



**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

**INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL: MECÁNICA**

**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**DISEÑO Y ANÁLISIS COMPUTACIONAL PARA  
TÚNEL DE VIENTO DE BAJA VELOCIDAD**

Autor: Alberto Muñoz Mejías

Tutor: Marco Antonio Álvarez Valenzuela

Octubre, 2012







## AGRADECIMIENTOS

---

En primer lugar, agradecer todo el apoyo y la ayuda constante que me ha dado mi tutor Marco Antonio Álvarez Valenzuela, que ha estado disponible a diario para resolver mis problemas que me iban surgiendo. Agradecer al personal de los Departamentos de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Térmica y de Fluidos por la ayuda que me han prestado en los momentos que la he precisado. Finalmente, también quiero agradecer a José Luis Pérez Díaz por ofrecerme la posibilidad de trabajar en este proyecto junto con Marco, en un momento delicado para mí, y en el que él no dudo de mí, y me atendió con gran amabilidad.

Por otro lado, quiero dar las gracias a mi familia: mi madre, mi padre y mis dos hermanos, por haber estado siempre a mi lado en todos los momentos duros de la carrera, y haberme ayudado en todo aquello que ha estado a su alcance. En especial, el agradecimiento va dirigido a mis padres, Soledad y Luis, que han sufrido conmigo, épocas de exámenes y años de clases, y han disfrutado conmigo los buenos momentos que me ha dado la carrera.

No quiero olvidarme de todos mis amigos, aquellos con los que sin compartir carrera universitaria, han logrado que pueda apreciar otros estilos de estudio, y que sin duda, he pasado con ellos muchas horas metido en la biblioteca, y me han animado en momentos de debilidad.

Por último, agradecer a todos los compañeros de clase, con los que he aprendido muchas y buenas cosas, y con los que he pasado unos años inolvidables, llegando a tener una gran amistad con varios de ellos.

Gracias a todos.



## **RESÚMEN DEL PROYECTO**

---

En este Proyecto Fin de Carrera se plantea el estudio y el desarrollo de un túnel de viento de ciclo cerrado y con sección de ensayos cerrada para una posible implantación en un laboratorio educativo. Por un lado, se plantea un diseño innovador para mejorar el flujo en un túnel de viento. Este diseño trata de evitar bordes esquinados que puedan provocar partículas de flujo turbulento. También se tiene en cuenta las dimensiones del mismo para garantizar una instalación en un laboratorio de términos educativos. Así mismo, se introducen deflectores de una sola pieza, para una reducción del coste del túnel de viento, un propulsor comercial y se buscan materiales resistentes, adaptables y de bajo coste para la fabricación del túnel de viento. Para corroborar el éxito de este diseño, se implementa un estudio en 2D del desarrollo del flujo a través de los conductos del propio túnel de viento. Se realizan análisis de velocidades, temperaturas, presiones y turbulencias. Los análisis generan buenos resultados con una gran fiabilidad para el uso de esta herramienta de estudio, como es el túnel de viento.

## **ABSTRACT**

---

This Master Thesis proposes the study and development of a closed circuit wind tunnel with a closed test section for possible implementation in educational laboratory. On one hand, there is an innovative design to improve the flow in the wind tunnel. This design is cornered edges to prevent particles that may cause turbulent flow. It also takes into account the dimensions to ensure the installation in an educational laboratory. Likewise, one-piece corner vans are introduced for a cost reduction of the wind tunnel, a commercial propeller and resistant, portable and low cost materials are sought for manufacturing the wind tunnel. To confirm the success of this design, a 2D flow development throughout the ducts of the wind tunnel study is implemented. Tests are performed speeds, temperatures, pressures and turbulence. The analysis generates good results with high reliability for the use in this of this tool of study, as is the wind tunnel.







---

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN .....	- 1 -
1.1	Marco del proyecto .....	- 1 -
1.2	Objetivos del proyecto .....	- 2 -
1.3	Fases y metodología.....	- 3 -
1.4	Estructura del documento .....	- 4 -
2	TÚNEL DE VIENTO .....	- 5 -
2.1	Definición de túnel de viento.....	- 5 -
2.2	Principales componentes.....	- 6 -
2.2.1	Sección de test o cámara de ensayo .....	- 6 -
2.2.2	Zona de acondicionamiento de flujo.....	- 7 -
2.2.3	Cono de contracción y difusor .....	- 7 -
2.3	Clasificación.....	- 8 -
2.3.1	Rango de velocidades de operación .....	- 8 -
2.3.2	Topología física .....	- 9 -
2.3.2.1	Según tipo de retorno .....	- 9 -
2.3.2.2	Según configuración de la cámara de ensayo .....	- 10 -
3	TEORÍAS DE FLUJO .....	- 13 -
3.1	Flujo laminar .....	- 13 -
3.2	Flujo turbulento .....	- 14 -
3.3	Capa límite.....	- 15 -
3.4	Teorema de Bernoulli.....	- 17 -
3.5	Efecto Venturi .....	- 19 -
3.6	Teoría de Darcy-Weisbach .....	- 21 -
3.7	Teoría de Prandtl .....	- 22 -
3.8	Número de Reynolds .....	- 23 -
3.9	Número de Mach .....	- 24 -
4	HERRAMIENTAS EMPLEADAS.....	- 25 -
4.1	Pro/ENGINEER .....	- 25 -
4.2	Análisis CFD .....	- 26 -
4.2.1	Principios de funcionamiento .....	- 27 -
4.2.2	The Reynolds Averaged Navier Stokes equations (RANS).....	- 27 -
4.2.3	Los modelos turbulentos .....	- 29 -
4.2.4	El modelo turbulento Spalart-Allmaras.....	- 29 -
5	CARACTERIZACIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO .....	- 31 -
5.1	Introducción .....	- 31 -
5.2	Marco teórico general .....	- 31 -
5.3	Flujo dentro del túnel .....	- 33 -
5.4	Cálculo de secciones.....	- 34 -

5.4.1	Cálculo de velocidades y número de Reynolds por secciones.....	- 36 -
5.4.2	Pérdidas dentro del túnel .....	- 38 -
5.4.2.1	Panel de abejas, en el ingreso al túnel .....	- 38 -
5.4.2.2	Malla.....	- 40 -
5.4.2.3	Contractor.....	- 43 -
5.4.2.4	Sección de prueba.....	- 44 -
5.4.2.5	Difusor .....	- 44 -
5.4.2.6	Generalidades instrumentales .....	- 45 -
5.4.3	Cálculo de presiones por secciones.....	- 45 -
6	SELECCIÓN DEL PROPULSOR .....	- 49 -
7	DISEÑO Y MODELADO EN 3D DEL TÚNEL DE VIENTO .....	- 53 -
7.1	Sección de pruebas .....	- 55 -
7.2	Zona de acondicionamiento de flujo .....	- 56 -
7.2.1	Cono de contracción .....	- 56 -
7.2.2	Cono de expansión .....	- 57 -
7.2.3	Malla.....	- 58 -
7.2.4	Panel de abejas .....	- 59 -
7.3	Tuberías.....	- 60 -
7.3.1	Tubería media-luna 600 mm. ....	- 60 -
7.3.2	Tubería media-luna 800 mm. ....	- 61 -
7.3.3	Tubería de expansión inicial (de 600 mm. a 800 mm.).....	- 62 -
7.3.4	Tubería de expansión final (de 400 mm. a 600 mm.) .....	- 63 -
7.3.5	Tubería de entrada a la sección de pruebas .....	- 64 -
7.4	Deflectores en esquinas .....	- 65 -
7.4.1	Deflectores en esquinas (600 mm.).....	- 65 -
7.4.2	Deflectores en esquinas (800 mm.).....	- 66 -
7.5	Propulsor (ventilador) comercial .....	- 67 -
8	SIMULACIÓN DE FLUJO EN 2D DEL TÚNEL DE VIENTO .....	- 69 -
8.1	Mallado de la sección en 2D.....	- 69 -
8.1.1	Discretización espacial.....	- 69 -
8.1.1.1	Introducción .....	- 69 -
8.1.1.2	Mallas estructuradas.....	- 70 -
8.1.1.3	Mallas no estructuradas.....	- 71 -
8.1.2	Mallado del túnel de viento.....	- 72 -
8.1.2.1	Mallado Tipo “Curvatura” .....	- 72 -
8.1.2.2	Mallado Tipo “Proximidad” .....	- 75 -
8.1.2.3	Mallado Tipo “Curvatura y Proximidad” .....	- 77 -
8.2	Simulación paso a paso (malla Tipo “Curvatura”).....	- 79 -
8.2.1	Definición del solucionador del modelo .....	- 79 -
8.2.2	Definición de la Energía .....	- 79 -
8.2.3	Definición de la Viscosidad del modelo .....	- 80 -
8.2.4	Definición del Material del flujo.....	- 80 -
8.2.5	Definición de las Condiciones de Operación.....	- 81 -
8.2.6	Definición de las Condiciones de Frontera.....	- 81 -
8.2.6.1	Entrada .....	- 82 -

---

8.2.6.2 Salida.....	- 83 -
8.2.6.3 Paredes .....	- 85 -
8.2.6.4 Fluido.....	- 85 -
8.2.7 Definición de superficies porosas.....	- 86 -
8.2.8 Definición de los controles de solución .....	- 87 -
8.2.9 Definición de los Monitores de Residuos .....	- 87 -
8.2.10 Definición del número de Iteraciones .....	- 88 -
8.3 Resultados del análisis (Malla Tipo “Curvatura”) .....	- 91 -
8.3.1 Mapa de Presión Absoluta .....	- 91 -
8.3.2 Mapa de Velocidad.....	- 92 -
8.3.3 Mapa de Vectores de Velocidad .....	- 93 -
8.3.4 Mapa de Temperatura.....	- 94 -
8.3.5 Mapa de Turbulencia.....	- 95 -
8.4 Resultados del análisis (Malla Tipo “Proximidad”) .....	- 96 -
8.4.1 Resultado de la iteración.....	- 96 -
8.4.2 Mapa de Presión Absoluta .....	- 97 -
8.4.3 Mapa de Velocidad.....	- 98 -
8.4.4 Mapa de Vectores de Velocidad .....	- 99 -
8.4.5 Mapa de Temperatura.....	- 100 -
8.4.6 Mapa de Turbulencia.....	- 101 -
8.5 Resultados del análisis (Malla Tipo “Curvatura y Proximidad”).....	- 102 -
8.5.1 Resultado de la iteración.....	- 102 -
8.5.2 Mapa de Presión Absoluta .....	- 103 -
8.5.3 Mapa de Velocidad.....	- 104 -
8.5.4 Mapa de Vectores de Velocidad .....	- 105 -
8.5.5 Mapa de Temperatura.....	- 106 -
8.5.6 Mapa de Turbulencia.....	- 107 -
8.6 Análisis de los resultados .....	- 108 -
9 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	- 111 -
9.1 Conclusiones .....	- 111 -
9.2 Líneas futuras .....	- 112 -
10 PRESUPUESTO .....	- 115 -
10.1 Coste del material .....	- 115 -
10.2 Coste de honorarios.....	- 117 -
10.2.1 Honorarios de realización.....	- 117 -
10.2.2 Honorarios de dirección .....	- 117 -
10.3 Presupuesto final .....	- 118 -
11 Bibliografía .....	- 119 -
12 ANEXOS .....	- 121 -
12.1 Dimensionado de las piezas .....	- 121 -
12.2 Catálogo del propulsor comercial .....	- 135 -



---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Modelo de túnel de viento cerrado .....	- 6 -
Figura 2.2: Modelo de cono de contracción y difusor en túnel de viento.....	- 8 -
Figura 2.3: Circuito abierto con cámara de ensayos cerrada (Tipo NPL) .....	- 11 -
Figura 2.4: Circuito abierto con sección de ensayos abierta (Tipo Eiffel) .....	- 11 -
Figura 2.5: Circuito cerrado con sección de ensayos cerrada (Tipo Göttingen) .....	- 12 -
Figura 2.6: Circuito cerrado con sección de ensayos abierta (Tipo Prandtl).....	- 12 -
Figura 3.1: Representación de líneas de flujo laminar .....	- 13 -
Figura 3.2: Líneas de flujo laminar a través de un perfil NACA .....	- 13 -
Figura 3.3: Distribución de velocidades de un fluido a través de una tubería .....	- 14 -
Figura 3.4: Representación de líneas de flujo turbulento .....	- 14 -
Figura 3.5: Desarrollo de un flujo a través de diferentes posiciones de un perfil NACA.....	- 15 -
Figura 3.6: Capa límite. Perfil de velocidades .....	- 15 -
Figura 3.7: Desarrollo de la turbulencia en la capa límite.....	- 16 -
Figura 3.8: Gráfico demostrativo del teorema de Bernoulli .....	- 17 -
Figura 3.9: Gráfico demostrativo del Efecto de Venturi .....	- 19 -
Figura 5.1: Dimensiones de la sección de ensayos .....	- 36 -
Figura 5.2: Coeficientes de pérdida para diferentes geometrías del direccionador de flujo .....	- 39 -
Figura 5.3: Geometría y nomenclatura de la malla.....	- 41 -
Figura 6.1: Vista isométrica frontal del propulsor comercial elegido.....	- 51 -
Figura 6.2: Vista isométrica trasera del propulsor comercial elegido .....	- 51 -
Figura 6.3: Dimensiones del propulsor comercial elegido .....	- 52 -
Figura 7.1: Diseño en 3D del conjunto del túnel de viento .....	- 54 -
Figura 7.2: Diseño de la sección de pruebas .....	- 55 -

---

Figura 7.3: Diseño del cono de contracción .....	- 56 -
Figura 7.4: Diseño del cono de expansión .....	- 57 -
Figura 7.5: Diseño de la malla.....	- 58 -
Figura 7.6: Diseño del Panel de abejas.....	- 59 -
Figura 7.7: Diseño de la tubería media-luna 600 mm.....	- 60 -
Figura 7.8: Diseño de la tubería media-luna 800 mm.....	- 61 -
Figura 7.9: Diseño de la tubería de expansión inicial (de 600 mm. a 800 mm.) .....	- 62 -
Figura 7.10: Diseño de la tubería de expansión final (de 400 mm. a 600 mm.) .....	- 63 -
Figura 7.11: Diseño de la tubería de entrada a la sección de pruebas .....	- 64 -
Figura 7.12: Diseño de los deflectores en esquinas (600 mm.) .....	- 65 -
Figura 7.13: Diseño de los deflectores en esquinas (800 mm.) .....	- 66 -
Figura 7.14: Diseño del propulsor (ventilador) comercial .....	- 67 -
Figura 8.1: Mallas con nodos centrados en los elementos y centrados en los vértices.....	- 70 -
Figura 8.2: Mallado Tipo “Curvatura” .....	- 72 -
Figura 8.3: Adaptación de las regiones de la malla.....	- 73 -
Figura 8.4: Datos del reajuste de la malla .....	- 73 -
Figura 8.5: Malla Tipo “Curvatura” reajustada .....	- 74 -
Figura 8.6: Mallado Tipo “Proximidad” .....	- 75 -
Figura 8.7: Datos del reajuste de la malla .....	- 75 -
Figura 8.8: Malla Tipo “Proximidad” reajustada.....	- 76 -
Figura 8.9: Mallado Tipo “Curvatura y Proximidad” .....	- 77 -
Figura 8.10: Datos del reajuste de la malla .....	- 77 -
Figura 8.11: Mallado Tipo “Curvatura y Proximidad” reajustada .....	- 78 -
Figura 8.12: Solucionador del modelo.....	- 79 -
Figura 8.13: Definición de la ecuación de energía .....	- 79 -
Figura 8.14: Definición de la viscosidad del modelo.....	- 80 -
Figura 8.15: Definición del material del flujo.....	- 80 -
Figura 8.16: Definición de las condiciones de operación .....	- 81 -
Figura 8.17: Definición de las condiciones de frontera para la entrada.....	- 82 -
Figura 8.18: Parámetros de velocidad, turbulencia y diámetro hidráulico	

---

para la entrada .....	- 82 -
Figura 8.19: Parámetro de temperatura para la entrada .....	- 83 -
Figura 8.20: Definición de las condiciones de frontera para la salida.....	- 83 -
Figura 8.21: Parámetros de turbulencia y diámetro hidráulico para la salida .....	- 84 -
Figura 8.22: Parámetro de la temperatura para la salida .....	- 84 -
Figura 8.23: Parámetros de rugosidad para las paredes .....	- 85 -
Figura 8.24: Definición de las condiciones de frontera para el fluido .....	- 85 -
Figura 8.25: Porosidad que atraviesa el fluido .....	- 86 -
Figura 8.26: Definición de las superficies porosas .....	- 86 -
Figura 8.27: Definición de los controles de solución de primer orden .....	- 87 -
Figura 8.28: Definición de los monitores de residuos.....	- 87 -
Figura 8.29: Definición del número de iteraciones .....	- 88 -
Figura 8.30: Solución de primer orden convergente.....	- 88 -
Figura 8.31: Gráfico de residuos convergentes de primer orden.....	- 88 -
Figura 8.32: Definición de los controles de solución de segundo orden.....	- 89 -
Figura 8.33: Solución de segundo orden convergente .....	- 89 -
Figura 8.34: Gráfico de los residuos convergentes de segundo orden .....	- 90 -
Figura 8.35: Mapa de presión absoluta en el túnel de viento .....	- 91 -
Figura 8.36: Mapa de velocidades en el túnel de viento .....	- 92 -
Figura 8.37: Mapa de vectores de velocidad en el túnel de viento.....	- 93 -
Figura 8.38: Mapa de velocidades en el túnel de viento .....	- 94 -
Figura 8.39: Mapa de turbulencias en el túnel de viento .....	- 95 -
Figura 8.40: Solución convergente de segundo orden .....	- 96 -
Figura 8.41: Gráfico de los residuos convergentes de segundo orden .....	- 96 -
Figura 8.42: Mapa de presión absoluta en el túnel de viento .....	- 97 -
Figura 8.43: Mapa de velocidades en el túnel de viento .....	- 98 -
Figura 8.44: Mapa de vectores de velocidad en el túnel de viento.....	- 99 -
Figura 8.45: Mapa de temperatura en el túnel de viento .....	- 100 -
Figura 8.46: Mapa de turbulencias en el túnel de viento .....	- 101 -
Figura 8.47: Solución convergente de segundo orden .....	- 102 -
Figura 8.48: Gráfico de los residuos convergentes de segundo orden .....	- 102 -
Figura 8.49: Mapa de presión absoluta en el túnel de viento .....	- 103 -

---

Figura 8.50: Mapa de velocidades en el túnel de viento .....	- 104 -
Figura 8.51: Mapa de vectores de velocidad .....	- 105 -
Figura 8.52: Mapa de temperaturas en el túnel de viento .....	- 106 -
Figura 8.53: Mapa de turbulencias en el túnel de viento .....	- 107 -

---

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Rango de velocidades de operación .....	- 8 -
Tabla 2: Tipo de túnel de viento según su topología física.....	- 11 -
Tabla 3: Clasificación del propulsor según incremento de presión generado .....	- 49 -
Tabla 4: Clasificación del propulsor según trayectoria del fluido a su paso por el propulsor .....	- 49 -
Tabla 5: Clasificación del propulsor según su uso .....	- 49 -
Tabla 6: Características del propulsor comercial elegido .....	- 52 -
Tabla 7: Dimensiones del propulsor comercial elegido .....	- 52 -
Tabla 8: Tabla de resultados para la sección de pruebas según mallado .....	- 108 -
Tabla 9: Tabla del número de iteraciones, celdas, caras y nodos según mallado .....	- 108 -
Tabla 10: Presupuesto de los materiales .....	- 116 -
Tabla 11: Tabla de presupuesto del proyecto .....	- 118 -



# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 MARCO DEL PROYECTO

El Proyecto Fin de Carrera se enmarca en el campo del análisis de flujo, un área en continuo desarrollo y en el que actualmente existen muchos focos de investigación abiertos. Este proyecto se centra en el diseño de un túnel de viento y en el análisis computacional de fluidos, para corroborar que el diseño elegido es apto para un correcto funcionamiento del mismo.

