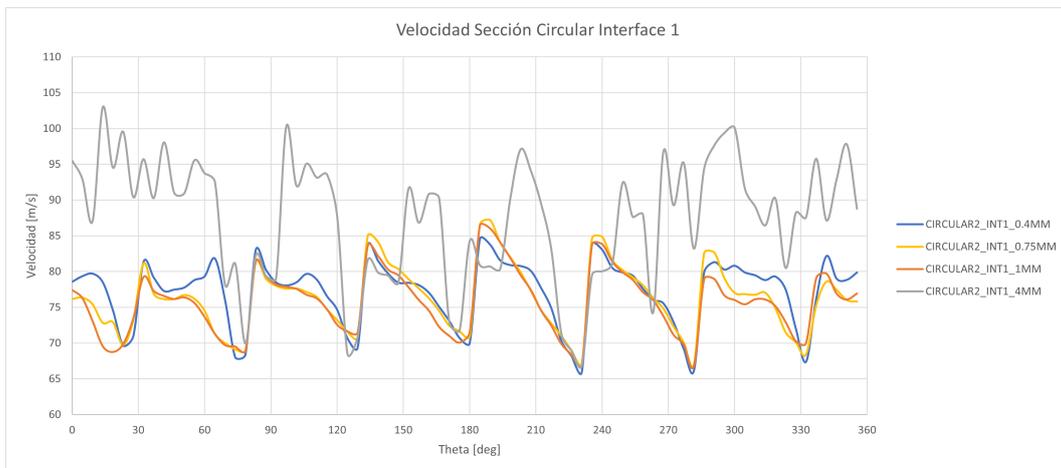


(c) Comparación de velocidad entre Configuración 1 y 2 de la malla de 0.4 milímetros

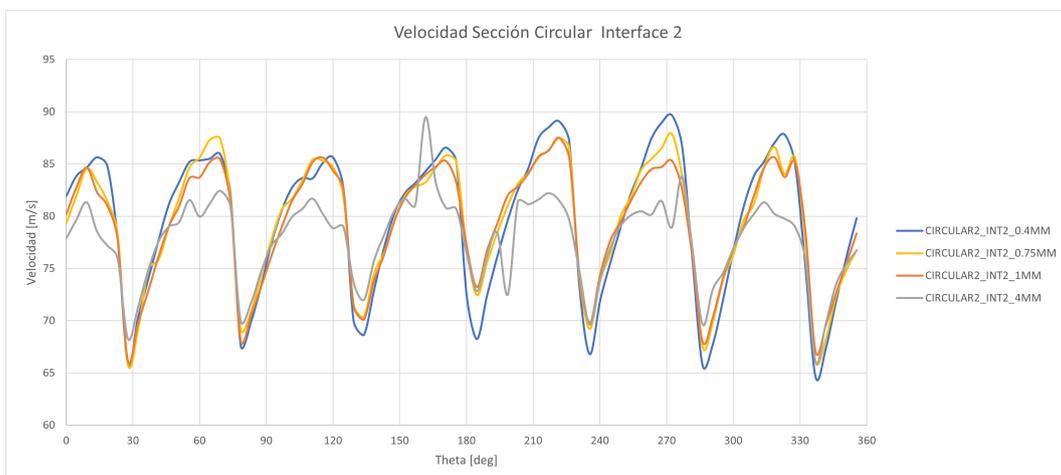
Figura 4.5: Velocidad en la línea de salida

Como se puede observar en las gráficas anteriores, la variación de la velocidad entre tamaños de malla y configuraciones diferentes es muy pequeña, con la excepción de la malla de 4 milímetros. Una posible explicación de este hecho es que la malla es demasiado gruesa por lo que se produce este fallo. Por otro lado, la variación entre configuraciones es obvia y su motivo se explorará con más detalle en el siguiente capítulo.

A continuación, se muestra la velocidad en la línea circular a la salida del rotor en la Figura 4.6. Primero, se muestra la velocidad de la Configuración 1, para diferentes tamaños de malla, luego para la Configuración 2 y, por último se compara la distribución en la malla de 0.4 milímetros de ambas configuraciones.

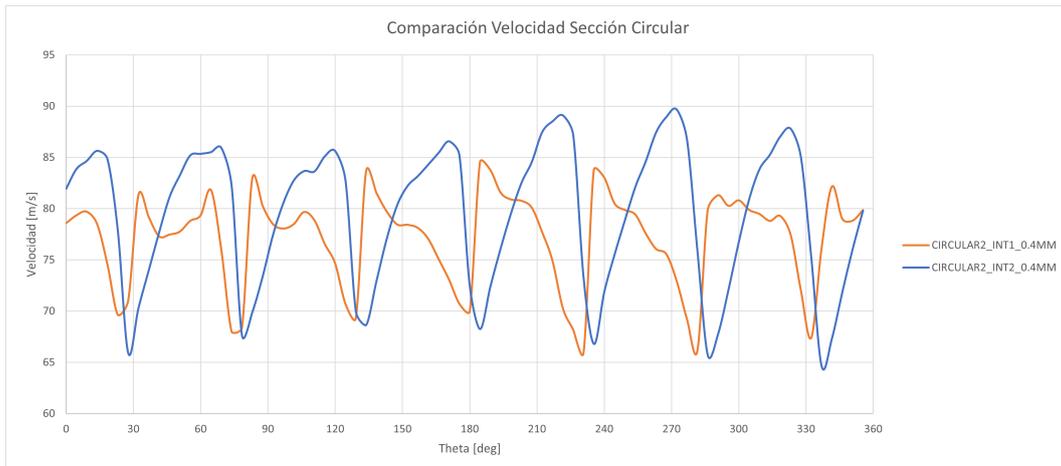


(a) Velocidad de la línea circular a la salida del rotor de la Configuración 1



(b) Velocidad de la línea circular a la salida del rotor de la Configuración 2

Figura 4.6: Velocidad en la línea circular a la salida del rotor



(c) Comparación de velocidad de la línea circular a la salida del rotor entre Configuración 1 y 2 de la malla de 0.4 milímetros