Para realizar experimentos de todo tipo es necesario diseñar la mejor manera de obtener datos fiables. A la hora de probar en el laboratorio una teoría, es necesario construir soportes de pruebas que se asemejen lo máximo posible a un comportamiento real.

En todo experimento debe entrar siempre el factor económico, tanto de ahorro de dinero, como de tiempo, aunque una cosa implique la otra.

Cuando realizamos estudios aerodinámicos, es necesario seguir un proceso de validación de datos y resultados reiterativos. Habitualmente se comienza con un estudio computacional o análisis CFD (Computational Fluid Dynamics). Una vez obtenidos resultados fiables de este estudio, se prueban diversos prototipos a escala en un túnel aerodinámico o de viento, para comprobar su comportamiento. El paso final sería diseñar un prototipo real y probarlo en condiciones de uso. Si en alguno de los pasos ha de cambiarse algo, tendremos que volver al anterior y probarlo de nuevo.

La investigación realizada en el proyecto se centrará en obtener un túnel de viento de ciclo cerrado, con una cámara de ensayos cerrada y con un flujo que al paso por la cámara de ensayos sea laminar, con una velocidad de  $50 \text{ m/s}$ , con unas dimensiones reales para una instalación en un laboratorio educacional. Los trabajos realizados hasta ahora consiguen buenos resultados en general, utilizando herramientas más complejas que permiten obtener resultados más precisos. El mayor problema se sitúa en el alto coste de estas herramientas. Otro problema que se presenta es la aparición de flujo turbulento debido a las esquinas de las tuberías. Los últimos estudios realizados muestran una tendencia a utilizar una estructura con bordes redondeados, que generen así buenos resultados sin la necesidad de ampliar los costes.

Nuestra propuesta sigue la misma línea de investigación, introduciendo además el uso de deflectores de una sola pieza.

La estructura permite controlar el flujo a través del túnel, sin la necesidad de grandes y costosas herramientas de análisis. Esto permite abordar el problema desde el conocimiento previo, obteniendo un mejor rendimiento. Este tipo de diseño de túneles de viento es novedoso, ya que se pueden aplicar tratamientos diferentes según la necesidad.

### 1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

Los objetivos del proyecto se pueden resumir en:

- Estudio y conocimiento de la estructura y funcionamiento de un túnel de viento, así como su mecanismo de control de flujo. En particular se estudiará el problema de los túneles de viento cerrados con cámara de ensayo cerrada.
- Estudio y conocimiento de las teorías de flujo, tanto dinámicas como cinemáticas. Dentro del estudio de las teorías de flujo, el estudio se centrará en las teorías de flujo a través de tuberías.
- Estudio y conocimiento de la caracterización del túnel de viento, centrándose en las pérdidas de carga del flujo a través de las tuberías y elementos del túnel de viento.
- Diseño e implementación en 3D de las piezas con las que cuenta un túnel de viento cerrado.
- Análisis y simulación en 2D del flujo a través del túnel de viento.
- Mostrar la validez de los elementos desarrollados y diseñados, obteniendo resultados finales sobre el flujo acorde con el estudio realizado previamente según las teorías de flujo en un túnel de viento.

### 1.3 FASES Y METODOLOGÍA

La metodología a seguir en el proyecto será la habitual en cualquier proceso de carácter científico o de investigación:

1. Estudio del estado del arte de túneles de viento o túneles aerodinámicos. En particular se estudiará el túnel de viento de circuito cerrado y con cámara de ensayos cerrada.
2. Elección de los requisitos que deben cumplir las piezas y secciones del túnel de viento.
3. Estudio teórico y resolución de las ecuaciones que modelan la estructura de un túnel de viento, obteniendo parámetros o patrones típicos de cada pieza. De esta forma se podrán aplicar las teorías de flujo en función del comportamiento requerido.
4. Diseño en 3D de las diferentes piezas y secciones. Cada diseño llevará asociado un estudio teórico de las medidas utilizadas en el análisis.
5. Proceso de simulación y análisis de los parámetros necesarios. En el proceso de simulación se verificará que los parámetros elegidos son válidos en consonancia con los obtenidos de forma empírica.
6. Pruebas y resultados finales, donde se mostrarán el rendimiento del flujo de aire para el túnel de viento.
7. Obtención de conclusiones finales acerca de la validez del diseño propuesto y descripción de las líneas futuras de investigación.

## 1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

La memoria del presente Proyecto Fin de Carrera se estructura según lo descrito a continuación.

En el primer capítulo se ha realizado una pequeña introducción que abarca la necesidad del proyecto y las principales razones que han llevado a su realización, objetivos perseguidos en su desarrollo y la metodología seguida durante su ejecución.

En el segundo capítulo se hace una introducción al concepto de túnel de viento, se explican los principales componentes que lo componen y se añade una clasificación de los diferentes tipos de túneles de viento según su rango de velocidades de operación y su topología física.

En el tercer capítulo se hace alusión a las distintas teorías de flujo, que sirven de base para el posterior estudio de los parámetros necesarios para el correcto funcionamiento del túnel de viento.

En el cuarto capítulo se hace referencia a las herramientas utilizadas para el diseño y la simulación del túnel de viento.

En el quinto capítulo se lleva a cabo la caracterización del túnel de viento, resolviendo de forma empírica los parámetros de cálculo de las secciones para el túnel de viento propuesto.

En el sexto capítulo se presenta el propulsor comercial seleccionado para la implementación en el túnel de viento propuesto.

En el séptimo capítulo se muestran las piezas en 3D del túnel de viento una vez diseñado.

En el octavo capítulo se hará la simulación de flujo en 2D del túnel de viento, junto con los resultados obtenidos.

En el noveno capítulo se contemplarán las conclusiones más significativas de la realización de este Proyecto Fin de Carrera, presentando algunas ideas que podrían constituir líneas futuras de investigación que completen el trabajo presentado. En el décimo capítulo se expondrá el presupuesto completo del proyecto.

En el último capítulo, se incluyen las referencias utilizadas en la realización de este proyecto y que han sido tomadas como guía durante todo el trabajo realizado.

Finalmente, en el Anexo se incluyen los planos de las piezas y el catálogo de características original del propulsor.

# 2 TÚNEL DE VIENTO

---

## 2.1 DEFINICIÓN DE TÚNEL DE VIENTO

Un túnel de viento o túnel aerodinámico es una herramienta experimental para estudiar los efectos del flujo de aire sobre objetos o cuerpos sólidos. Con él se simulan las condiciones experimentales por el objeto en la situación real. El túnel de viento es el sistema de simulación por excelencia, y aunque su funcionamiento es más complejo de lo que parece, se basa en conceptos bastante simples que se explican a continuación.

En un túnel de viento, el objeto permanece estacionario mientras se fuerza el paso de aire o gas alrededor de él. El aire se sopla o aspira por medio de una turbina o ventilador a través de un conducto equipado con una ventana y otros aparatos en los que los modelos o formas geométricas se montan para el estudio. Después se utilizan varias técnicas para estudiar el flujo de aire real alrededor de la geometría y se comparan con los resultados teóricos, que también deben tener en cuenta el número de Reynolds y el número de Mach para su régimen de funcionamiento.

En su topología más elemental, un túnel de viento es una instalación formada por un conducto tubular de sección arbitraria y regular, capaz de someter al modelo bajo ensayo a un flujo fluido con determinadas propiedades, con tal de caracterizar los fenómenos producidos durante su interacción.

La experimentación en túneles de viento resulta a menudo el método más rápido, económico y preciso para la realización de estudios aerodinámicos; ofrecen capacidades de trabajo con modelos a escala en fases iniciales de desarrollo, representan enteramente la complejidad del comportamiento de un fluido real, y proporcionan grandes cantidades de información fiable que sirve de base para diferentes decisiones de diseño.

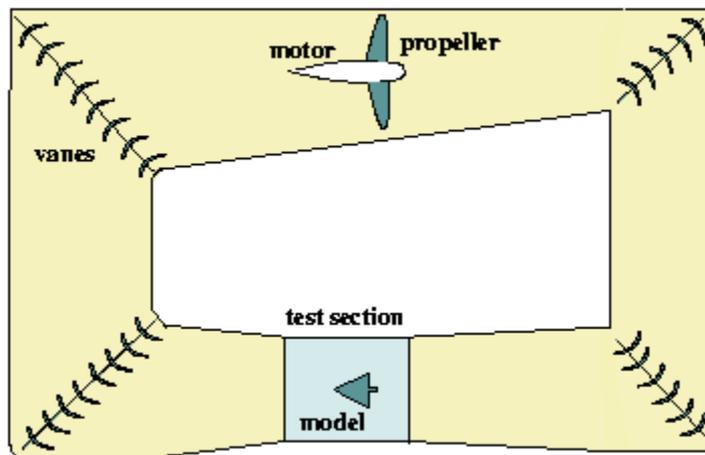


Figura 2.1: Modelo de túnel de viento cerrado [1]

## 2.2 PRINCIPALES COMPONENTES

La topología concreta de un túnel de viento varía según la utilización determinada que se considere dar a la instalación. Sin embargo, la mayoría de ellos presentan cuatro componentes comunes, que constituyen los ejes de diseño de cualquier infraestructura de este tipo.

### 2.2.1 SECCIÓN DE TEST O CÁMARA DE ENSAYO

Esta sección es el componente más importante de un túnel de viento, siendo en este donde se realiza el ensayo. En ella se instala el modelo bajo estudio, controlando que el flujo fluido presente unas características de turbulencia y velocidades idóneas para una correcta reproducción de la situación que se pretende simular.

Sus parámetros de diseño se definen a partir de requisitos operativos, principalmente accesibilidad para la manipulación del modelo y los diferentes instrumentos de medida necesarios para el ensayo, así como la correcta caracterización del flujo para reproducir el entorno deseado. A causa de ello, según [1], está el hecho de que muchas cámaras de ensayos presenten secciones de geometría rectangular, puesto que facilitan la operación, o que su superficie interna no debe presentar rugosidad significativa, para que las variaciones de velocidad y presión dinámica del flujo no superen el 25% y 50% de sus valores medios, respectivamente.

## 2.2.2 ZONA DE ACONDICIONAMIENTO DE FLUJO

Esta sección tiene por propósito dotar al flujo de los parámetros de calidad necesarios (dirección, turbulencia, perfil de velocidades, etc.) para una correcta realización del ensayo. Tal acondicionamiento se consigue haciendo circular el fluido a través de una serie de dispositivos que le confieren una turbulencia isótropa (la fluctuación media del corriente turbulento es igual en todas direcciones, incluso en escalas de longitud pequeñas) y eliminan los vórtices de mayor tamaño, dejando pasar únicamente aquellos de pequeña magnitud que se extinguirán rápidamente en secciones posteriores. Estos dispositivos son, principalmente:

- **Panel de abejas:** Elementos en forma de panel mallado cuya función es la de dotar al flujo de la dirección deseada. El fluido circula a través de los diferentes elementos de la malla adoptando una disposición de filamentos paralelos a su paso. Según [1], los valores de porosidad típicos de estos dispositivos son próximos a 0.8.
- **Pantallas de turbulencia:** Dispositivos encargados de uniformar el perfil de velocidades del fluido, a costa sin embargo, de una considerable pérdida de presión. En la realización de esta función introducen, además, pequeñas turbulencias en el flujo.

Para mejorar la eficiencia del acondicionamiento y corregir las deficiencias que presentan estos dispositivos, se disponen varios montajes *Panel de abejas-Pantalla de turbulencia* de manera consecutiva, dejando un pequeño intervalo de espacio entre dos sistemas contiguos.

## 2.2.3 CONO DE CONTRACCIÓN Y DIFUSOR

La sección del cono de contracción se sitúa entre la zona de acondicionamiento y la cámara de ensayo. Su misión consiste en dotar al flujo, adecuadamente acondicionado, de la velocidad necesaria para realizar el ensayo. Tal aceleración es generada mediante una reducción gradual de su sección recta, produciendo así un incremento continuo y proporcional de la velocidad, reduciendo el grosor de la capa límite en cámara de ensayo y evitando la formación de vórtices. Se observa mediante la ecuación de Bernoulli para fluidos ideales, que el incremento de velocidad a la salida de esta sección, va acompañado de una reducción de presión de la misma.

La etapa del difusor se sitúa a continuación de la sección de test, realizando la tarea opuesta que ejecuta el cono de contracción, disminuye la velocidad e incrementa la presión del flujo, mediante un aumento progresivo de su sección recta, posibilitando así el uso de propulsores menos potentes para mantener la velocidad del flujo.

El cono de contracción y el difusor resultan secciones críticas de diseño de instalaciones de túnel de viento, debido a su misión de asegurar que el flujo posea unas características de velocidad óptimas en la cámara de ensayo.

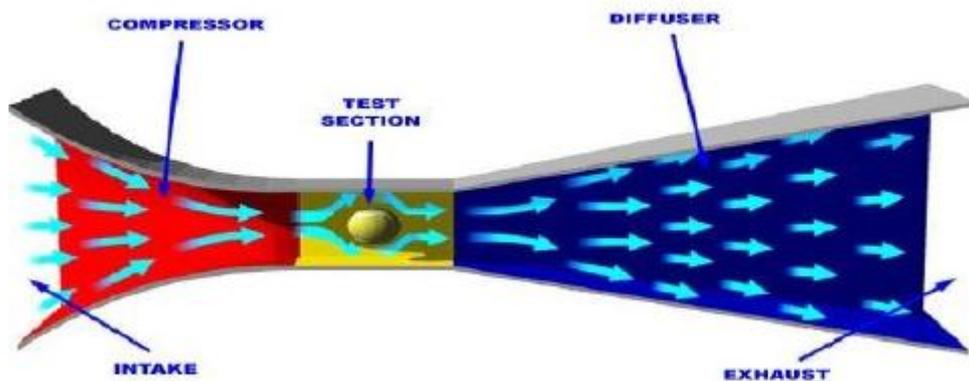


Figura 2.2: Modelo de cono de contracción y difusor en túnel de viento [2]

## 2.3 CLASIFICACIÓN

Los túneles de viento pueden ser clasificados de diferentes modos, según múltiples criterios, teniendo en cuenta sus diversas características. Sin embargo hay dos parámetros que definen este tipo de instalaciones por encima de los demás: rango de velocidades de operación y topología física.

### 2.3.1 RANGO DE VELOCIDADES DE OPERACIÓN

Teniendo en cuenta la velocidad del flujo a su paso por la sección de test, los túneles de viento pueden clasificarse como:

TIPO	VELOCIDAD ÓPTIMA
De baja velocidad	$M < 0.6$
Subsónicos	$0.6 < M < 0.85$
Transónicos	$0.85 < M < 1.2$
Supersónicos	$1.2 < M < 5$
Hipersónicos	$5 < M$

Tabla 1: Rango de velocidades de operación [3]

Según [3], alcanzando regímenes mayores a 0.85 Mach, las ondas de choque perturban considerablemente el flujo, volviéndose mucho más complicado el estudio aerodinámico en túneles de viento y la obtención de resultados significativos. Las características de diseño de la infraestructura quedan también afectadas por esa misma causa, resultando mucho más complejas que para instalaciones subsónicas o de baja velocidad.

### 2.3.2 TOPOLOGÍA FÍSICA

Dos parámetros son considerados en la clasificación de túneles de viento por su topología física, según [3]: tipo de retorno y configuración de la cámara de ensayo.

#### 2.3.2.1 Según tipo de retorno

- **Circuito abierto:** El flujo de aire que circula por su interior describe una trayectoria recta; penetra en el circuito desde el exterior a través de la sección de entrada, que suele albergar la zona de acondicionamiento de flujo. Llega al cono de contracción donde pierde presión y gana velocidad, entrando posteriormente en la cámara de ensayo. A continuación, circula a través del difusor y la sección del propulsor, para regresar finalmente al exterior por medio de la sección de salida.
  - Sus principales **ventajas** son:
    - Costes de construcción menores que instalaciones de circuito cerrado.
    - Posibilidad de utilizar técnicas de visualización de flujo con humo, sin inconvenientes, debido al origen y destino externo del aire.
  - Sus mayores **desventajas** radican en:
    - Necesidad de mayor acondicionamiento de flujo. Dicho flujo está fuertemente influido por el entorno en el que está instalada la infraestructura.
    - Mayor consumo de energía para tasas de operaciones elevadas.

- Fuente importante de contaminación acústica, lo que puede limitar las horas de operación del túnel o conllevar costosos procesos de insonorización.

**Circuito cerrado:** El flujo fluido describe en su movimiento una trayectoria cerrada por el interior del túnel, recirculando de forma continua por el circuito de retorno, con poco o ningún contacto con el exterior.

- Las instalaciones de este tipo tienen como **ventajas**:
  - Mayor control de la calidad del flujo en el interior del circuito. Poca o ninguna influencia del entorno de la instalación en el fluido.
  - Menor consumo de energía debido al continuo recircular del flujo por su interior. Este factor resulta particularmente beneficioso para tasas de operación elevadas.
  - Generación de menor contaminación acústica.
- Sus **inconvenientes** principales son:
  - Mayor coste inicial, debido fundamentalmente a la mayor necesidad de infraestructura.
  - Complejidad de diseño para posibilitar la utilización de técnicas de visualización determinadas (mediante humo, pintura, etc.) o la operación de motores de combustión interna.
  - Necesidad de dispositivos de refrigeración o intercambiadores de calor para instalaciones con tasas de operación elevadas.

### 2.3.2.2 Según configuración de la cámara de ensayo

- **Sección abierta:** La cámara de ensayo comunica por alguno de sus límites o por todos ellos con el exterior.
- **Sección cerrada:** La sección de test posee paredes sólidas que la aíslan al flujo fluido del exterior durante el ensayo.

La sección cerrada es la configuración de cámara de ensayo más común. Sin embargo, en los últimos diseños se contempla la posibilidad de dotar a los túneles de viento de infraestructuras que permitan ambas configuraciones, consiguiendo así mayor polivalencia de cara al desarrollo de diferentes clases de test.

Según el tipo de retorno y la configuración de sección de test que posea una instalación en concreto, se clasifican los túneles de viento por su topología física como:

Config.Secc.Test/Retorno	Circuito Abierto	Circuito Cerrado
Sección abierta	Tipo Eiffel	Tipo Prandtl
Sección cerrada	Tipo NPL	Tipo Göttingen

Tabla 2: Tipo de túnel de viento según su topología física

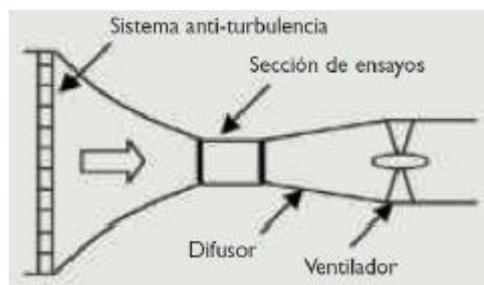


Figura 2.3: Circuito abierto con cámara de ensayos cerrada (Tipo NPL) [4]

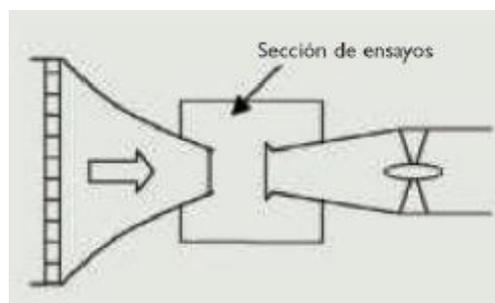
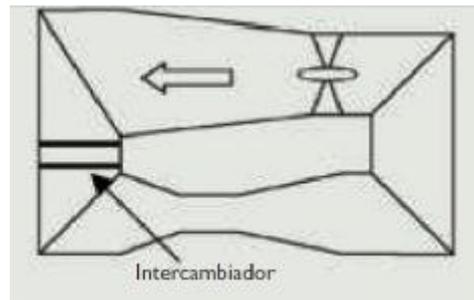
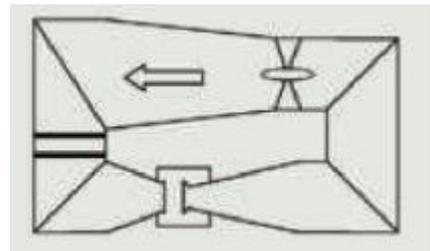


Figura 2.4: Circuito abierto con sección de ensayos abierta (Tipo Eiffel) [4]



**Figura 2.5: Circuito cerrado con sección de ensayos cerrada (Tipo Göttingen) [4]**



**Figura 2.6: Circuito cerrado con sección de ensayos abierta (Tipo Prandtl) [4]**

Dadas sus particulares características, los singulares túneles de viento de tipo Eiffel deben instalar mecanismos de control de flujo, que impidan una mayor entrada de aire al circuito por la sección de test que por la propia sección de entrada diseñada con tal fin. Las instalaciones de tipo NPL, por su parte, suelen presentar graves problemas de fluctuación de flujo que requieren de cuidadosos diagnósticos post-construcción y medidas correctoras.

Por ellos nuestro túnel de viento está pensado para ser diseñado con circuito cerrado, con sección de ensayos cerrada y a baja velocidad.

## 3 TEORÍAS DE FLUJO

Para poder comprender lo que vamos a desarrollar en los apartados siguientes, es necesario realizar un conjunto de explicaciones sobre los términos que se van a emplear.

### 3.1 FLUJO LAMINAR

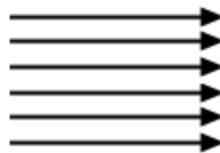


Figura 3.1: Representación de líneas de flujo laminar [5]

Se llama flujo laminar o corriente laminar, al tipo de movimiento de un fluido cuando éste es perfectamente ordenado, suave, de manera que el fluido se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse. Se dice que este flujo es aerodinámico, es decir, cada partícula de fluido sigue una trayectoria suave, llamada línea de corriente [4].

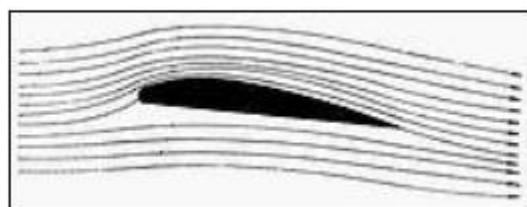


Figura 3.2: Líneas de flujo laminar a través de un perfil NACA [4]

La pérdida de energía es proporcional a la velocidad media. El perfil de velocidades tiene forma de una parábola, donde la velocidad máxima se encuentra en el eje del tubo y la velocidad es igual a cero en la pared del tubo.

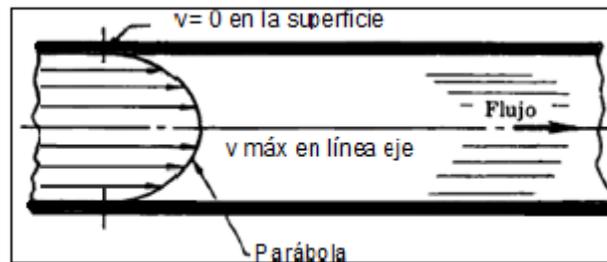


Figura 3.3: Distribución de velocidades de un fluido a través de una tubería [4]

Existe flujo laminar en fluidos con velocidades bajas o viscosidades altas, cuando se cumple que el número de Reynolds es inferior a 2300. Más allá de este número, será un flujo turbulento.

### 3.2 FLUJO TURBULENTO

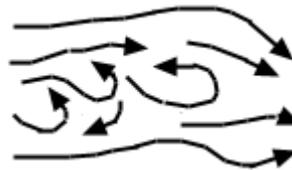


Figura 3.4: Representación de líneas de flujo turbulento [5]

El flujo turbulento es más comúnmente desarrollado debido a que la naturaleza tiene tendencia hacia el desorden y esto en términos de flujos significa tendencia hacia la turbulencia. Este tipo de flujo se caracteriza por trayectorias circulares erráticas, semejantes a remolinos. El flujo turbulento ocurre cuando las velocidades de flujo son generalmente muy altas o en fluidos en los que las fuerzas viscosas son muy pequeñas.

La turbulencia puede originarse por la presencia de paredes en contacto con el fluido o por la existencia de capas que se muevan a diferentes velocidades. Además, un flujo turbulento puede desarrollarse bien sea en un conducto liso o en conducto rugoso.

Se define como flujo turbulento al fluido que presenta un número de Reynolds mayor a 4000 [4].

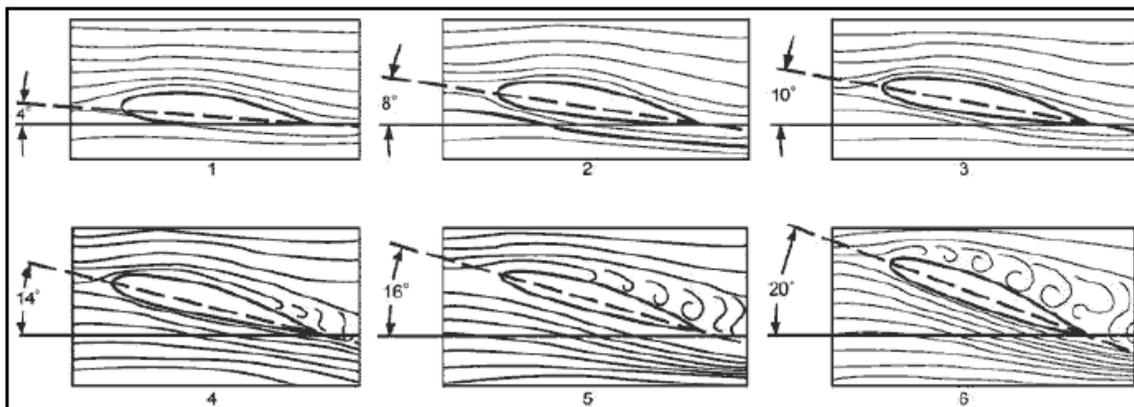


Figura 3.5: Desarrollo de un flujo a través de diferentes posiciones de un perfil NACA [4]

### 3.3 CAPA LÍMITE

Cuando un fluido fluye sobre una superficie, debido a la fricción, la capa más cercana a la superficie se detiene completamente. Encima de esta capa se forman otras, cada una de las cuales tiene menos fricción que la anterior y por tanto mayor velocidad. Así hasta que a partir de una capa concreta no hay fricción y las capas tienen la velocidad libre del fluido.

Al conjunto de capas que van desde la que tiene velocidad cero (la más cercana al ala) hasta la que tiene velocidad libre, se le llama capa límite. A la distancia entre la primera y la última capa, es denominada como espesor de la capa límite.

El espesor de la capa límite suele aumentar a medida que el fluido se mueve a lo largo de la superficie. La cantidad de este aumento depende de la viscosidad del flujo, la suavidad y rugosidad de la superficie, y la forma de esta [4].

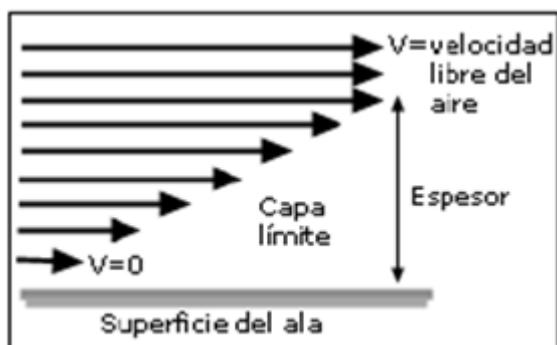


Figura 3.6: Capa límite. Perfil de velocidades [4]

A la capa límite cuyo flujo es laminar se le suele llamar capa límite laminar, que a veces se abrevia como capa laminar, mientras que si el flujo es turbulento, la capa recibe el nombre de capa límite turbulenta, abreviada como capa turbulenta.

Cuando la capa límite comienza a fluir por el borde de ataque del ala, lo hace en forma de capa laminar, pegada al ala y muy fina; pero a medida que fluye hacia el borde de salida, más o menos por el centro del ala, comienza a perder velocidad debido a la fricción y se va haciendo capa turbulenta, más separada y con más grosor. Mientras la capa es laminar, se mantiene pegada al ala y produce sustentación, pero al convertirse en turbulenta aumenta su separación del ala y no produce sustentación. El punto en el cual la capa laminar se va convirtiendo en turbulenta e incrementa su grosor se denomina “transición a turbulencia” o “transición de capa límite”.

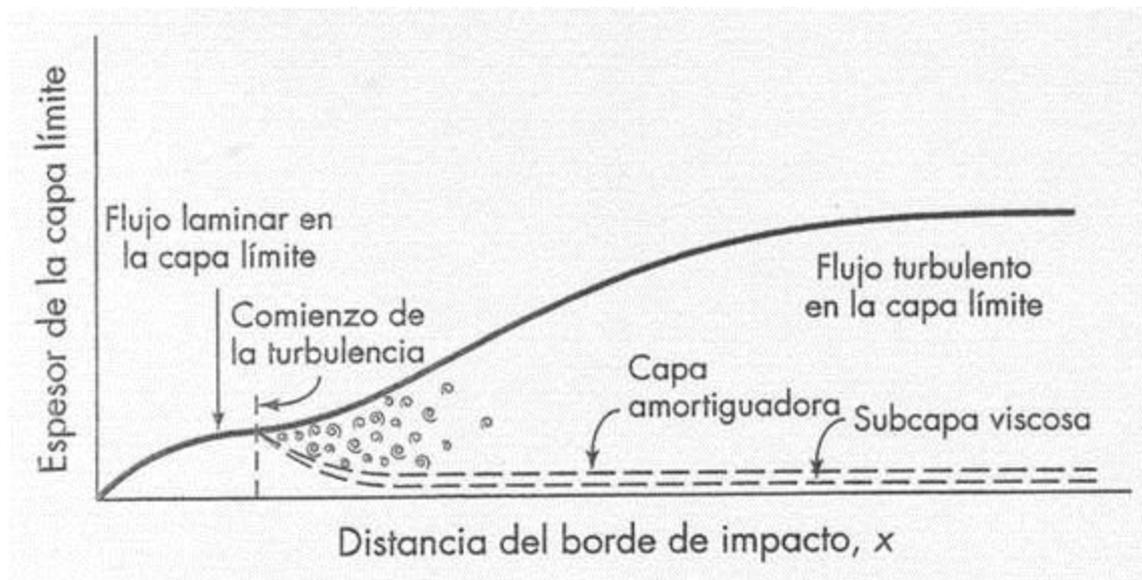


Figura 3.7: Desarrollo de la turbulencia en la capa límite [1]

### 3.4 TEOREMA DE BERNOULLI

El teorema de Bernoulli afirma que energía total de un sistema de fluidos con flujo uniforme permanece constante a lo largo de la trayectoria de flujo. En un fluido hay tres formas de energía presentes; la energía potencial, la energía cinética y la energía de flujo. Si se asumen dos puntos a lo largo de la trayectoria, distanciados uno del otro, la magnitud de las energías en un punto pueden variar con respecto al otro, pero la sumatoria total de las energías siempre será la misma [4].

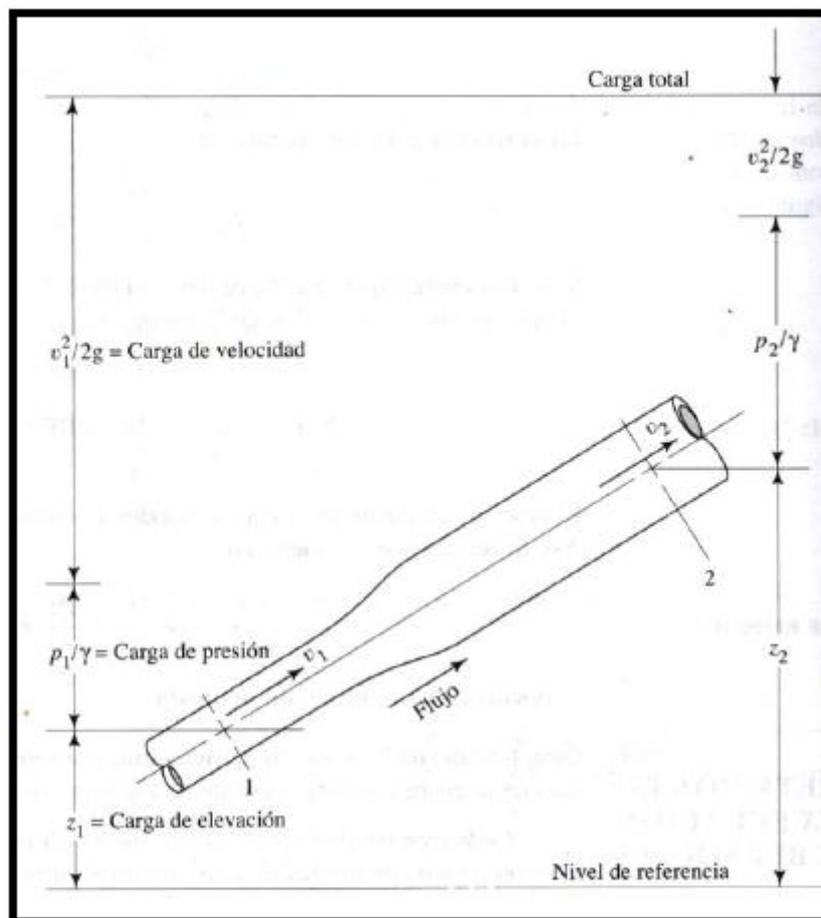


Figura 3.8: Gráfico demostrativo del teorema de Bernoulli [4]

La ecuación de Bernoulli se usa para determinar los valores de carga de presión, carga de elevación y cambio de la carga de velocidad, conforme el fluido circula a través del sistema.

Ecuación de Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{v_1}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{v_2}{2g} \quad (3.1)$$

Donde:

$P_1$ : Presión estática a la que está sometido el fluido en el punto 1

$P_2$ : Presión estática a la que está sometido el fluido en el punto 2

$\gamma$ : Peso específico del fluido

$v_1$ : Velocidad del fluido en el punto 1

$v_2$ : Velocidad del fluido en el punto 2

$Z_1$ : Altura sobre el nivel de referencia 1

$Z_2$ : Altura sobre el nivel de referencia 2

$g$ : Valor de la aceleración de la gravedad  $9.81 \frac{m}{s^2}$  en la superficie de la tierra

### 3.5 EFECTO VENTURI

Cuando el desnivel es cero, la tubería es horizontal. Tenemos entonces, el denominado tubo de Venturi, cuya aplicación práctica es la medida de la velocidad del fluido en una tubería. El manómetro mide la diferencia de presión entre las dos ramas de la tubería [4].

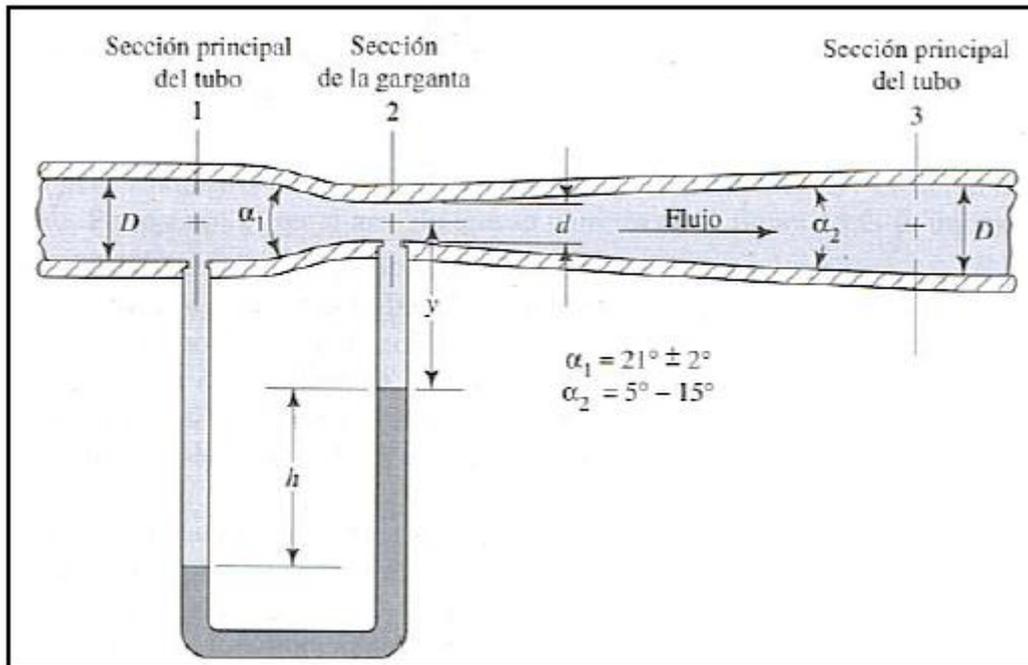


Figura 3.9: Gráfico demostrativo del Efecto de Venturi [4]

La ecuación de continuidad se escribe:

$$v_1 S_1 = v_2 S_2 \quad (3.2)$$

Donde:

$v_1$ : Velocidad del fluido en el punto 1

$v_2$ : Velocidad del fluido en el punto 2

$S_1$ : Sección área 1

$S_2$ : Sección área 2

Que nos dice que la velocidad del fluido en el tramo de la tubería que tiene menor sección es mayor que la velocidad del fluido en el tramo que tiene mayor sección. Si  $S_1 > S_2$ , se concluye que  $v_1 < v_2$

En la ecuación de Bernoulli con  $Z_1 = Z_2$ , donde  $Z_1$  y  $Z_2$  están a la misma altura:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \quad (3.3)$$

Como la velocidad en el tramo de menor sección es mayor, la presión en dicho tramo es menor.