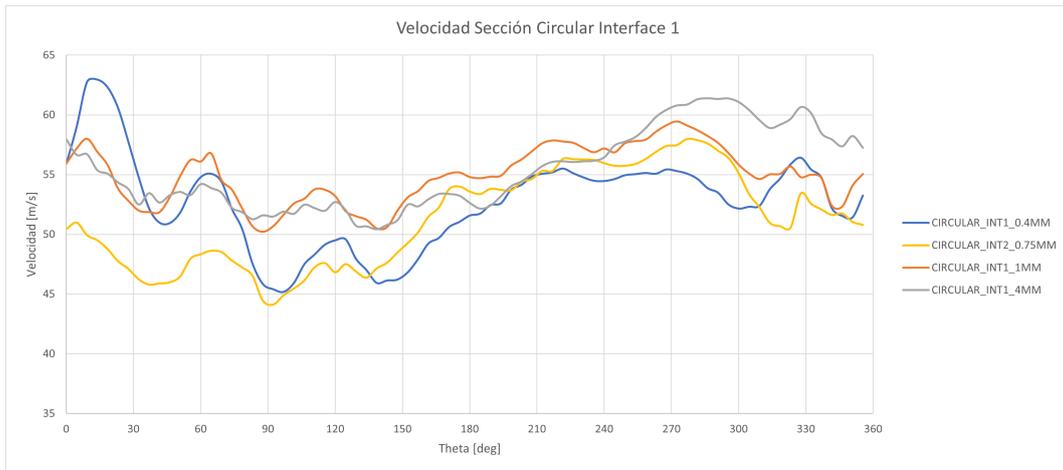
Figura 4.6: Velocidad en la línea circular a la salida del rotor

Como se puede observar en las gráficas anteriores, al igual que la velocidad de la línea de salida, la variación de la velocidad entre tamaños de malla, con la excepción de la malla de 4 milímetros. Una posible explicación de este hecho es que la malla es demasiado gruesa por lo que se produce este fallo. Por otro lado, la variación entre configuraciones es grande y su motivo se explorará con más detalle en el siguiente capítulo.

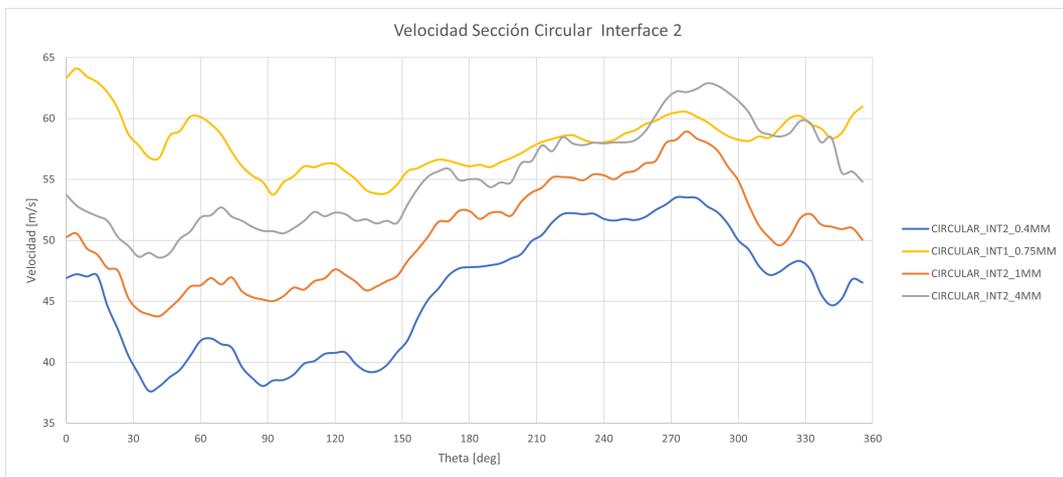
Por último, se muestra la velocidad en la línea circular que está aguas abajo del rotor en la Figura 4.7. Primero, se muestra la velocidad de la Configuración 1, para diferentes tamaños de malla, luego para la Configuración 2 y, por último se compara la distribución en la malla de 0.4 milímetros de ambas configuraciones.

Como se puede observar en las gráficas anteriores, existe una gran variación de velocidad entre las diferentes mallas, sobretodo en la Configuración 2. Un posible motivo de esta diferencia podría ser la elección de la zona de medición, la cual es muy susceptible a pequeños cambios y perturbaciones del flujo, ya que este paso de la dirección horizontal a la vertical. No obstante, se puede ver también que el perfil de velocidades mantiene una forma parecida en ambas configuraciones.

Del mismo, se puede apreciar una gran diferencia en los valores de la velocidad entre las dos configuraciones, aunque la forma del perfil de velocidades es similar. La diferencia en los valores puede ser debida a las perturbaciones del flujo producidas aguas arriba en el ventilador, tanto debido al giro del rotor, como al cambio del sentido del flujo, de horizontal a vertical.



(d) Velocidad de la línea circular aguas abajo del rotor de la Configuración 1



(e) Velocidad de la línea circular aguas abajo del rotor de la Configuración 2



(f) Comparación de velocidad de la línea circular aguas abajo del rotor entre Configuración 1 y 2 de la malla de 0.4 milímetros

Figura 4.7: Velocidad en la línea circular aguas abajo del rotor

4.2. Explicación del origen de las diferencias

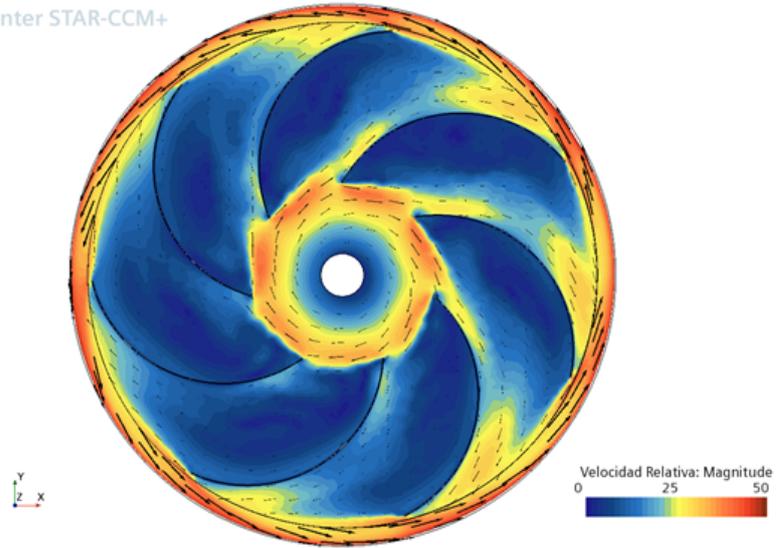
Para comenzar, es necesario ilustrar de manera clara que las dos configuraciones de interfaces que se tienen, presentan perfiles de flujo diferentes, tal y como se puede observar en la Figura 4.8.

Estos cortes se hacen a la altura de la línea de medición circular situada justo a la salida del rotor. Como se puede ver existen amplias diferencias en las dos configuraciones de interfaces. Concretamente, se pueden apreciar en el borde de ataque de los álabes, donde el flujo permanece más acelerado en la Configuración 1.

Por otra parte, en el borde de salida, el flujo presenta una mayor velocidad en la Configuración 2. La razón más probable de estas diferencias es la localización de las interfaces. Para poder estudiar su efecto, se harán más cortes horizontales aguas arriba del flujo para ver la posición en la que los flujos de ambas configuraciones comienzan a diferir.

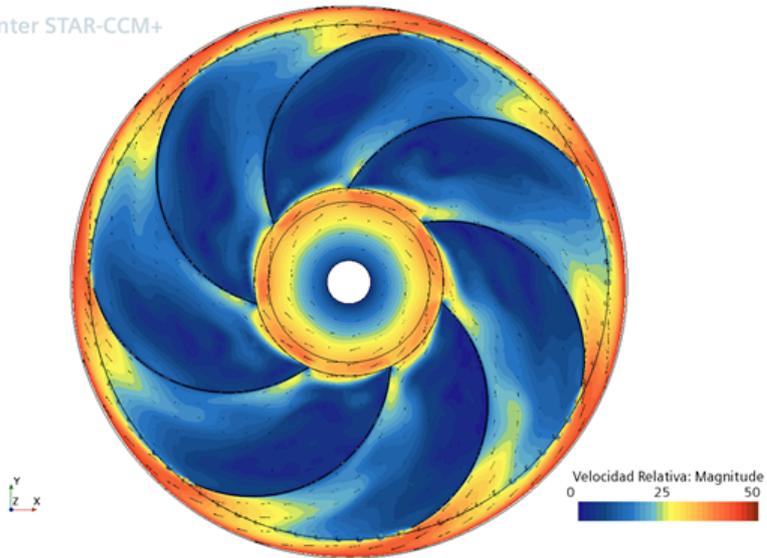
Para mostrar la evolución del flujo dentro del ventilador se muestran diferentes cortes horizontales a varias alturas. Concretamente se tienen planos de corte a 0.04, 0.042, 0.044 y 0.046 metros. En el plano 0.04 se tiene la interfaz de la Configuración 1 y en el plano 0.044, la de la Configuración 2.

Simcenter STAR-CCM+



(a) Configuración 1

Simcenter STAR-CCM+



(b) Configuración 2

Figura 4.8: Visualización de los cortes horizontales a 0.03 metros

Se comienza con el corte situado a 0.046 metros, que se puede ver en Figura 4.9. En este corte no se aprecian diferencias significativas entre las configuraciones y el flujo es concéntrico.