Si  $v_1 < v_2$  se concluye que  $P_1 > P_2$ . El líquido manométrico desciende por el lado izquierdo y asciende por el derecho.

Podemos obtener las velocidades  $v_1$  y  $v_2$  en cada tramo de la tubería a partir de la lectura de la diferencia de presión  $P_1 - P_2$  en el manómetro.

$$v_2 = S_1 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(S_1^2 - S_2^2)}} \quad (3.4)$$

### 3.6 TEORÍA DE DARCY-WEISBACH

El francés Henry Darcy y el alemán Julius Weisbach dedujeron experimentalmente una fórmula para calcular en un tubo las pérdidas por fricción [6]:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (3.5)$$

Donde:

$h_f$ : Pérdida de carga debida a la fricción

$f$ : Factor de fricción de Darcy

$L$ : Longitud de la tubería

$D$ : Diámetro de la tubería

$v$ : Velocidad media del fluido

$g$ : Aceleración de la gravedad  $9.81 \frac{m}{s^2}$

El francés Jean Marie Louis Poiseuille y el alemán Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen, fueron los primeros en determinar matemáticamente el factor de fricción de Darcy-Weisbach en flujo laminar y obtuvo una ecuación para determinar dicho factor, que es:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (3.6)$$

La cual es válida para tubos lisos o rugosos.

Para el flujo turbulento, el factor de fricción de Darcy-Weisbach se deduce mediante la ecuación desarrollada por los físicos Colebrook y White:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left( \frac{k/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}} \right) \quad (3.7)$$

### 3.7 TEORÍA DE PRANDTL

Según [7], en 1904, Ludwig Prandtl publicó uno de los más importantes artículos de la Mecánica de Fluidos, consiguiendo enlazar la teoría clásica con los resultados sobre fricción de cuerpos sumergidos. Prandtl introdujo el concepto de *capa límite*.

En términos generales se puede decir que, puesto que la viscosidad es bastante pequeña en casi todos los fluidos, los esfuerzos de corte deben ser apreciables únicamente en las regiones en donde existan grandes gradientes de velocidad; el flujo en otras regiones se podría describir con gran exactitud por medio de las ecuaciones para flujo no viscoso.

Por efecto de la viscosidad, las partículas de fluido que están en contacto con una pared se ponen a la velocidad de la pared.

Prandtl estableció las ecuaciones para el flujo en la capa límite laminar, a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes, con las siguientes hipótesis: el espesor de la capa límite es pequeño en comparación con otras dimensiones geométricas, el flujo es estacionario y bidimensional, y la presión es constante a través de cualquier sección transversal.

Un discípulo de Prandtl, Blasius, resolvió analíticamente las ecuaciones para la capa límite laminar sobre una placa plana sin gradiente de presión, obteniendo una expresión del espesor de la capa límite en la zona laminar que se adapta bastante bien a los resultados obtenidos de forma experimental.

$$\delta = \frac{4.91x}{\sqrt{Re_x}} \quad (3.8)$$

En donde  $Re_x$  es el número de Reynolds asociado a la distancia  $x$  desde el borde de ataque a la sección considerada:

$$Re_x = \frac{U_0 x}{\nu} \quad (3.9)$$

### 3.8 NÚMERO DE REYNOLDS

El número de Reynolds ( $Re$ ) es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos, diseño de reactores y fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento de un fluido. Este número recibe su nombre en honor de Osborne Reynolds (1842-1912), quien lo describió en 1883.

El número de Reynolds relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo, en una expresión adimensional, que interviene en numerosos problemas de dinámica de fluidos. Dicho número o combinación adimensional aparece en muchos casos relacionado con el hecho de que el flujo pueda considerarse laminar (número de Reynolds pequeño) o turbulento (número de Reynolds grande). Desde un punto de vista matemático, el número de Reynolds de un problema o situación concreta se define por medio de la siguiente fórmula:

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu} \quad (3.10)$$

O equivalentemente por:

$$Re = \frac{v_s D}{\nu} \quad (3.11)$$

Donde:

$\rho$ : Densidad del fluido

$v_s$ : Velocidad característica del fluido

$D$ : Diámetro de la tubería a través del cual circula el fluido o longitud característica del fluido

$\mu$ : Viscosidad dinámica del fluido

$\nu$ : Viscosidad cinemática del fluido

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.12)$$

El mecanismo y muchas de las razones por las cuales un flujo es laminar o turbulento es todavía hoy objeto de especulación [8].

### 3.9 NÚMERO DE MACH

Uno de los parámetros más importantes de los flujos unidimensionales que se presentan en el análisis de flujo, es el número de Mach,  $M$  el cual es la relación de la velocidad local del flujo a la velocidad local del sonido dentro del fluido, es decir,

$$M = \frac{V}{c} \quad (3.13)$$

Donde:

$V$ : Velocidad local

$c$ : Velocidad del sonido (341  $m/s$  en la superficie terrestre)

El número de Mach es una de las medidas importantes que tiene un flujo determinado. En el sentido de fuerzas, el número de Mach es la relación existente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas originadas por la compresibilidad del fluido. El número de Mach es un término utilizado para tratar el movimiento de los fluidos sobre los objetos.

El número de Mach recibió ese nombre en honor a Ernst Mach (1838-1916), quien condujo los primeros experimentos significativos relacionados con el vuelo supersónico [9].

# 4 HERRAMIENTAS EMPLEADAS

---

## 4.1 PRO/ENGINEER

Pro/ENGINEER es un producto de 3D CAD/CAM/CAE del fabricante 'PTC, Parametric Technology Corporation', que ofrece nuevas oportunidades en el proceso de diseño, haciendo que el proceso de desarrollo sea aún más rápido, más eficiente e innovador. La versión empleada en este proyecto es Pro/E Wildfire 5.0.

Pro/ENGINEER Wildfire 5.0 es un software de diseño paramétrico. Éste es muy popular entre diseñadores mecánicos. Una de las fortalezas de Pro-E es la implementación de una suite para diseño mecánico, análisis de comportamiento (esfuerzos, térmicos, fatiga, eléctrico) y la creación de archivos para CAM.

En este programa se puede realizar el diseño de distintas piezas con un entorno de trabajo dinámico, eficaz e intuitivo que hace más fácil la tarea de diseñar aquello que se desee. A su vez, el programa cuenta con un módulo para realizar el ensamblaje de las distintas piezas diseñadas para crear un conjunto que trabaje solidariamente y así poder analizar todo el conjunto y las interrelaciones entre las distintas partes ensambladas. También permite generar los planos de las piezas, del conjunto y del esquema de ensamblaje entre otras muchas opciones avanzadas con las que cuenta el programa [10].

Para este proyecto, la utilización del software Pro/E se centrará en la creación y modelado de las piezas en 3D constituyentes del túnel de viento, el ensamblaje de las mismas y los planos correspondientes. La herramienta de CAD (Computer Aided Design) se utiliza en la primera fase del diseño (definición de la geometría) del túnel de viento, ya que las herramientas de análisis y simulación se apoyan en dicha geometría.

El uso de aplicaciones de modelado de sólidos está siendo cada vez más extendido, y cada vez son más los fabricantes y diseñadores que están implementando técnicas de modelado de sólidos en los sistemas de CAD.

Una gran ventaja de las aplicaciones de modelado de sólidos es que éstas son paramétricas, es decir, la geometría está totalmente basada en parámetros (o dimensiones). Al variar el valor de uno de estos parámetros, podremos variar fácilmente la geometría del modelo asociado a ese parámetro. Esto requiere que el modelo este correctamente parametrizado. Esto es muy importante, ya que como hemos comentado anteriormente, una modificación en

el modelo puede llegar a ser, en ocasiones, algo traumático si éste no estuviese convenientemente parametrizado.

Hay que tener presente que las herramientas de CAD son meras herramientas de dibujo, por lo cual, antes de proceder con el diseño es necesario tener claro que es lo que queremos conseguir, saber cuáles son las especificaciones de partida, conocer cuántas piezas tendrá nuestro conjunto y cómo se conectan entre ellas. Por lo tanto es importante conocer las funciones disponibles del software, para poder combinarlas adecuadamente.

### **4.2 ANÁLISIS CFD**

Poder tener una herramienta de cálculo que facilite los trabajos de investigación, es algo que siempre se ha buscado a la hora de realizar cualquier estudio. La utilización de análisis computacional de fluidos dinámicos (CFD) se ha hecho cada vez más imprescindible en la industria desde su introducción. La simulación CFD es también el único método fiable para obtener predicciones fiables de flujos internos como los que ocurren en un motor o un conducto.

Una ventaja principal es la utilidad de los datos que se obtienen. Con un cálculo convergido, la obtención de distribución de presiones, el desarrollo del flujo a través del campo fluido o la obtención de fuerzas se obtienen de manera inmediata, mientras que con técnicas experimentales se necesita una cantidad enorme de tiempo y esfuerzo para obtener los mismos resultados.

Desgraciadamente, ninguna herramienta es infalible y todo tiene sus limitaciones. En el caso del análisis CFD, reside en la capacidad computacional de los microprocesadores que se empleen. Por tanto, aunque es posible diseñar mallas con millones de celdas para obtener datos exactos, su característica más importante, la rapidez, se vería mermada. Por tanto, el trabajo habitual consiste en desarrollar mallas aproximadas a la realidad, con márgenes de error aceptables y que requieran un menor tiempo de cálculo [1].

Para este Proyecto, se ha contado con el programa de simulación CFD Ansys Workbench.

### 4.2.1 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

El análisis computacional de fluidos dinámicos, es una herramienta informática que permite simular el comportamiento de campos fluidos, fenómenos de transferencia de calor y materia.

La finalidad del CFD es resolver las ecuaciones que definen cualquier tipo de fluido:

- Las ecuaciones de conservación de materia
- Las ecuaciones de cantidad de movimiento
- Las ecuaciones de energía

El dominio fluido a resolver debe estar discretizado con la ayuda de celdas en 2D o 3D, de acuerdo con el problema. Las ecuaciones algebraicas a realizar deben convertirse en valores numéricos a partir de técnicas matemáticas como la utilización de volúmenes o elementos finitos. Dadas estas condiciones, entonces es posible realizar un conjunto de iteraciones de cálculo para obtener soluciones que resuelvan las ecuaciones numéricas.

Basándonos en la comparación entre los resultados experimentales y mediante CFD, se ha probado que pueden llegar a ser realmente similares mediante un buen control de los errores numéricos que se pueden producir, así como de la correcta definición de las condiciones de contorno [1].

### 4.2.2 THE REYNOLDS AVERAGED NAVIER STOKES EQUATIONS (RANS)

Durante este proyecto, las simulaciones se realizarán con el programa ANSYS Workbench, que utiliza las ecuaciones RANS. Dichas ecuaciones se basan en el comportamiento estadístico del estado de todos los parámetros en el flujo turbulento como la velocidad o la presión.

La resolución de los campos instantáneos de velocidad y presión resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes no es viable y resulta innecesario en el campo de la ingeniería. Por tanto se utilizan valores promediados de los parámetros de cálculo.

Dado un fluido estadísticamente estacionario, se puede definir el promedio temporal de la siguiente manera.

$$\bar{u}(x, y, z) = \frac{1}{T} \int_0^T u(x, y, z, t) dt \quad (4.1)$$

Donde  $\bar{u}$  indica la velocidad promedio. Para considerar el valor promedio independientemente del tiempo, es necesario un tiempo de integración  $T$  suficientemente grande. De esta manera, los valores instantáneos de las variables se pueden descomponer en la suma de un valor medio y una fluctuación:

$$u(x, y, z) = \bar{u}(x, y, z) + u'(x, y, z) \quad (4.2)$$

Así pues, una vez definidas las variables fluidas instantáneas, se pueden obtener las ecuaciones de Navier-Stokes para los valores promedio:

$$\frac{d\bar{u}}{dx} + \frac{d\bar{v}}{dy} = 0 \quad (4.3)$$

$$\rho\bar{u}\frac{d\bar{u}}{dx} + \rho\bar{v}\frac{d\bar{v}}{dy} = -\frac{d\bar{p}}{dx} + \mu\left(\frac{d^2\bar{u}}{dx^2} + \frac{d^2\bar{u}}{dy^2}\right) - \rho\frac{d\overline{u'^2}}{dx} - \rho\frac{d\overline{u'v'}}{dy} \quad (4.4)$$

$$\rho\bar{u}\frac{d\bar{v}}{dx} + \rho\bar{v}\frac{d\bar{v}}{dy} = -\frac{d\bar{p}}{dy} + \mu\left(\frac{d^2\bar{v}}{dx^2} + \frac{d^2\bar{v}}{dy^2}\right) - \rho\frac{d\overline{u'v'}}{dx} - \rho\frac{d\overline{v'^2}}{dy} \quad (4.5)$$

Estos valores contienen, a parte de los valores medios de las variables, los valores medios de productos o correlaciones de las fluctuaciones de velocidad. Los términos que representan las correlaciones  $-\overline{\rho u'^2}$ ,  $-\overline{\rho u'v'}$ ,  $-\overline{\rho v'^2}$  se denominan esfuerzos turbulentos, porque tienen dimensiones de esfuerzo y pueden escribirse en las ecuaciones junto con los esfuerzos viscosos. Estos esfuerzos son el efecto de la turbulencia sobre el flujo medio y son mucho mayores que los esfuerzos viscosos. Así pues, por ejemplo, podría escribirse la componente x de la ecuación de cantidad de movimiento como:

$$\rho\bar{u}\frac{d\bar{u}}{dx} + \rho\bar{v}\frac{d\bar{v}}{dy} = -\frac{d\bar{p}}{dx} + \frac{d}{dx}\left(\mu\frac{d\bar{u}}{dx} - \overline{\rho u'^2}\right) - \frac{d}{dy}\left(\mu\frac{d\bar{u}}{dy} - \overline{\rho u'v'}\right) \quad (4.6)$$

Los esfuerzos turbulentos son nuevas incógnitas en el sistema de ecuaciones, con lo cual deberíamos resolver un total de 6 términos independientes y deben relacionarse de alguna manera con los valores promedio.

Este es el objetivo fundamental de los modelos de turbulencia: un modelo de turbulencia permite expresar los términos adicionales  $\overline{u'^2}, \overline{u'v'}, \overline{v'^2}$  en función de las variables conocidas del sistema de ecuaciones  $\bar{u}, \bar{v}$ .

Una de las hipótesis más utilizadas en ingeniería, es la de Boussinesq, que sugiere que los esfuerzos turbulentos son proporcionales a la velocidad media. La constante de proporcionalidad se denomina viscosidad turbulenta  $\mu_t$ .

Las ecuaciones RANS tienen menos carga computacional que otras relaciones como LES (Large Eddy Simulation) donde se resuelven las ecuaciones que gobiernan los movimientos turbulentos de gran escala o DNS (Direct Numerical Simulation) que resuelve todas las ecuaciones en cada escala de tiempo y espacio. Aunque estas últimas son quizás más exactas, depende de una gran cantidad de tiempo de cálculo, mientras que las RANS, ofrece unos resultados aceptables en poco tiempo [1].

### 4.2.3 LOS MODELOS TURBULENTOS

Cuando utilizamos las ecuaciones RANS donde los esfuerzos turbulentos se modelan con la hipótesis de Boussinesq, es necesario determinar el valor de la viscosidad turbulenta, que es una propiedad del fluido y su valor se debe iterar en cada punto considerado. Con este objetivo, se han desarrollado un conjunto de modelos como Spalart-Allmaras o k- $\epsilon$  [1].

### 4.2.4 EL MODELO TURBULENTO SPALART-ALLMARAS

El modelo turbulento Spalart-Allmaras es un modelo bastante simple, que resuelve sólo una ecuación de transporte para la viscosidad cinemática. Es un modelo diseñado sobretodo para la caracterización de flujos que rodean superficies sólidas como alas, perfiles o cuerpos. Últimamente está ganando popularidad en aplicaciones para turbomáquinas.

En FLUENT la utilización de este modelo se ha implantado para utilizar funciones de pared cuando la malla no es lo suficientemente fina. Por tanto se considera una de las mejores elecciones para simulaciones ordinarias en mallas bastas cuando el cálculo exacto de flujo turbulento no es crítico.

Con la finalidad de evaluar la viscosidad turbulenta, se describe la ecuación de transporte para la energía cinética k:

$$\frac{d}{dx_i}(\rho u_i k) = \frac{d}{dx_i}\left(\mu \frac{dk}{dx_i}\right) + \frac{d}{dx_i}\left(\overline{p'u'_i} + \frac{1}{2}\overline{\rho u'_i u'_i u'_i}\right) + \overline{\rho u'_i u'_j} \frac{du_i}{dx_i} + \rho \varepsilon \quad (4.7)$$

En esta ecuación, es importante definir la naturaleza de sus componentes. El primer término de la parte derecha de la ecuación, representa el transporte de energía cinética turbulenta, mientras que el segundo representa el transporte de los esfuerzos turbulentos y las fluctuaciones de presión. Esta última expresión puede escribirse como:

$$\frac{d}{dx_i}\left(\overline{p'u'_i} + \frac{1}{2}\overline{\rho u'_i u'_i u'_i}\right) \approx \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{dk}{dx_i} \quad (4.8)$$

Donde:

$\sigma_k$ : es el número de Prandtl.

El tercer término de la ecuación de la ecuación es el factor de producción donde se utiliza la hipótesis de Boussinesq para representar los esfuerzos turbulentos. Finalmente, el último término es la producción de densidad y el ratio de disipación, donde:

$$\varepsilon \approx \frac{k^{2/3}}{\zeta} \quad (4.9)$$

La debilidad de este modelo es que se debe tomar un valor de la escala de turbulencias representada por  $\zeta$ .

Como veremos a lo largo del proyecto, los estudios realizados en él se basan en la utilización del modelo turbulento Spallart-Allmaras [1].

# 5 CARACTERIZACIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO

---

## 5.1 INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas que se encuentran con rapidez en la literatura de túneles de viento, es que parece que las constantes experimentales, las relaciones y los resultados se presentan de una forma bastante entrelazada con la teoría, y así es difícil separar o distinguir la información que proviene de fuentes principalmente empíricas, de los conocimientos que se soportan en modelos y conceptos teóricos que permiten entender por qué ocurren ciertos fenómenos que obligan a tomar decisiones y elegir valores de ciertos parámetros.