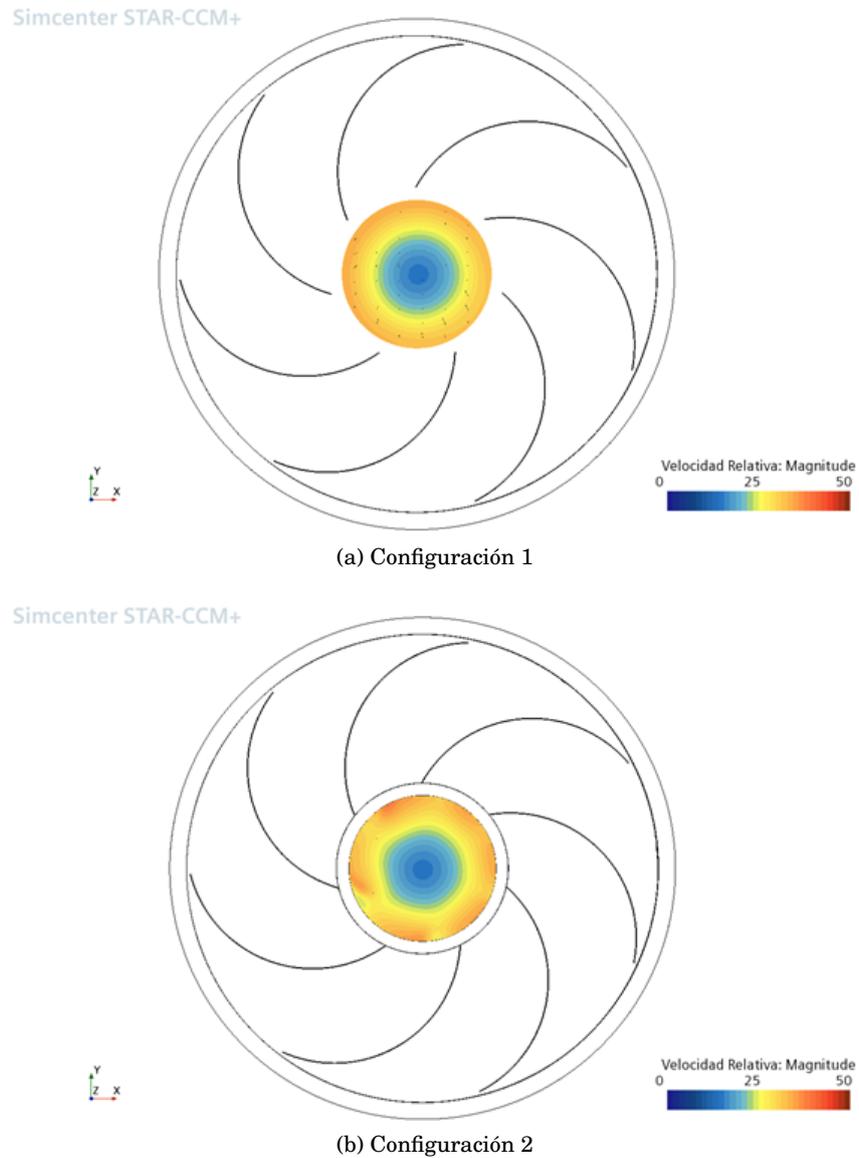


Figura 4.9: Visualización de los cortes horizontales a 0.046 metros

A continuación, en la figura Figura 4.10 se muestra el corte situado a 0.044 metros. En este caso es posible apreciar una clara diferencia entre las configuraciones. Mientras la primera configuración sigue siendo concéntrica, la segunda adquiere zonas donde el flujo está claramente acelerado y otras donde está frenado. Este hecho se puede explicar con la presencia de la interfaz en la Configuración 2, la cual es la responsable del cambio del comportamiento del flujo.

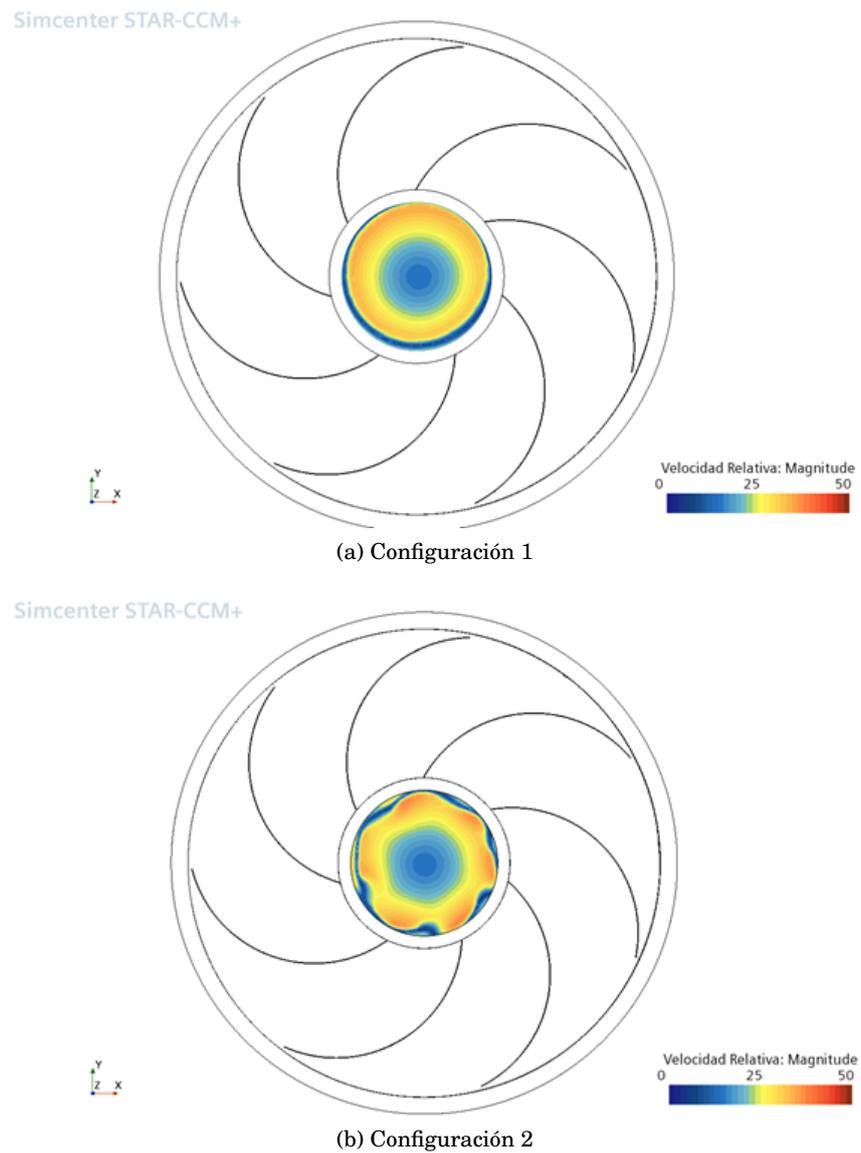


Figura 4.10: Visualización de los cortes horizontales a 0.044 metros

Más adelante, en el plano situado a 0.042 metros en la Figura 4.11, no se aprecian cambios en el flujo. En la Configuración 1 sigue siendo concéntrico y en la Configuración 2 presenta las mismas zonas aceleradas y deceleradas.

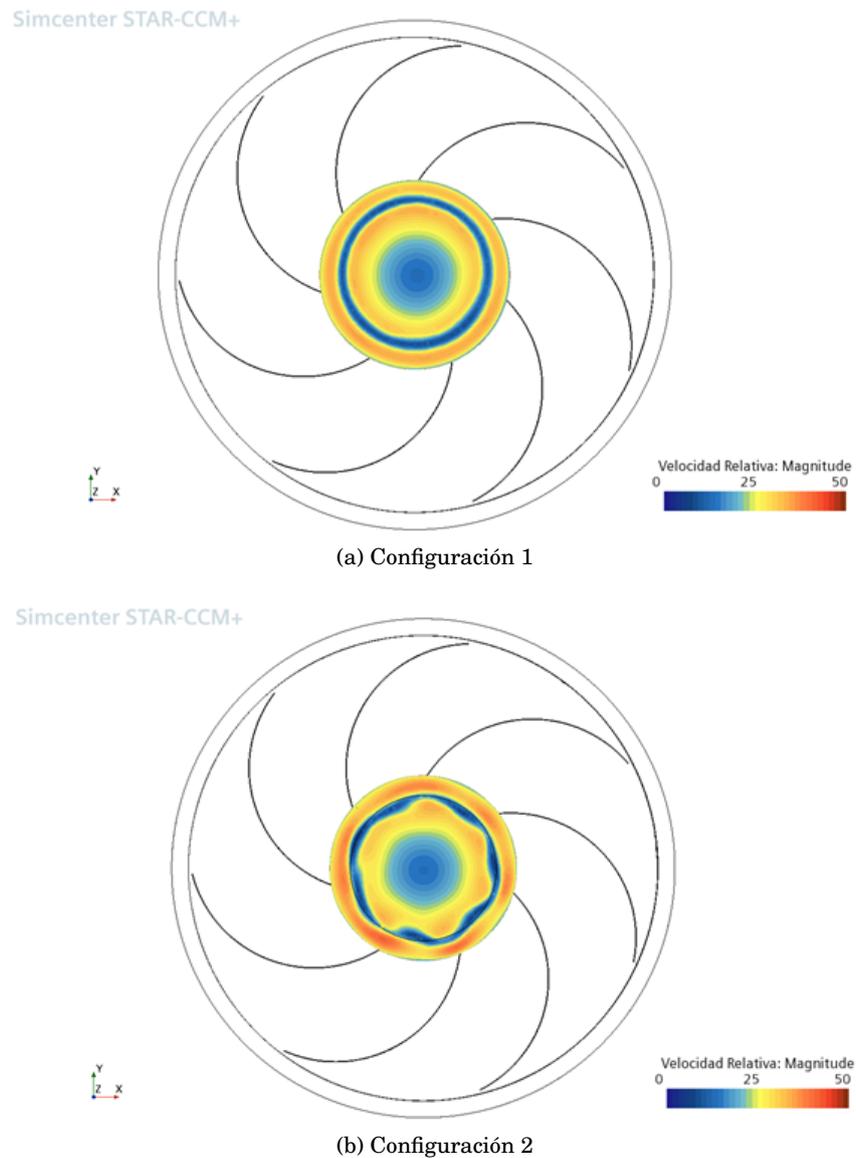
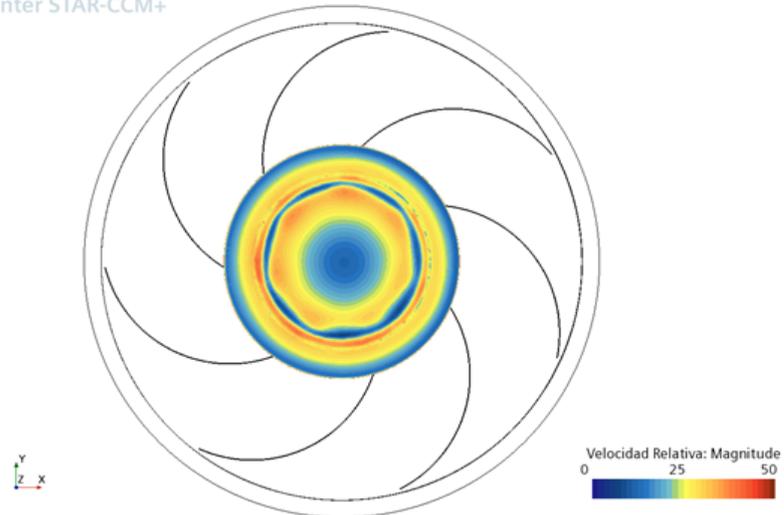