## 5.2 MARCO TEÓRICO GENERAL

Según [11], en un túnel de viento se desea tener un flujo controlado para poner a prueba dos cosas: por una parte, los modelos teóricos y conceptos que se tienen para algunas situaciones controladas como el régimen laminar, y por otra parte los valores empíricos con los que deben manejarse situaciones más complejas como el régimen turbulento. Es la mezcla de ambas búsquedas lo que a menudo hace que la literatura de túneles de viento sea un poco indescifrable y confusa para un primerísimo acercamiento.

Lo primero que debe observarse, es ¿por qué si la teoría de Reynolds, Darcy, Bernoulli, y buena parte de la teoría de fluidos que se utiliza aquí, se dedujo en experimentos con líquidos, es válido utilizarla para explicar el flujo de aire? Si la velocidad de un fluido es menor que 0.3 Mach (o sea menor que 100m/s), la velocidad se considera subsónica. En nuestro experimento se cumple esta condición, de forma que el valor de densidad del aire puede considerarse constante; además, el aire tiene asociados valores de viscosidad dinámica, de forma que parece que están dadas las condiciones para considerar aplicable la teoría.

Este régimen está genialmente asociado al número de Reynolds  $Re$ , que encontró este número adimensional tratando de distinguir en qué momento la resistencia de un fluido contra el movimiento de un cuerpo pasaba de ser proporcional a la velocidad del cuerpo, a ser proporcional al cuadrado de la velocidad del mismo. Por otra parte, la dinámica del aire dentro del túnel tiene varios conceptos asociados: en la frontera del fluido en contacto con el sólido que lo contiene, se considera que la velocidad de las partículas es nula; en el régimen laminar ese flujo puede ser descrito en forma de capas que viajan paralelamente, y que ejercen entre sí una fuerza cortante, caracterizada por la constante de viscosidad que, como observó Reynolds en su artículo original, le aporta al fluido una estabilidad que hace que sea más difícil lograr la turbulencia en un fluido con alta viscosidad; en esas capas la velocidad no es la misma, de forma que tenemos un perfil de velocidades normalmente descrito por la ley de Prandtl, y asimismo una velocidad promedio asociada a dicho perfil.

En la variación angular de la sección transversal para la salida del aire, si el ángulo es demasiado grande, se corre el riesgo de tener un desprendimiento de capa límite; la turbulencia es reducida con ayuda de un panel de abejas para eliminar la turbulencia en un rango de ángulos de velocidad, y posteriormente una malla con agujeros más pequeños que el primero, para eliminar turbulencias en nuevos ángulos de las componentes de velocidad de las moléculas de aire. Durante el paso por el panel de abejas, así como el paso por la sección de prueba, existen pérdidas de presión que se modelan con base en la ecuación de Darcy-Weisbach principalmente.

Así, parte de la caracterización del túnel de viento consiste precisamente en indagar estas pérdidas de presión y por lo tanto de potencia, aproximándonos a entender en qué se está gastando la energía al mover aire dentro del túnel, tratando de relacionar las partes del montaje.

Finalmente, sabemos que el cambio de escala aerodinámica está validado por los parámetros de similaridad: si en un experimento pueden reproducirse el número de Reynolds, como indicador de viscosidad y turbulencia, y el número de Mach como indicador de compresibilidad del aire, se considera que las conclusiones del experimento son aplicables a escala real. También sabemos que en un túnel de esta escala el número de Reynolds es notablemente menor que por ejemplo, experimentos de aviones en donde  $Re$  pueden ser de varios millones. No obstante, los conceptos, la instrumentación aplicada, y la velocidad que se ha logrado en el túnel, abren una línea de aprendizajes muy interesante con este tipo de montajes.

### 5.3 FLUJO DENTRO DEL TÚNEL

En fluidos se escucha a menudo la expresión “pérdida de presión” de un fluido después de pasar por alguna parte. Pero, ¿cómo puede traducirse al diseño de un túnel de viento, y su caracterización una vez construido?

Las pérdidas de presión pueden traducirse a pérdidas de potencia al observar que buena parte de esas pérdidas pueden darse a una velocidad que varía dentro de un cierto rango, y por lo tanto se puede asociar una velocidad promedio a todo este rango. Así, tomando esta velocidad promedio y multiplicándola por las pérdidas de presión, tenemos un estimado para las pérdidas de potencia – y por lo tanto de energía – en un túnel [11].

$$\Delta Potencia = v_{avg} \Delta presión \quad (5.1)$$

La ecuación de Bernoulli puede deducirse como una forma del teorema de trabajo-energía, o si se quiere como una manifestación de la conservación de la energía. Sin embargo, estas pérdidas obligan a la necesidad de generalizar un poco esa ecuación. En general, la ecuación de Bernoulli tiene varias restricciones:

- No hay pérdidas de energía a fricción
- No hay pérdidas de energía debidas a intercambio de calor. Se supone que no hay intercambiador de calor con el medio externo o con el contenedor del fluido
- Se supone que no hay bombas o fuentes de energía dentro del circuito
- Se deduce para fluidos incompresibles

Como se ha dicho antes, la última suposición se considerará aplicable a lo largo del presente trabajo. Sobre el tercer punto, hay que considerar que nuestro ventilador es una bomba en el circuito de aire del túnel. Una bomba es un dispositivo mecánico que añade energía a un fluido, por lo tanto dicho ventilador es la única fuente de energía dentro del túnel.

Acercas del primer punto, ya se han mencionado las pérdidas debidas a la viscosidad y a las capas del fluido en la frontera con las paredes internas del túnel [11].

### 5.4 CÁLCULO DE SECCIONES

Para el cálculo de las secciones analizamos primero el tipo de fluido que las atravesará, en este caso aire [12].

- Aire (aire a presión atmosférica)  $P_{atm} = 101325 Pa$
- Se analiza en régimen estacionario
- Velocidad en sección de pruebas  $V_p = 50 m/s$
- Se supone flujo incompresible (Si  $v < 100 m/s \rightarrow M < 0.3$ , se considera flujo incompresible)

$$\bullet \left\{ \begin{array}{l} \rho_{aire} = 1.225 \text{ Kg}/m^3 \\ C_{p_{aire}} = 1006 \text{ J}/\text{Kg} \cdot K \\ \lambda_{aire} = 0.0242 \text{ W}/m \cdot K \\ \mu_{aire} = 1.7894 \cdot 10^{-5} \text{ Kg}/m \cdot s \end{array} \right.$$

Donde:

$\rho_{aire}$ : Densidad del aire

$C_{p_{aire}}$ : Calor específico del aire

$\lambda_{aire}$ : Conductividad térmica del aire

$\mu_{aire}$ : Viscosidad dinámica del aire

Comprobamos el gasto másico y caudal de aire en la sección de ensayos:

$$\dot{m}_{se} = \rho_{aire} \cdot v_{se} \cdot A_{se} \quad (5.2)$$

$$\dot{m} = 1.225 \text{ Kg/m}^3 \cdot 50 \text{ m/s} \cdot 0.15 \text{ m}^2 = 9.1875 \text{ Kg/s}$$

$$Q = \frac{\dot{m}_{se}}{\rho_{aire}} \quad (5.3)$$

$$Q_{se} = \frac{9.1875 \text{ Kg/s}}{1.225 \text{ Kg/m}^3} = 7.5 \text{ m}^3/\text{s}$$

Donde:

$\dot{m}_{se}$ : Gasto másico de aire en la sección de ensayos

$\rho_{aire}$ : Densidad del aire

$v_{se}$ : Velocidad en la sección de ensayos

$A_{se}$ : Área en la sección de ensayos

$Q_{se}$ : Caudal de aire en la sección de ensayos

El área de la sección de ensayos viene dada por:

$$A_{se} = 0.15m^2$$

$$D_{eq} = L$$

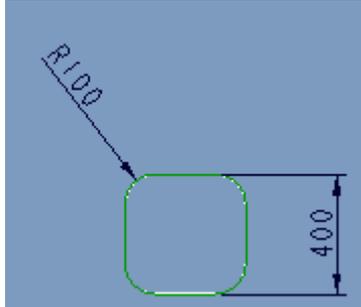


Figura 5.1: Dimensiones de la sección de ensayos

## 5.4.1 CÁLCULO DE VELOCIDADES Y NÚMERO DE REYNOLDS POR SECCIONES

Pasamos a calcular las velocidades por secciones utilizando la (3.2) (3.2 de este trabajo):

$$v_1 S_1 = v_2 S_2$$

Y con la (3.10), calculamos el número de Reynolds por secciones:

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu}$$

- Tubería de expansión inicial

$$Re_1 = 944730$$

$$v_2 = \frac{32 \text{ m/s} \cdot 0.34 \text{ m}^2}{0.6 \text{ m}^2} = 13 \text{ m/s}$$

$$Re_2 = 711970$$

Donde:

$v_1$ : Velocidad del ventilador ( $32 \text{ m/s}$ )

$S_1$ : Área de la sección  $L = 0.6\text{m}$  ( $0.34\text{m}^2$ )

$S_2$ : Área de la sección  $L = 0.8\text{m}$  ( $0.6\text{m}^2$ )

- Salida de la tubería media-luna de 800mm

$$v_2 S_2 = v_3 S_3$$

$$v_3 = \frac{13 \text{ m/s} \cdot 0.6\text{m}^2}{1.36\text{m}^2} = 5.7 \text{ m/s}$$

$$Re_3 = 468257$$

Donde:

$v_2$ : Velocidad en la salida de la tubería de media-luna ( $13 \text{ m/s}$ )

$S_2$ : Área de la sección  $L = 0.8\text{m}$  ( $0.6\text{m}^2$ )

$S_3$ : Área de la sección  $L = 1.2\text{m}$  ( $1.36\text{m}^2$ )

- Salida de la cámara de acondicionamiento

$$v_3 S_3 = v_4 S_{se}$$

$$v_{se} = \frac{5.7 \text{ m/s} \cdot 1.36\text{m}^2}{0.15\text{m}^2} = 51.68 \text{ m/s}$$

$$Re_4 = 1415178$$

Donde:

$v_3$ : Velocidad en la entrada de la cámara de acondicionamiento  
( $5.7 \text{ m/s}$ )

$S_3$ : Área de la sección  $L = 1.2\text{m}$  ( $1.36\text{m}^2$ )

$S_{se}$ : Área de la sección de ensayos  $L = 0.4\text{m}$  ( $0.15\text{m}^2$ )

### 5.4.2 PÉRDIDAS DENTRO DEL TÚNEL

Si recorremos con el aire el túnel completo, podemos identificar las siguientes fuentes de pérdida de carga:

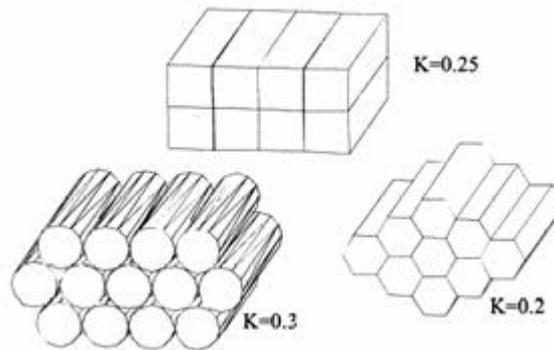
#### 5.4.2.1 Panel de abejas, en el ingreso al túnel

El panel de abejas es un panel de celdas que busca reducir la turbulencia. El aire debe pasar a través de cada tubo del panel de abejas, de manera que tenemos una cantidad de fluido pasando a través de varios tubos paralelos. Usando la metodología convencional que se hace en teoría de fluidos para calcular las caídas de presión en tubos paralelos, se considera que la diferencia de presión entre el ingreso y la salida del tubo es la misma para todas las ramas. Así que para cada rama se cumple la ecuación de Darcy-Weisbach [11], [13]:

$$P_L = f \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (5.4)$$

El factor  $f$  depende de la naturaleza del régimen: existe una fórmula diferente para  $f$  según si el régimen es laminar o turbulento.

Existen valores recomendados para algunos de los parámetros que definen el panel de abejas.



**Figura 5.2: Coeficientes de pérdida para diferentes geometrías del direccionador de flujo [13]**

En cuanto el aire ingresa dentro de cualquiera de los tubos del panel de abejas, las paredes del tubo empiezan a ejercer una fricción sobre algunas partículas del aire, y aquella zona en que se puede considerarse que las partículas sienten esa fuerza cortante, es llamada capa límite, que va abarcando cada vez una mayor parte de la sección transversal, hasta que puede considerarse que todas las partículas en una sección transversal son afectadas por la fuerza de viscosidad que es causada por el contacto con las paredes externas del flujo. Entonces las capas más cercanas a la frontera reducen su velocidad, y a su vez ejercen una influencia sobre las capas más alejadas de la frontera, aunque la fuerza que se aplica sobre estas últimas es menor, de forma que en el centro del tubo hay una velocidad máxima. De esta forma, el flujo de aire dentro del tubo empieza a adquirir un perfil de velocidades, a medida que avanza dentro del tubo, y dicho perfil empieza a desarrollarse en una forma definida al cabo de una cierta distancia, y por eso, si el tubo es lo suficientemente largo, tendrá una región en la que está completamente desarrollado.

A esa distancia necesaria para lograr el “total desarrollo” del flujo dentro del tubo, se le llamará longitud de entrada, que para el régimen laminar es del orden de  $0.05 ReD$ , y para régimen turbulento es del orden de  $10D$ , donde  $D$  es el diámetro interno del tubo, y  $Re$  es el número de Reynolds. La relación recomendada de largo ancho para el direccionador de flujo es:

$$\frac{L_h}{D_h} = 6 \quad (5.5)$$

Donde:

$D_h$ : Diámetro hidráulico de una celda del direccionador de flujo

$L_h$ : Espesor del direccionador de flujo

Con estos valores de la constante de pérdidas se tiene que el seleccionado es el circular, ya que es una propuesta de diseño utilizando cilindros tubulares de PVC. Esta propuesta es válida ya que las velocidades esperadas no son grandes.

Se tiene una configuración del panel de abejas con un espesor de paredes de 1mm y un ancho de celda de 10mm.

$$k_h = 0.3$$

### 5.4.2.2 Malla

Para continuar la reducción de turbulencia, posteriormente al panel de abejas, que filtraba principalmente turbulencias en sentido lateral o transversal, se coloca una malla cuyo efecto es reducir turbulencias en sentido axial. Se encuentran varias fórmulas empíricas para calcular las pérdidas en la malla. La porosidad de una malla está en función del diámetro y densidad de la malla como indica la siguiente ecuación. La porosidad es cero cuando es completamente sólida y 1 cuando está en el límite de desvanecimiento. Los valores típicos para la malla de un túnel de viento son de 0.5 a 0.8. El coeficiente de pérdidas de la malla es [11], [13]:

$$K_m = K_{mesh} K_{Rn} \sigma_s + \frac{\sigma_s}{\beta_s^2} \quad (5.6)$$

$$K_{mesh} = 1.3$$

Donde:

$K_{mesh}$ : Factor de mayado

= 1 Alambre metálico nuevo

= 1.3 Promedio alambres metálicos circulares

= 2.1 Hilo de seda

$K_{Rn}$ : Factor de Número de Reynolds del alambre

$\sigma_s$ : Solidez

$\beta_s$ : Porosidad (rangos usuales para un túnel de viento: 0.5 – 0.8)

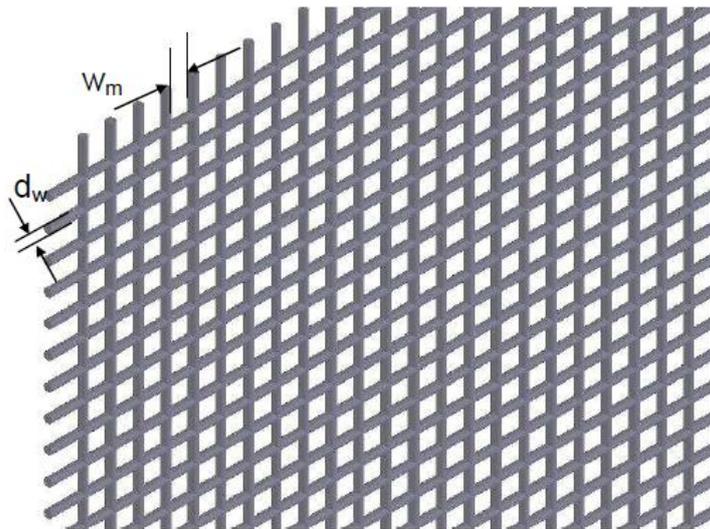


Figura 5.3: Geometría y nomenclatura de la malla [13]

$$d_w = 0.8mm$$

$$w_m = 0.75cm$$

Para el cálculo de la porosidad de la malla:

$$\beta_s = (1 - d_w \rho_m)^2 \quad (5.7)$$

## CARACTERIZACIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO

---

$$\beta_s = 0.798$$

Donde:

$d_w$ : Diámetro del alambre

$\rho_m$ : Densidad de mayado  $\rho_m = \frac{1}{w_m}$

$w_m$ : Ancho de una celda de mayado

Donde, la solidez de la malla se define como,

$$\sigma_s = 1 - \beta_s \quad (5.8)$$

$$\sigma_s = 0.202$$

El factor del número de Reynolds  $K_{Rn}$  toma dos valores dependiendo del número de Reynolds

Si  $0 \leq R_{ew} \leq 400$

$$K_{Rn} = 0.785 \left( \frac{R_{ew}}{241} + 1 \right)^{-4} + 1.01 \quad (5.9)$$

$$K_{Rn} = 1.04$$

Donde:

$R_{ew}$ : Número de Reynolds del alambre

$$R_{ew} = \frac{\rho V d_w}{\mu} \quad (5.10)$$

$$R_{ew} = 312.17$$

Si  $R_{ew} \geq 400$ :

$$K_{Rn} = 1$$

Por lo que tenemos que el factor de pérdidas en cada malla es:

$$K_m = 0.59$$

### 5.4.2.3 Contractor

De nuevo es necesario separar aquí la teoría de la información técnica y empírica. Conceptualmente, para explicar las pérdidas en una contracción se utilizan conceptos como la vena contracta, que para evitarse, obliga a que el ángulo de contracción sea pequeño, pero no demasiado pequeño para que el contractor no sea demasiado largo con el consiguiente aumento de masa dentro del contractor y aumento de área superficial en el interior del contractor con el respectivo incremento en las caídas de presión [11], [13].

Para calcular  $K_L$  para ángulos  $\theta$  mayores o iguales a  $45^\circ$ :

$$K_c = \frac{0.5 \left(1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2\right) \sqrt{\sin \frac{\theta}{2}}}{\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4} \quad (5.11)$$

$$K_c = 0.04$$

En donde  $d_2$  es el área de la sección pequeña de la contracción y  $d_1$  es el área de la sección grande, antes de la contracción.

### 5.4.2.4 Sección de prueba

La caída de presión aquí puede calcularse utilizando la fórmula de Darcy-Weisbach, teniendo en cuenta que la sección de prueba es “cuadrada”, así que se debe utilizar el diámetro hidráulico  $D_h$  en la fórmula mencionada en la ecuación anterior, al aplicar estas ecuaciones debe tenerse conciencia de que sólo son válidas en teoría cuando el fluido está totalmente desarrollado.