Figura 4.11: Visualización de los cortes horizontales a 0.042 metros

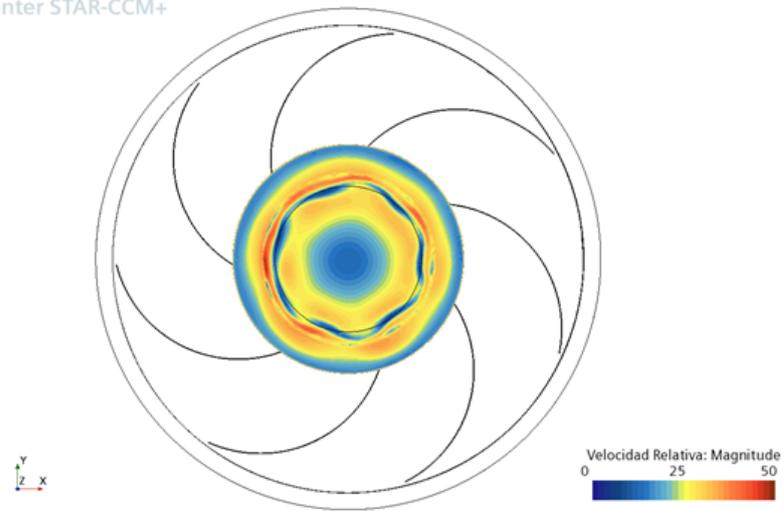
Por último, en el plano situado a 0.04 metros en la Figura 4.12, se puede apreciar el cambio en el comportamiento del flujo en la Configuración 1. Este es el mismo cambio que se produjo para la Configuración 2 en el plano situado en 0.044 metros, y es también debido a la presencia de la interfaz entre las distintas regiones.

Simcenter STAR-CCM+



(a) Configuración 1

Simcenter STAR-CCM+



(b) Configuración 2

Figura 4.12: Visualización de los cortes horizontales a 0.04 metros

4.3. Comparación entre estacionario y transitorio

En este apartado se presentan los resultados de la simulación en transitorio que se han obtenido tras ensayar los dos configuraciones de interfaces del ventilador, en el programa de CFD Star CCM+. Se van a mostrar los resultados de la malla de 0.4 mm, ya que es la que mayor precisión proporciona.

Se muestran las mismas variables globales, flujos, presiones y momentos, bajo las mismas condiciones del ensayo en estacionario. Los resultados para el ensayo transitorio de las dos configuraciones de interfaces se muestran en la Tabla 4.1.

		Configuración 1	Configuración 2
Presión Total Absoluta	Pa	99945	100582
Flujo Másico de Entrada	$\frac{g}{s}$	-6.414	-6.414
Flujo Másico de Salida	$\frac{g}{s}$	6.414	6.414
Flujo Másico Interfaz 1 Fluido	$\frac{g}{s}$	8.898	6.419
Flujo Másico Interfaz 1 Rotor	$\frac{g}{s}$	-8.909	-6.412
Flujo Másico Interfaz 2 Fluido	$\frac{g}{s}$	-8.898	-8.457
Flujo Másico Interfaz 2 Rotor	$\frac{g}{s}$	8.909	6.412
Momento en el Rotor	$N \cdot m$	-0.024	-0.024
Incremento de Presión	Pa	5729	5889

Tabla 4.1: Resultados de los ensayos en Transitorio

Por otra parte, es necesario estudiar que diferencia presentan dichos resultados respecto al mismo ensayo realizado en estacionario. Dichas diferencias, se muestran en la Tabla 4.2.

		Configuración 1	Configuración 2
Estacionario a Transitorio			
Presión Total Absoluta	%	4.840	5.693
Flujo Másico de Entrada	%	0.000	0.000
Flujo Másico de Salida	%	-0.068	-0.057
Flujo Másico Interfaz 1 Fluido	%	2.235	0.329
Flujo Másico Interfaz 1 Rotor	%	2.235	0.329
Flujo Másico Interfaz 2 Fluido	%	2.006	0.331
Flujo Másico Interfaz 2 Rotor	%	2.006	0.331
Momento en el Rotor	%	8.735	9.550
Incremento de Presión	%	-10.814	-10.324

Tabla 4.2: Variaciones entre el Estacionario y Transitorio de la Configuración 1 y 2

Como se puede observar, la diferencia entre los resultados entre los regímenes estacionario y transitorio no es significativa para la mayoría de las variables.

4.4. Resumen

Para resumir, en este apartado se ha analizado la diferencia entre el comportamiento del flujo en las dos configuraciones y, además, se ha comparado la diferencia entre el ensayo en modo Estacionario y el modo Transitorio.

En cuanto al comportamiento del flujo entre las dos configuraciones, la diferencia se atribuye a la presencia de una interfaz en el camino del flujo. En ambas configuraciones se encuentran en posiciones diferentes, dando lugar a desarrollos de flujo diferentes.

Por otra parte, las simulaciones en modo transitorio han producido resultados similares a los del modo estacionario, con diferencia no superiores al 3% en la mayoría de las variables globales, con la excepción del incremento de presión y el momento del rotor.

Capítulo 5

Conclusiones

En este trabajo se ha descrito el proceso de modelado y simulación de un ventilador centrífugo, por medio de diferentes programas informáticos. Se ha utilizado el programa *EXScan Pro* de *Shining 3D* junto al aparato de escaneo *EinScan Pro 2X Plus*, para escanear el ventilador real. Posteriormente, se ha utilizado el programa de diseño CAD *Fusion 360* de Autodesk, para modelar el ventilador, apoyándose además en los modelos escaneados obtenidos previamente. Finalmente, se ha utilizado el programa de ensayo de flujo por CFD *Star CCM+* de *Siemens* para visualizar el comportamiento del flujo dentro del ventilador.

En primer lugar, para el modelado del ventilador se ha explicado el proceso que se ha seguido. Concretamente, se ha mostrado las partes a escanear, los aparatos y programas utilizados, así como los resultados obtenidos. Posteriormente, se han mostrado las partes modeladas dentro del *Fusion 360* con sus dimensiones.

En la siguiente etapa, se recurrió al programa *Star CCM+* para simular el flujo en el ventilador, con dos configuraciones de interfaces diferentes, para así ver que diferencias surgen entre ellas. Se explicaron las condiciones de contorno y los modelos físicos y de turbulencia utilizados, además del mallado realizado. Los resultados se mostraron en tablas con variables globales, con representación gráfica y diferentes líneas de medición colocadas en diferentes posiciones en el ventilador.