Las pérdidas de cambio de sección transversal son mencionadas en la sección para el contractor y el difusor [11], [13].

### 5.4.2.5 Difusor

Aquí de nuevo es necesario separar la teoría de la información empírica. La teoría explica que en el difusor existen pérdidas debidas a la expansión, si el proceso no es adiabático, además de las pérdidas por fricción. Adicionalmente, hay pérdidas por desprendimiento de capa límite si el ángulo es demasiado grande, de manera que el ángulo debe ser pequeño, igual que en el contractor, pero tampoco indefinidamente pequeño, o el largo del difusor –y por consiguiente el área interna del mismo, y también la cantidad de aire a mover dentro del difusor-, crecerían de tal forma que se desprendería la misma potencia del ventilador o bomba cuyo rendimiento en el circuito se quiere optimizar.

La siguiente fórmula, compuesta de un término teórico y un término también empírico, separa explícitamente las caídas debidas a la fricción y las caídas debidas a la expansión del fluido [11], [13]:

$$K_d = \frac{\left(1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2\right)}{\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4} \quad (5.12)$$

$$K_d = 0.31$$

En donde  $d_2$  es el área de la sección pequeña, antes de la expansión, y  $d_1$  es el área de la sección grande, después de la expansión.

## 5.4.2.6 Generalidades instrumentales

Como hemos visto, dentro del túnel puede haber pérdidas de energía debidas a causas como rozamiento con las paredes o fricción interna del fluido, turbulencias internas, cambios súbitos de áreas transversales en el flujo del aire generando ya sea situaciones de vena contracta, desprendimiento de capa límite, o cualquier perturbación por imperfecciones o rugosidades en los bordes; así que para caracterizar el túnel nos interesa medir diferencias de presión entre sus regiones internas, velocidad del aire en diferentes puntos, tener un calculo estimado para el caudal, posibles variaciones de temperatura en las diferentes partes, y naturalmente medir distancias espaciales [11], [13].

## 5.4.3 CÁLCULO DE PRESIONES POR SECCIONES

Pasamos a calcular las presiones por secciones utilizando la (3.3) de este trabajo:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

- Tubería de expansión inicial

$$P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 - P_a - \frac{1}{2}\rho v_1^2 = \frac{1}{2}\rho v_1^2 \cdot k_1 \quad (5.13)$$

$$\begin{aligned} P_2 + \frac{1}{2} 1.225 \text{ Kg/m}^3 \cdot (13 \text{ m/s})^2 - 101325 \text{ Pa} - \frac{1}{2} 1.225 \text{ Kg/m}^3 \cdot (32 \text{ m/s})^2 \\ = \frac{1}{2} 1.225 \text{ Kg/m}^3 \cdot (32 \text{ m/s})^2 \cdot 1 \end{aligned}$$

$$P_2 = 102076 \text{ Pa}$$

Donde:

$v_1$ : Velocidad del ventilador ( $32 \text{ m/s}$ )

$v_2$ : Velocidad en la salida de la tubería de media-luna ( $13 \text{ m/s}$ )

$P_a$ : Presión atmosférica ( $101325 \text{ Pa}$ )

$\rho$ : Densidad del aire ( $1.225 \text{ Kg/m}^3$ )

$k_1$ : Coeficiente de pérdida de la sección ( $k_1 = 1$ )

- Salida de la tubería media-luna de  $800 \text{ mm}$

$$k_c = 0.388 \cdot \alpha \cdot \left(\frac{R}{d}\right) \cdot Re^{-0.17} = \{Re_2 = 711970\} = 0.18 \quad (5.14)$$

$$\alpha = 0.95 + 4.42 \cdot \left(\frac{R}{d}\right)^{-1.96} = 3.8 \quad (5.15)$$

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot k_c = P_2 - P'_3 \rightarrow P'_3 = 102057 \text{ Pa} \\ \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot k_c = P'_3 - P_3 \rightarrow P_3 = 102038 \text{ Pa} \end{cases} \quad (5.16)$$

Donde:

$v$ : Velocidad tubería ( $13 \text{ m/s}$ )

$P_2$ : Presión entrada tubería ( $102038 \text{ Pa}$ )

$P'_3$ : Presión mitad tubería

$\rho$ : Densidad del aire ( $1.225 \text{ Kg/m}^3$ )

$k_c$ : Coeficiente de pérdida en la tubería por fricción por paredes

- Difusor

$$P_4 + \frac{1}{2}\rho v_4^2 - P_3 - \frac{1}{2}\rho v_3^2 = \frac{1}{2}\rho v_3^2 \cdot k_d \quad (5.17)$$

$$\begin{aligned} P_4 + \frac{1}{2}1.225 \text{ Kg/m}^3 \cdot (5.7 \text{ m/s})^2 - 102038 \text{ Pa} - \frac{1}{2}1.225 \text{ Kg/m}^3 \cdot (13 \text{ m/s})^2 \\ = \frac{1}{2}1.225 \text{ Kg/m}^3 \cdot (13 \text{ m/s})^2 \cdot 0.31 \end{aligned}$$

$$P_4 = 102193 \text{ Pa}$$

Donde:

$v_3$ : Velocidad entrada difusor (13 m/s)

$v_4$ : Velocidad salida difusor (5.7 m/s)

$P_3$ : Presión entrada difusor (102038 Pa)

$\rho$ : Densidad del aire (1.225 Kg/m<sup>3</sup>)

$k_d$ : Coeficiente de pérdida del difusor ( $k_d = 0.31$ )

- Zona de acondicionamiento

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_4^2 \cdot \sum k = P_4 - P_5 \quad (5.18)$$

$$P_5 = 102155 \text{ Pa}$$

Donde:

$v_5 = v_4$ : Velocidad zona de acondicionamiento ( $5.7 \text{ m/s}$ )

$P_4$ : Presión entrada difusor ( $102193 \text{ Pa}$ )

$\rho$ : Densidad del aire ( $1.225 \text{ Kg/m}^3$ )

$\sum k$ : Suma de coeficientes de pérdida en la zona de acondicionamiento ( $\sum k = 2.07$ )

- Contractor

$$P_5 + \frac{1}{2} \rho v_5^2 - P_6 - \frac{1}{2} \rho v_6^2 = \frac{1}{2} \rho v_6^2 \cdot k_c \quad (5.19)$$

$$\begin{aligned} 102155 \text{ Pa} + \frac{1}{2} 1.225 \text{ Kg/m}^3 \cdot (5.7 \text{ m/s})^2 - P_6 - \frac{1}{2} 1.225 \text{ Kg/m}^3 \cdot (51.68 \text{ m/s})^2 \\ = \frac{1}{2} 1.225 \text{ Kg/m}^3 \cdot (51.68 \text{ m/s})^2 \cdot 0.04 \end{aligned}$$

$$P_6 = 100473 \text{ Pa}$$

Donde:

$v_5$ : Velocidad entrada contractor ( $5.7 \text{ m/s}$ )

$v_6$ : Velocidad salida contractor ( $51.68 \text{ m/s}$ )

$P_5$ : Presión entrada difusor ( $102155 \text{ Pa}$ )

$\rho$ : Densidad del aire ( $1.225 \text{ Kg/m}^3$ )

$k_c$ : Coeficiente de pérdida del contractor ( $k_c = 0.04$ )

## 6 SELECCIÓN DEL PROPULSOR

Un ventilador es una turbomáquina que transfiere potencia a un fluido, con un rendimiento determinado, induciendo en él una sobrepresión e incrementando su movimiento.

Son diferentes los parámetros mediante con los que se clasifican los propulsores:

- **Incremento de presión generado**

Tipo	Presiones Generadas
Ventilador	$P < 6.9kPa$
Blower	$P < 19.6kPa$
Turbocompresor	$P > 19.6kPa$

Tabla 3: Clasificación del propulsor según incremento de presión generado

- **Trayectoria del fluido a su paso por el propulsor**

Tipo	Presión	Caudal
Centrífugos	Incremento elevado	Caudal reducido
Tangenciales	Incremento medio	Caudal muy reducido
Axiales	Incremento bajo	Caudal elevado

Tabla 4: Clasificación del propulsor según trayectoria del fluido a su paso por el propulsor

- **Uso**

Tipo
Extractores
Tubulares
Impulsores

Tabla 5: Clasificación del propulsor según su uso

Generalmente y por sus prestaciones, el tipo de propulsor más utilizado en túneles de viento es:

### ➤ Ventilador - Axial – Impulsor

Esta clase de propulsores poseen las ventajas de ser más económicos, proporcionar un gran caudal y ser, su montaje y mantenimiento, sencillos de realizar. Su mayor inconveniente, sin embargo, es el movimiento de rotación que inducen en el flujo a su paso debido al giro del rotor, propiedad poco deseable para aplicaciones en túneles de viento, necesitando así del montaje de elementos de diseño adicionales para dotar al fluido de las características apropiadas requeridas en estas instalaciones.

Según su método de ensamblaje, los ventiladores axiales pueden ser clasificados en tres categorías principales:

- **Circulador de aire o ventilador libre:** Ventilador instalado en un espacio abierto, sin estar integrado en estructura alguna que conduzca el aire de manera predeterminada hacia él, ni lo fuerce a pasar entre sus álabes. Propulsores de este tipo son los ventiladores de pedestal, pared escritorio o techo, generalmente destinados a funciones de aclimatación de dependencias.
- **Ventilador de montaje en diafragma:** Ventilador cuya función principal es la posibilitar una transferencia de flujo entre dependencias de gran tamaño. Dispositivos extractores de gases pertenecen a ésta categoría.
- **Ventilador de conducto:** Ventilador instalado en el interior de un conducto cerrado que limita el movimiento del flujo y lo conduce hacia su rotor. Diferentes etapas adicionales montadas en serie inducen mayores incrementos de presión en el fluido, alcanzando un comportamiento como compresor en situaciones extremas.

Los ventiladores circuladores y de montaje en diafragma son de uso común y posibilitan el cumplimiento de su cometido de forma económica y eficiente. Sin embargo, y para la aplicación en instalaciones de túnel de viento, un montaje de ventilador de conducto posibilita mayor control sobre el flujo, induciéndole incrementos de presión más elevados y dotándole de las características deseadas, debido a su diseño más cuidado desde un punto de vista aerodinámico [6].



**Figura 6.1: Vista isométrica frontal del propulsor comercial elegido [14]**



**Figura 6.2: Vista isométrica trasera del propulsor comercial elegido [14]**

Modelo	Caudal de aire ( $m^3/h$ )	Velocidad (rpm)	Suministro eléctrico 230V (A)	Potencia de entrada (W)	Nivel de sonido (db(A))	Peso (Kg)
HEPT-45-6M/H	4900	955	1.4	225	56	15.5

Tabla 6: Características del propulsor comercial elegido [14]

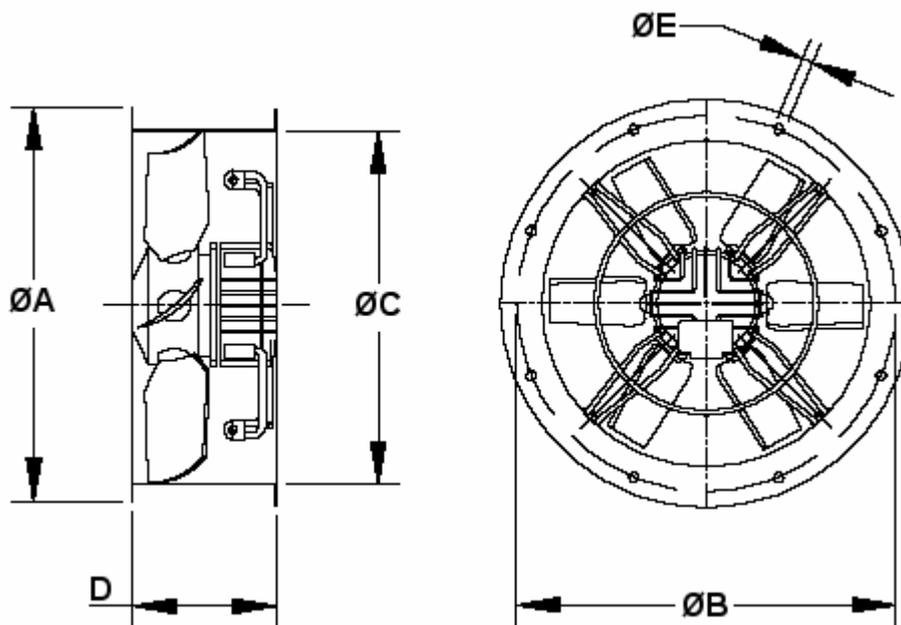


Figura 6.3: Dimensiones del propulsor comercial elegido [14]

DIMENSIONES (mm)				
A	B	C	D	E
540	500	460	220	12

Tabla 7: Dimensiones del propulsor comercial elegido [14]

## 7 DISEÑO Y MODELADO EN 3D DEL TÚNEL DE VIENTO

---

En este apartado se mostrarán el diseño y modelado en 3D del túnel de viento, pieza por pieza, con el software anteriormente explicado, Pro/ENGINEER Wildfire 5.0.

Este túnel de viento será de tipo Göttingen, es decir, será de circuito cerrado y sección de pruebas cerrada.

La idea principal a la hora de diseñar este tipo de túnel de viento, era facilitar el flujo laminar a lo largo del túnel. En trabajos anteriores de diseño de túneles de viento, la sección del conducto se había diseñado de manera rectangular. En este proyecto, se han redondeado las esquinas de la sección del conducto, haciéndolo más circular, de manera que se evitan turbulencias debido a las esquinas.

A la hora de elegir las dimensiones, el túnel no debía ser demasiado grande, de manera que cupiese en un laboratorio educativo.

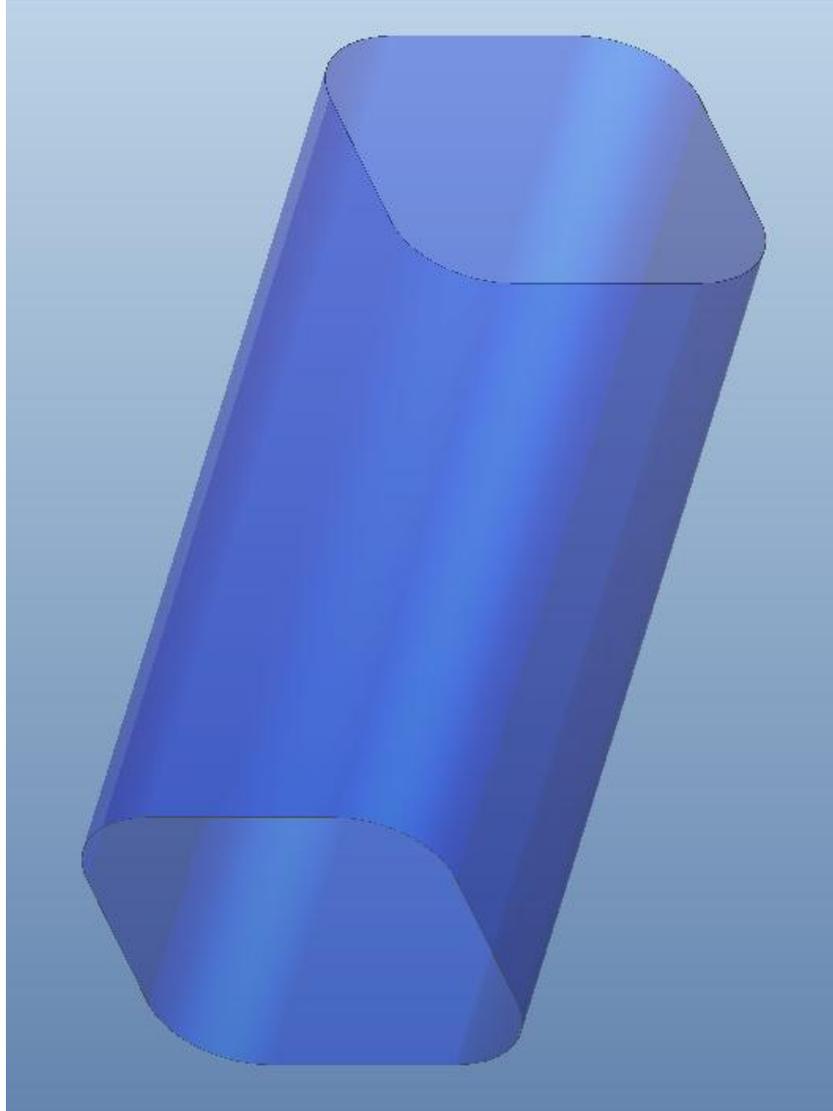
El material elegido para las tuberías y zona de acondicionamiento es el tol de acero negro. El panel de abejas es de PVC y las mallas están hechos de alambres aluminio y los marcos de ambos son de madera ajustados a la geometría. La sección de pruebas es de plexiglás o polimetilmetacrilato, que posee propiedades de resistencia a la interperie, transparencia y resistencia al rayado.



**Figura 7.1: Diseño en 3D del conjunto del túnel de viento**

## 7.1 SECCIÓN DE PRUEBAS

La primera pieza a diseñar era la más importante, es decir, la sección de pruebas.



**Figura 7.2: Diseño de la sección de pruebas**

## 7.2 ZONA DE ACONDICIONAMIENTO DE FLUJO

La segunda pieza más importante es la zona de acondicionamiento de flujo. Hay que destacar que esta zona está compuesta por varias piezas.

### 7.2.1 CONO DE CONTRACCIÓN

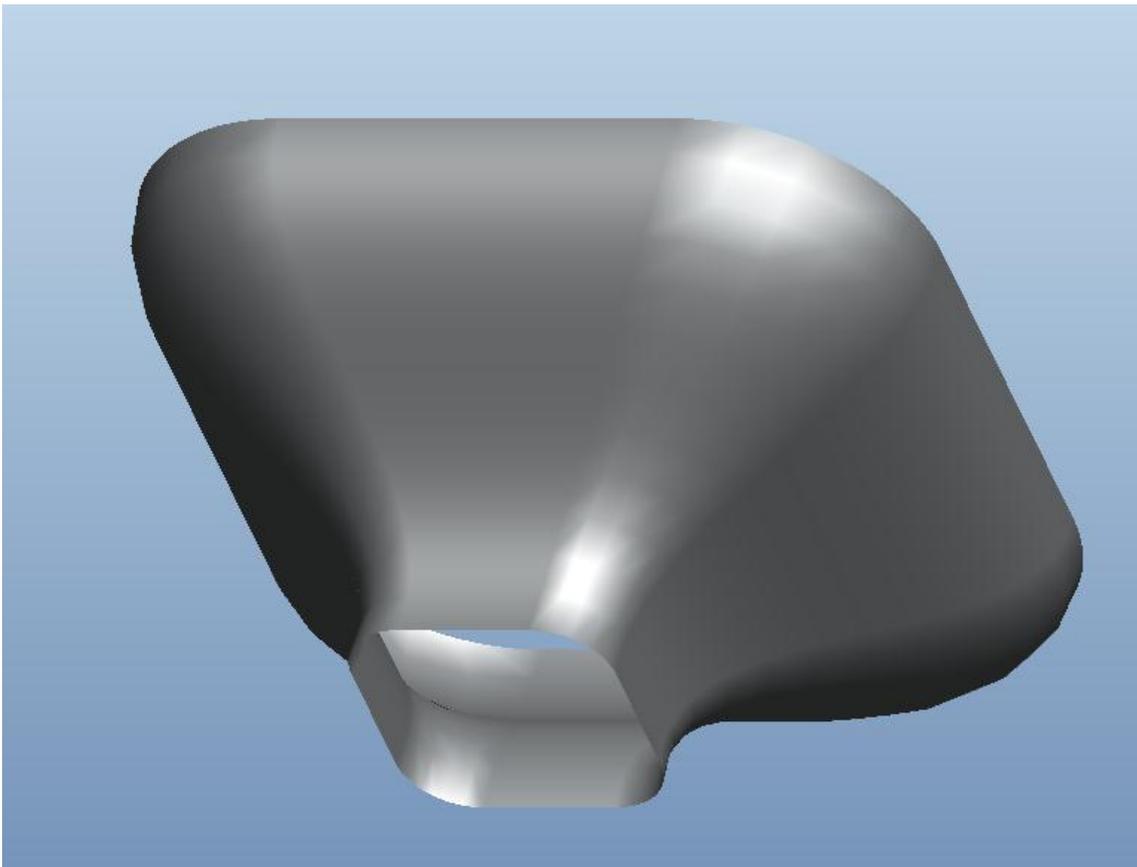


Figura 7.3: Diseño del cono de contracción

### 7.2.2 CONO DE EXPANSIÓN

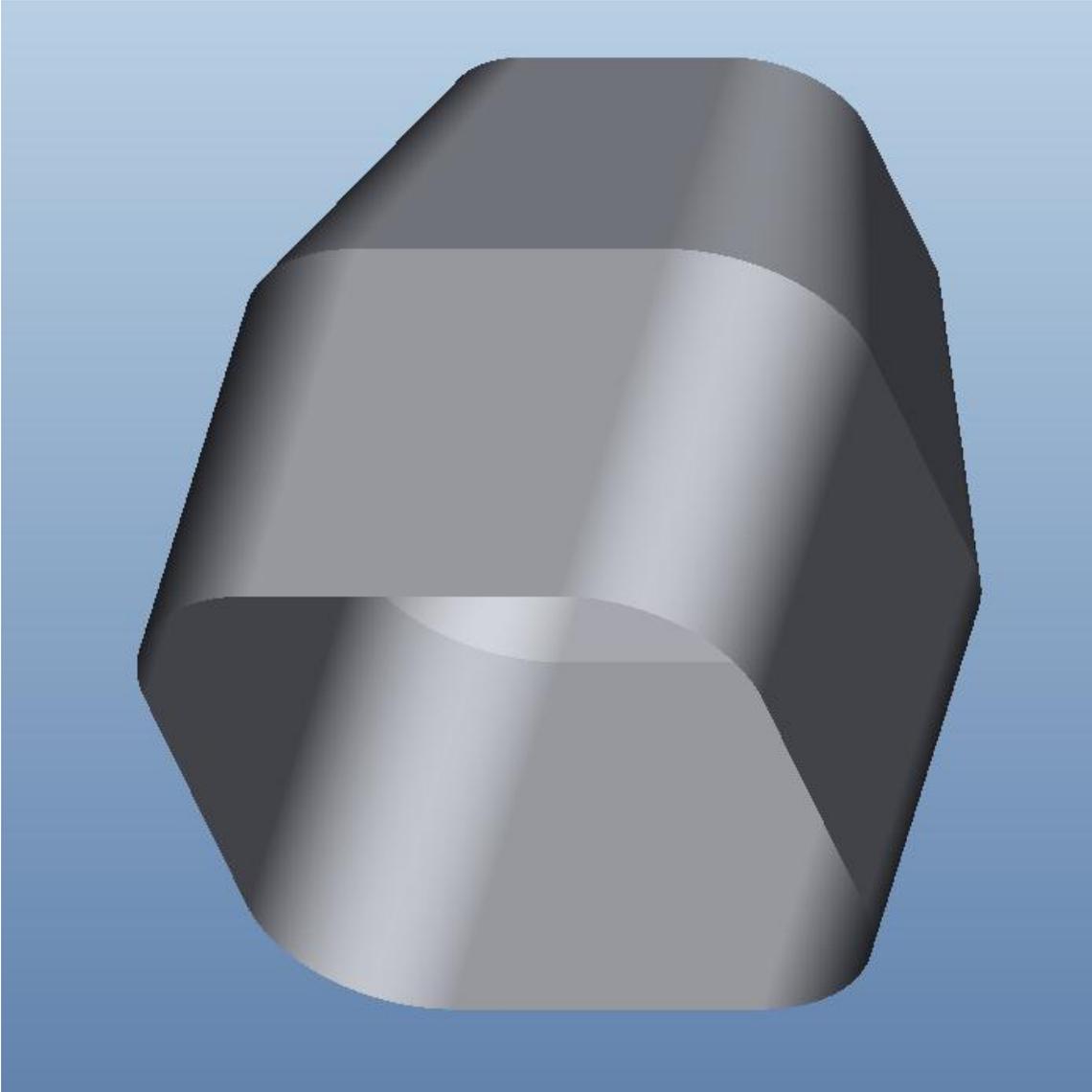


Figura 7.4: Diseño del cono de expansión

### 7.2.3 MALLA

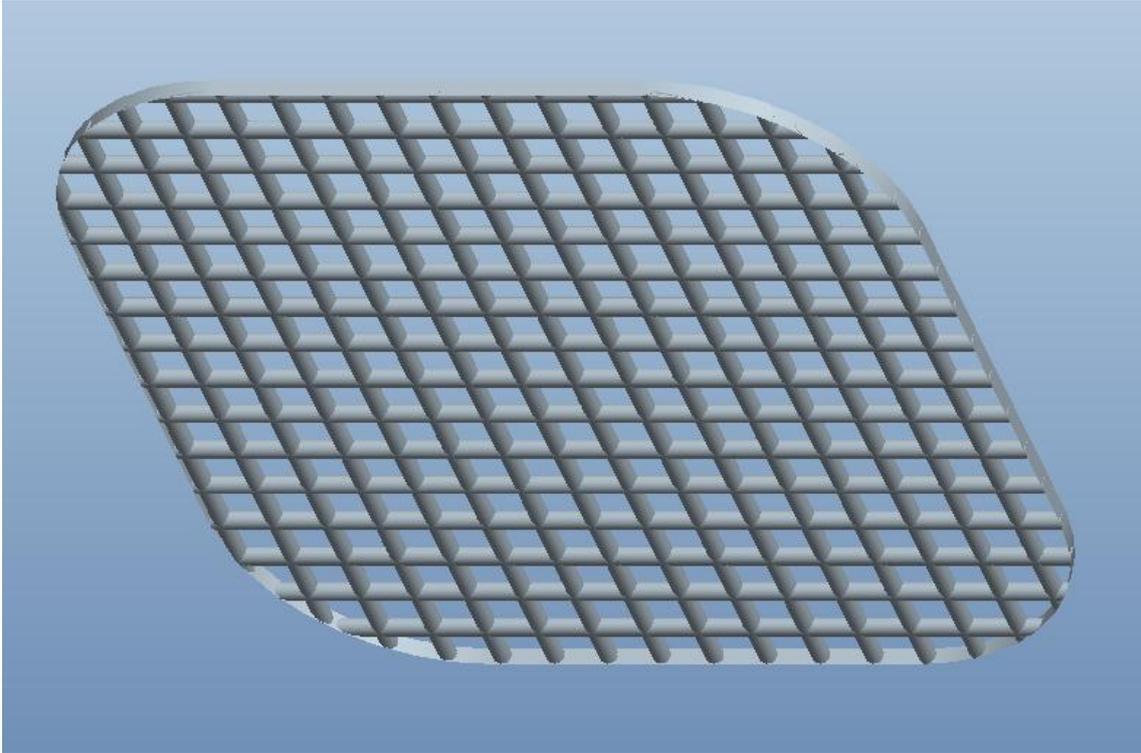


Figura 7.5: Diseño de la malla

#### 7.2.4 PANEL DE ABEJAS

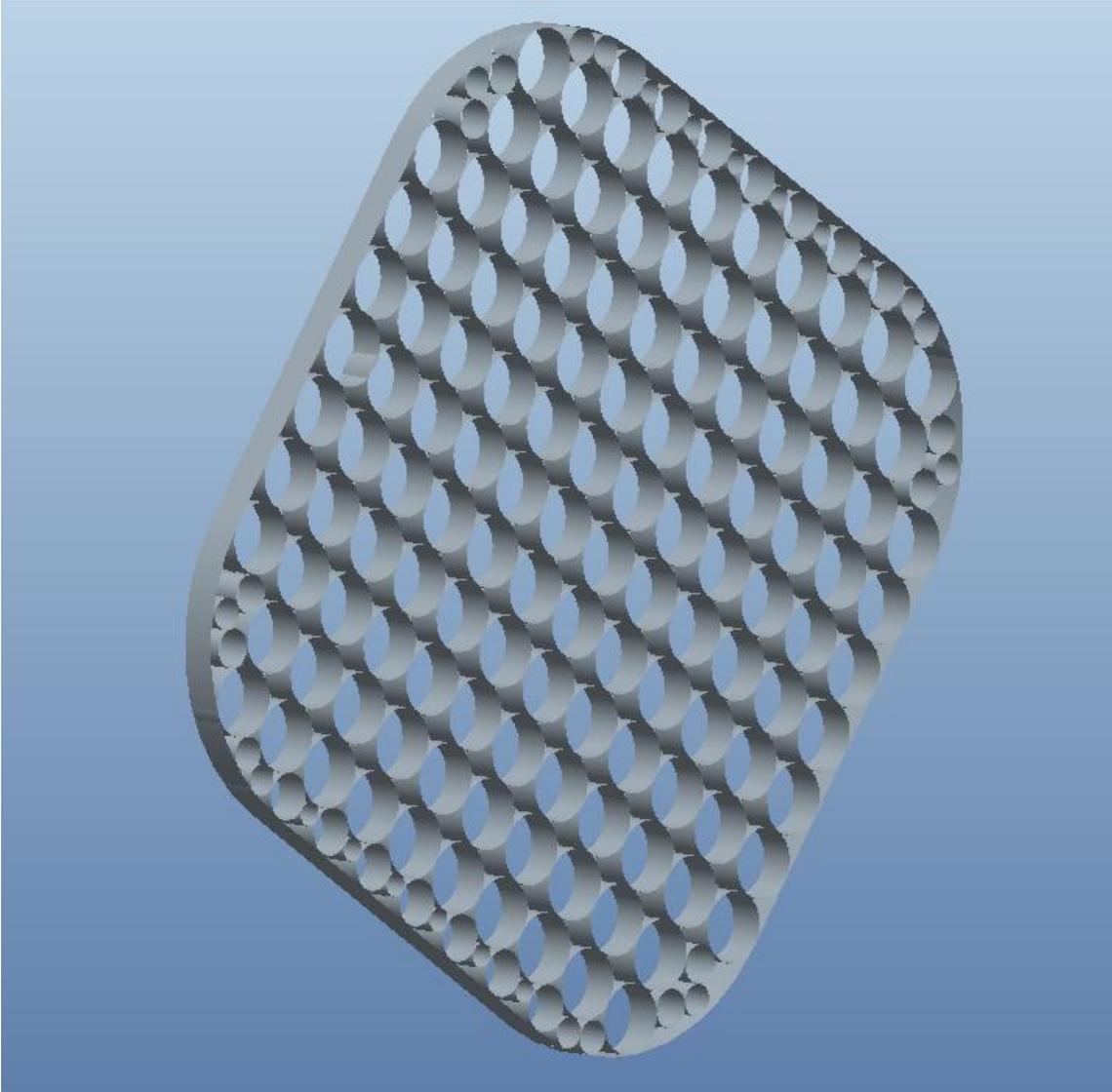


Figura 7.6: Diseño del Panel de abejas

## 7.3 TUBERÍAS

La parte de diseño de los conductos está dividida en diferentes piezas:

### 7.3.1 TUBERÍA MEDIA-LUNA 600 MM.



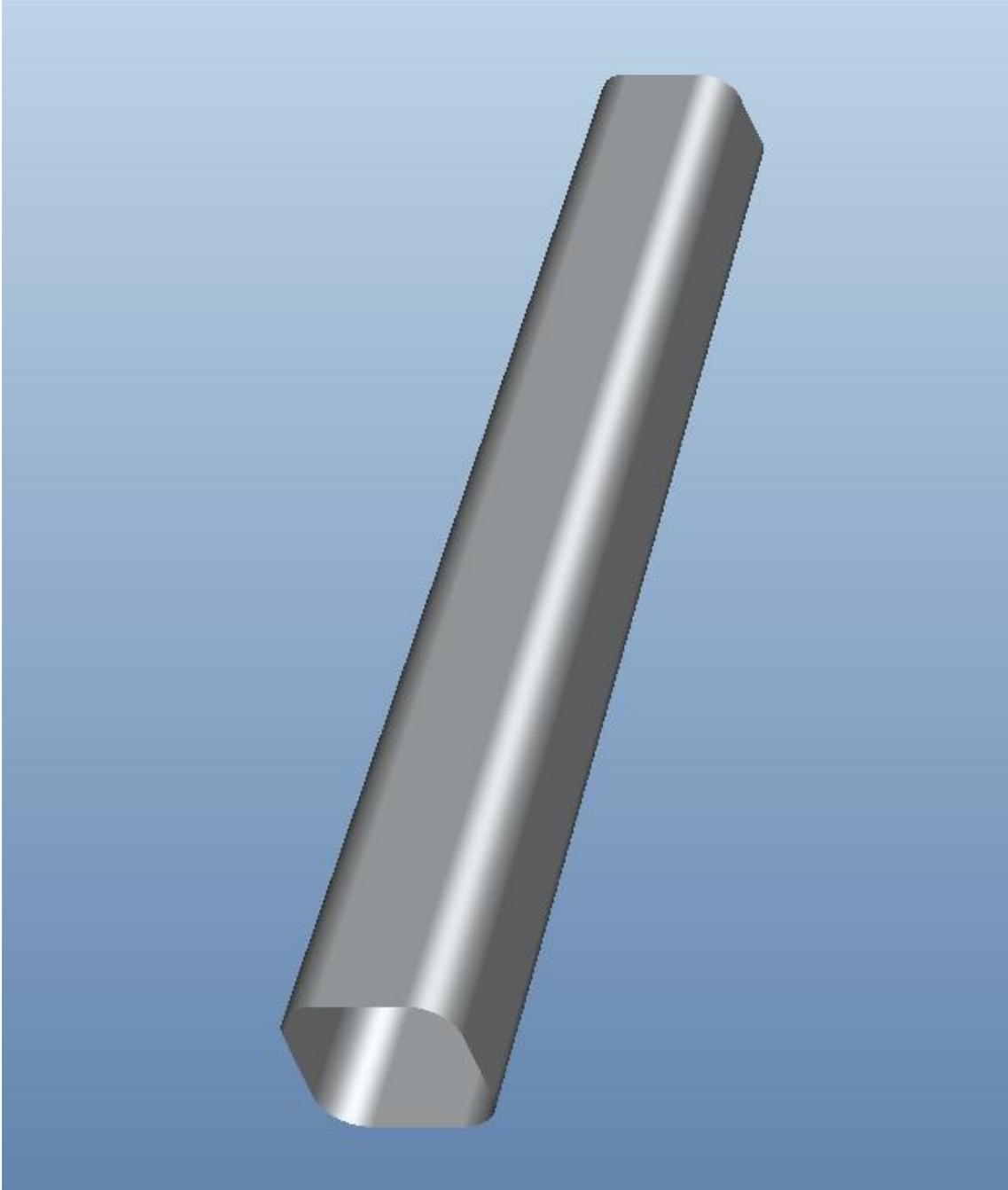
Figura 7.7: Diseño de la tubería media-luna 600 mm.