Finalmente, se ha realizado el análisis de las diferencias que se observan en los resultados de las simulaciones para las dos configuraciones de interfaces. Para ello, se ha representado diferentes cortes horizontales del ventilador. Por otra parte, se han comparado los resultados del régimen estacionario con los del régimen transitorio, y se ha podido comprobar que no hay una diferencia sustancial entre ellas, y que el hecho de realizar simulaciones en estacionario desde el principio es adecuado.

Por último, en cuanto a los posibles trabajos futuros, cabe comentar que se podría realizar un ensayo en banco de pruebas del ventilador real. Esto permitiría realizar una comparativa entre los resultados de la presente memoria con los datos reales de operación. Por otra parte, se podrían realizar otras simulaciones en condiciones diferentes, especialmente, en regímenes de giro muy altos o bajos para ver como se comporta el ventilador en los extremos de su rango de funcionamiento.

Bibliografía

- [1] Shining 3D. *EinScan Pro 2X Plus Quick Start Guide*. Publicado en <https://www.einscan.com/wp-content/uploads/2020/05/EinScan-Pro-2X-Plus-Quick-Guide-1112.pdf>.
- [2] Shining 3D. *EinScan Pro User Manual*. Publicado en <https://it3d.com/wp-content/uploads/download-files/manual/en/EXScan-Pro-User-Manual-V3.3.0.2.pdf>.
- [3] Autodesk. *Fusion 360 resources*. Publicado en <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/resources>.
- [4] Siemens. *Siemens Community Forum*. Publicado en <https://community.sw.siemens.com/s/topic/academic>.
- [5] *Star CCM+ User Guide*.
- [6] Ian Torotwa y Changying Ji. *A Study of the Mixing Performance of Different Impeller Designs in Stirred Vessels Using Computational Fluid Dynamics*. Publicado en <https://www.mdpi.com/2411-9660/2/1/10>.
- [7] University of Warwick. *Fusion 360 tutorials*. Publicado en https://warwick.ac.uk/fac/sci/wmg/about/outreach/resources/fusion_tutorials.

Parte II
PLANOS

Planos

En esta parte se muestran todos los planos de las diferentes partes del ventilador explicadas en el Capítulo 2 de la Memoria.

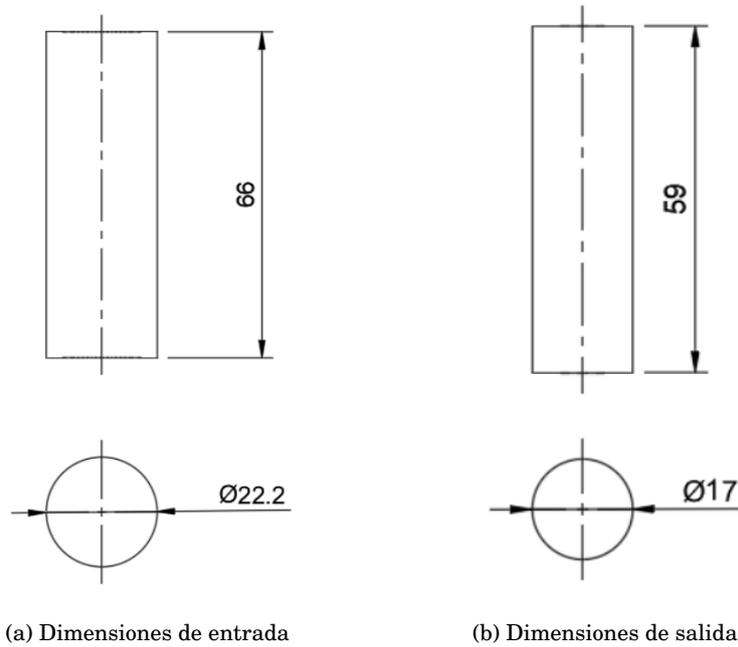


Figura 5.1: Dimensiones del tubo de entrada y el tubo de salida

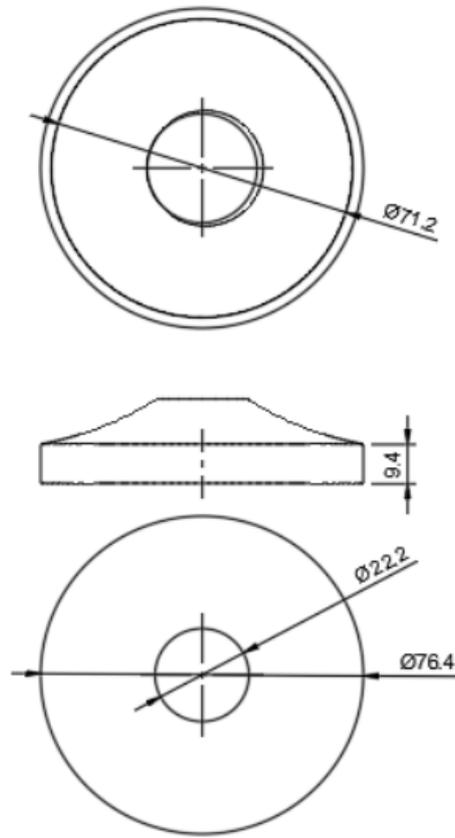


Figura 5.2: Dimensiones de la tapa superior

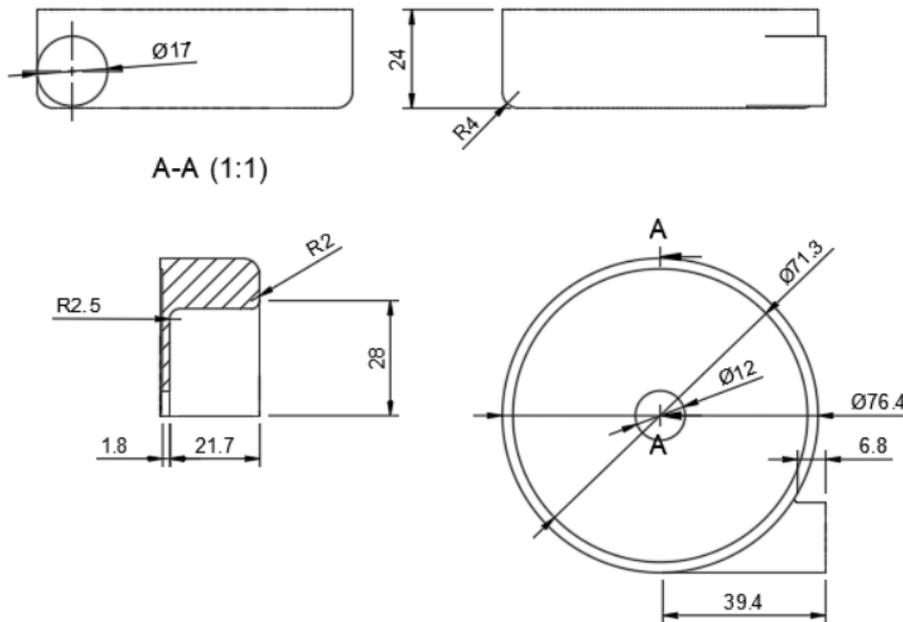


Figura 5.3: Dimensiones de la parte inferior

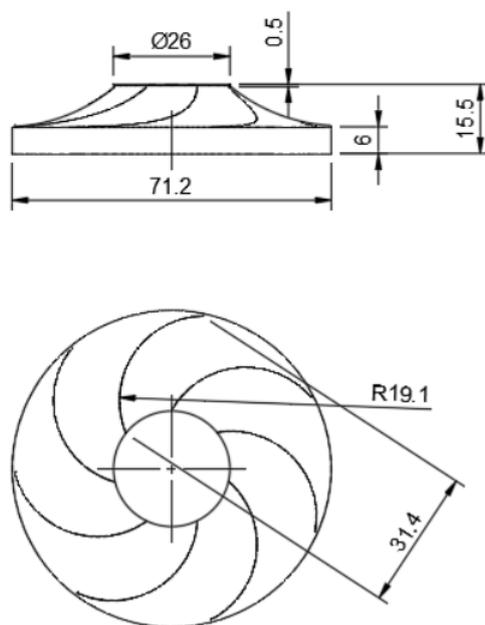


Figura 5.4: Dimensiones del rotor

Parte III

PRESUPUESTOS

Presupuesto

El objetivo de esta parte es explicar los diferentes costes que tendría la realización de este proyecto, es decir, modelar, simular y ensayar el ventilador centrífugo. Se incluyen en dichos costes, la parte informática y de equipos de ensayos, así como de personal.

Licencia de programa	Coste
Fusion 360	500 €
EXScan Pro	500 €
MS Office	100 €
Star CCM+	500 €
TOTAL LICENCIAS	1600 €

Tabla 5.1: Coste de licencias

Equipos	Coste	Horas	Total
Portátil personal	5 €/hora	280	1400 €
TOTAL EQUIPOS			1400 €

Tabla 5.2: Coste de equipos

Personal	Coste	Horas	Total
Ingeniero junior	35 €/hora	300	10500 €
Ingeniero senior 1	50 €/hora	30	1500 €
Ingeniero senior 2	50 €/hora	30	1500 €
TOTAL PERSONAL			13500 €

Tabla 5.3: Coste de personal

COSTE TOTAL DEL PROYECTO	
Licencias	1600 €
Equipos	1400 €
Personal	13500 €
TOTAL PROYECTO	19500 €
Gastos indirectos(14%)	2730 €
Beneficio industrial(6%)	1170 €
TOTAL BRUTO	23400 €
IVA(21%)	4914
TOTAL NETO	28314 €

Tabla 5.4: Coste del proyecto

Parte IV

PLIEGO DE CONDICIONES

Pliego de condiciones

En este último apartado se expondrán las condiciones y equipos que han sido necesarios para llevar a cabo la realización del presente proyecto. Concretamente, se han utilizado varios programas informáticos junto a un banco de ensayo y un equipo de escaneo 3D.

En primer lugar, se ha utilizado el equipo de escaneo 3D *EinScan Pro 2X Plus*, para el cual ha sido necesario el programa *EXScan Pro*. El programa requiere licencia y el equipo tiene un coste. La UPV ha proporcionado tanto el equipo, como la licencia del programa. En caso de no tener acceso al equipos y a la licencia por medio de una universidad o empresa, los costes de la licencia ascienden a una suma considerable de dinero, lo cual queda reflejado en los presupuestos.

Por otra, se ha usado el programa de CAD *Fusion 360* de Autodesk. Para tener acceso a este programa es necesario descargar desde el sitio web de Autodesk. Dicha empresa proporciona versiones para estudiantes de sus diferentes programas, gracias al acuerdo que existe con la UPV. Se ha considerado el coste de dicha licencia, como si no se tuviese acceso a la versión estudiante.

Por último, se ha recurrido al programa de ensayo de flujos CFD de Siemens llamado *Star CCM+*. Dependiendo del alcance del proyecto, el uso de este programa puede llegar a requerir grandes cantidades de memoria en el ordenador. No obstante, en este proyecto las simulaciones no pretendían ser extremadamente precisas y , se ha podido efectuar en un ordenador portátil estándar. Además, se incluido el coste de licencia proporcionado por la universidad.