**7.3.2 TUBERÍA MEDIA-LUNA 800 MM.**



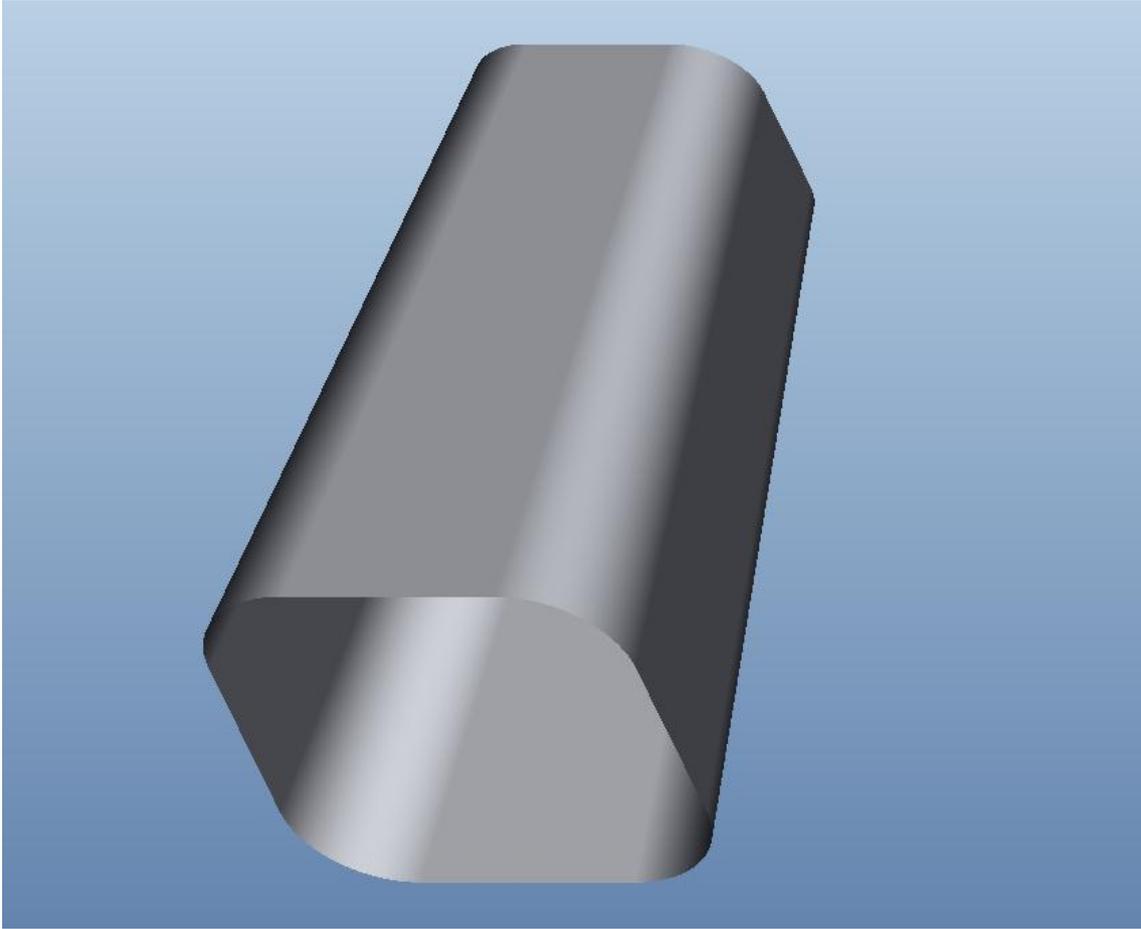
**Figura 7.8: Diseño de la tubería media-luna 800 mm.**

### 7.3.3 TUBERÍA DE EXPANSIÓN INICIAL (DE 600 MM. A 800 MM.)



**Figura 7.9: Diseño de la tubería de expansión inicial (de 600 mm. a 800 mm.)**

**7.3.4 TUBERÍA DE EXPANSIÓN FINAL (DE 400 MM. A 600 MM.)**



**Figura 7.10: Diseño de la tubería de expansión final (de 400 mm. a 600 mm.)**

### 7.3.5 TUBERÍA DE ENTRADA A LA SECCIÓN DE PRUEBAS

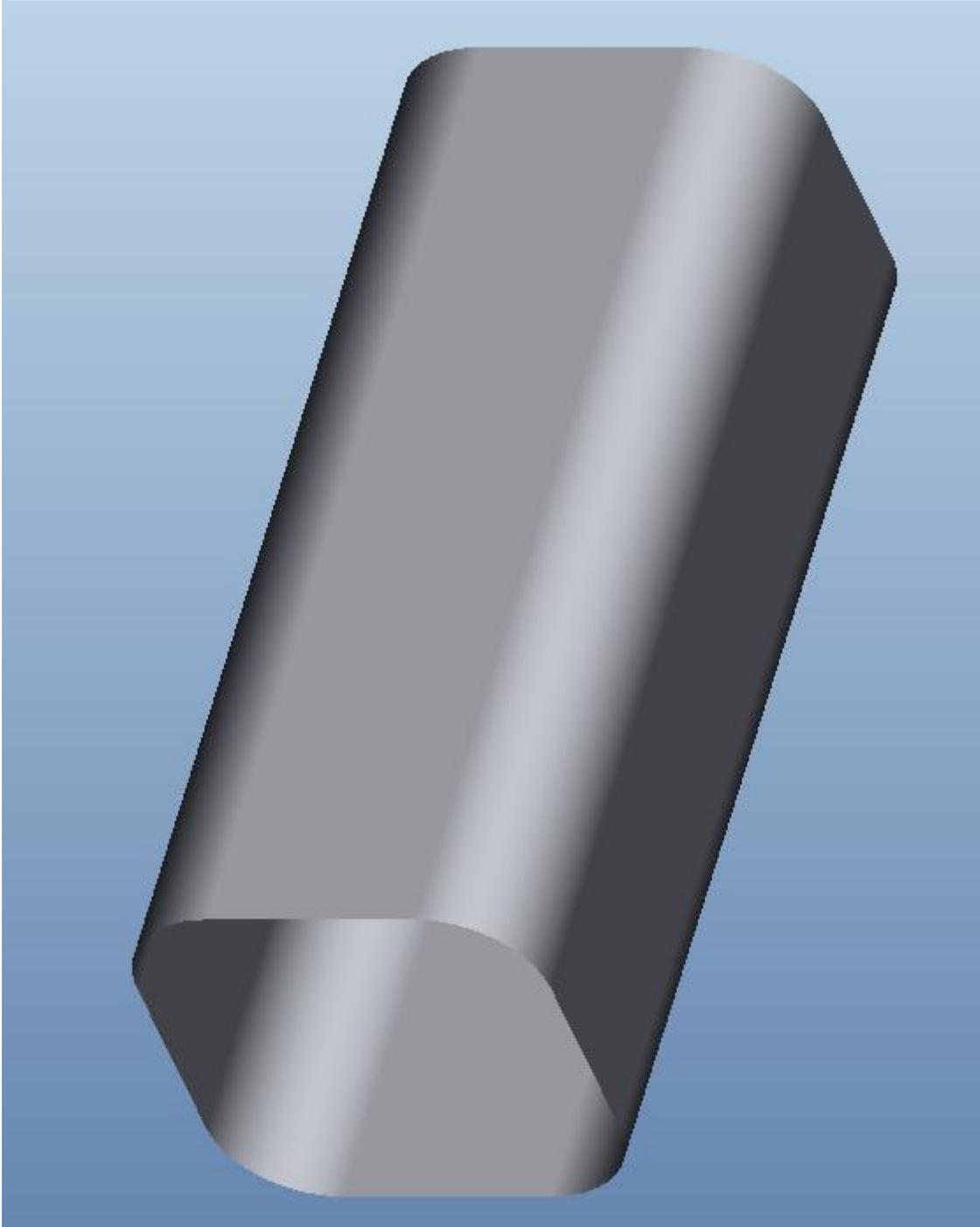


Figura 7.11: Diseño de la tubería de entrada a la sección de pruebas

## 7.4 DEFLECTORES EN ESQUINAS

### 7.4.1 DEFLECTORES EN ESQUINAS (600 MM.)

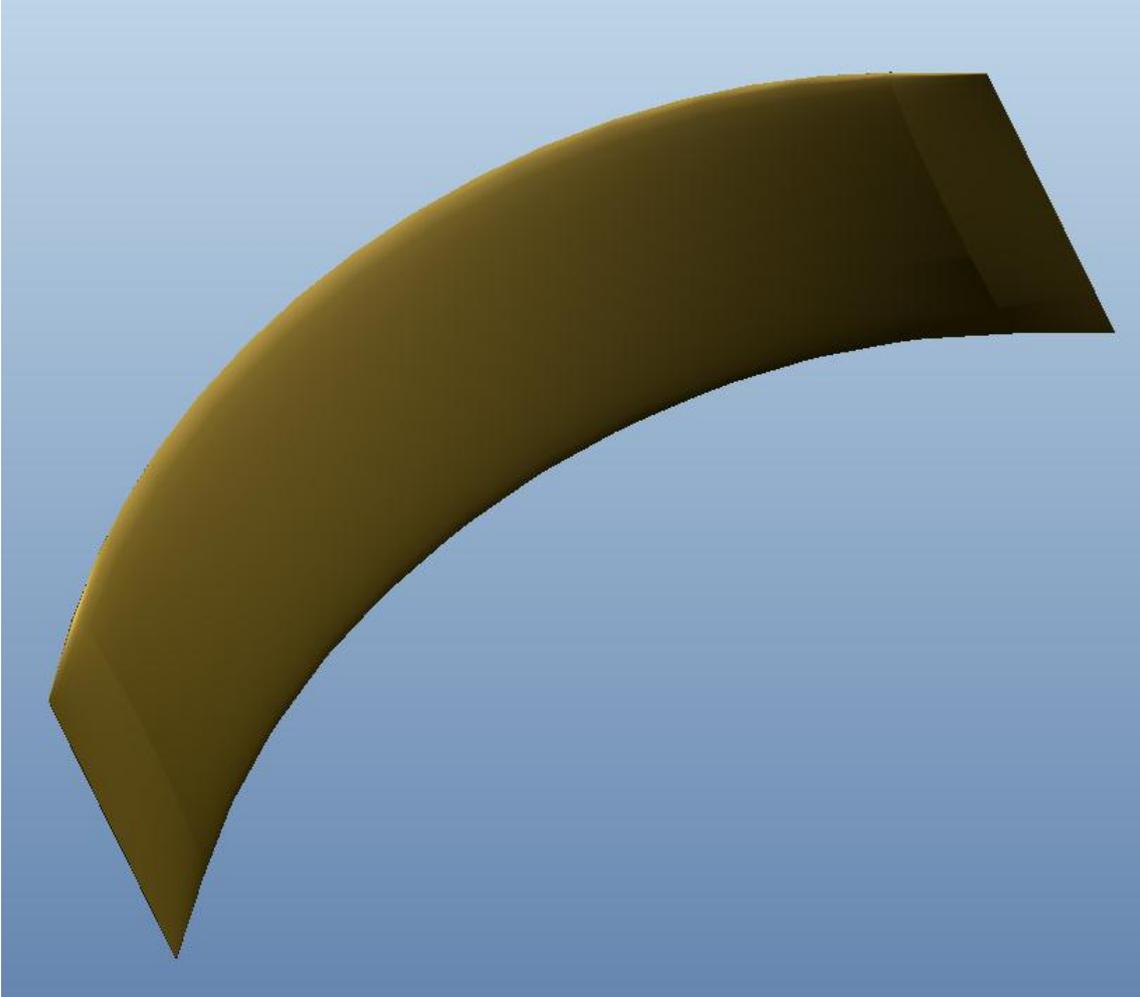
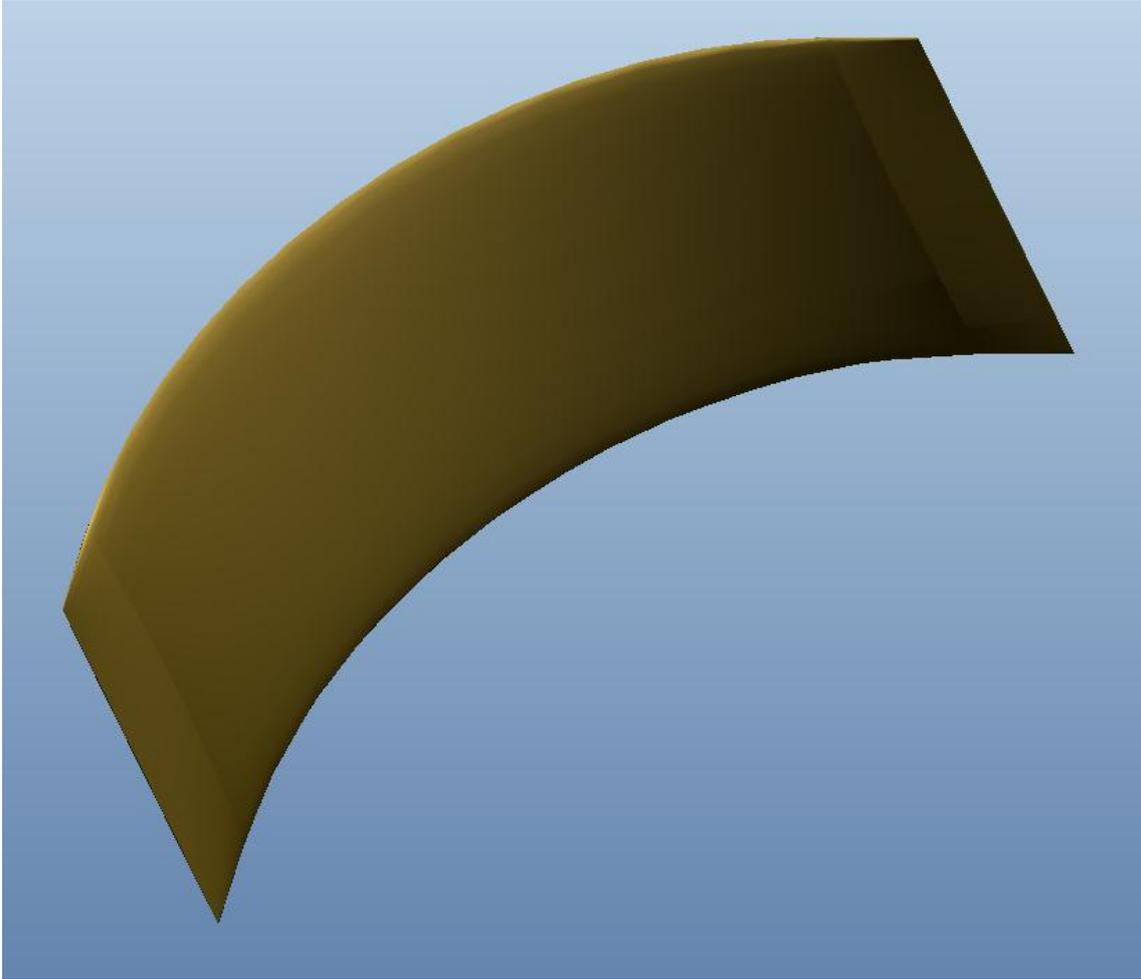


Figura 7.12: Diseño de los deflectores en esquinas (600 mm.)

**7.4.2 DEFLECTORES EN ESQUINAS (800 MM.)**



**Figura 7.13: Diseño de los deflectores en esquinas (800 mm.)**

## 7.5 PROPULSOR (VENTILADOR) COMERCIAL

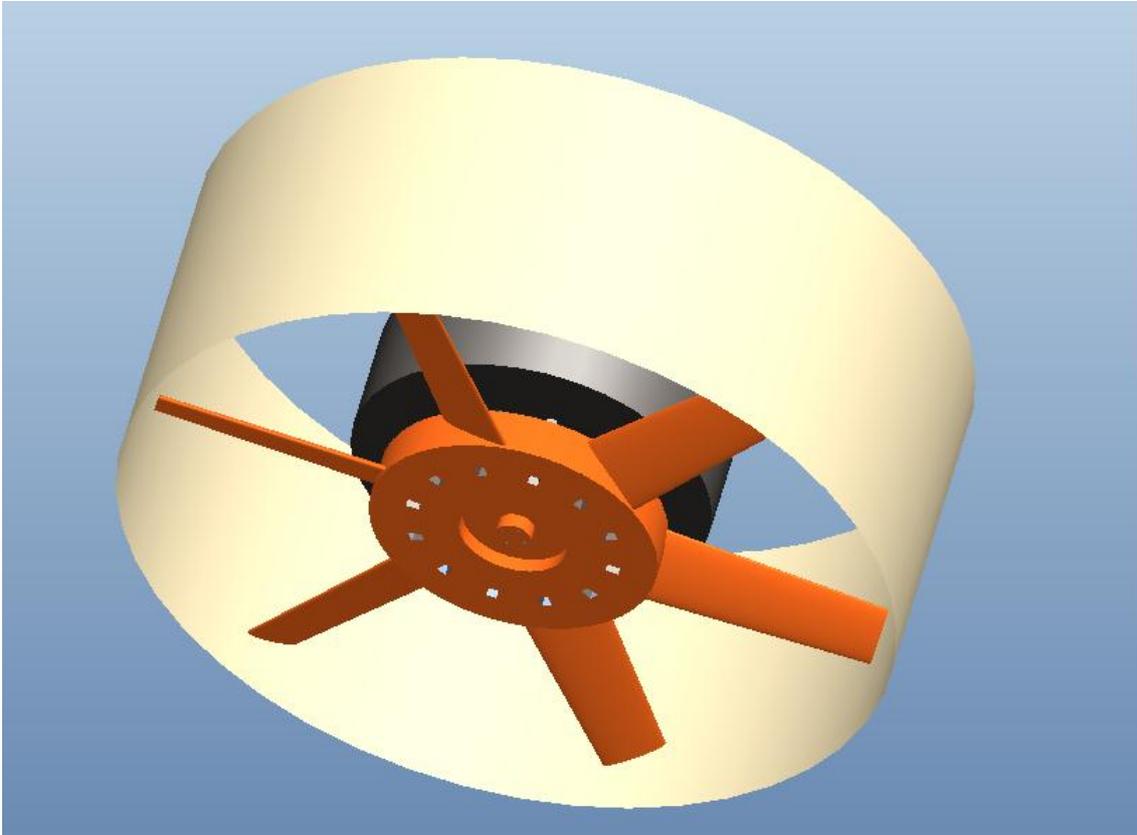


Figura 7.14: Diseño del propulsor (ventilador) comercial



# 8 SIMULACIÓN DE FLUJO EN 2D DEL TÚNEL DE VIENTO

---

En este capítulo se desarrolla el proceso de simulación en 2D del túnel de viento, aplicando las teorías explicadas para el software de simulación ANSYS Workbench.

## 8.1 MALLADO DE LA SECCIÓN EN 2D

### 8.1.1 DISCRETIZACIÓN ESPACIAL

#### 8.1.1.1 Introducción

Según [15], el primer paso en la aplicación de la dinámica de fluidos computacional, consiste en la discretización espacial del dominio. Existen muchos métodos para la discretización del problema. A grosso modo, podemos clasificar los distintos esquemas de discretización en tres categorías principales: diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos. Todos estos métodos requieren una previa discretización geométrica (espacial) para poder realizar la discretización de las ecuaciones que gobiernan el fluido. Básicamente, existen dos tipos de mallado.

- *Mallados estructurados*: cada punto de la malla está inequívocamente identificado por los índices  $i, j, k$ , en coordenadas cartesianas. Las celdas de la malla son cuadriláteros en 2D y hexaedros en 3D.
- *Mallados no estructurados*: las celdas y los nodos de la malla no tienen un orden particular, es decir, las celdas o nodos cercanos a uno dado, no pueden identificarse directamente por sus índices. Los elementos de la malla, en este caso, son una mezcla de cuadriláteros y triángulos en 2D y tetraedros y hexaedros en 3D.

El tipo de discretización espacial a emplear, depende del tipo de discretización de las ecuaciones empleado, así como de la estructura interna de datos empleados para resolver el flujo. El método de las diferencias finitas, que discretiza las ecuaciones de Navier-Stokes en forma diferencial, requiere una malla estructurada de puntos en los que se guardan las variables de flujo. Por otro lado, en el método de los volúmenes finitos es necesario definir puntos de control en cada volumen generado. Precisamente es, en esos vértices donde se guardan las variables, que dependiendo del método que se emplee pueden ser definidos en el centro del elemento o en los vértices de las celdas.

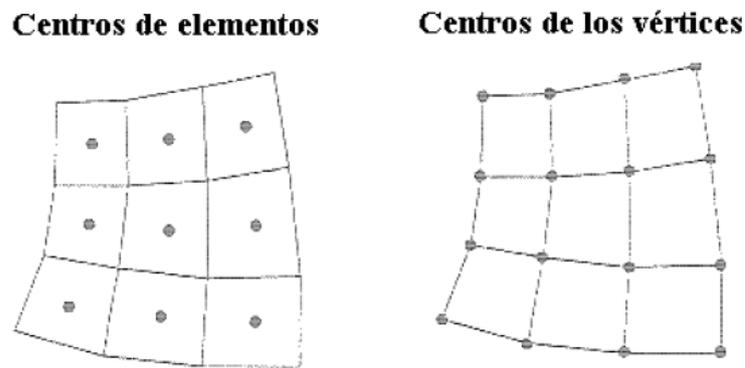


Figura 8.1: Mallas con nodos centrados en los elementos y centrados en los vértices [15]

### 8.1.1.2 Mallas estructuradas

La principal ventaja de los *mallados estructurados* reside en la ordenación de los elementos en memoria, ya que de esta forma, el acceso a las celdas vecinas a una dada resulta muy rápido y fácil, sin más que sumar o restar un número al valor del índice correspondiente.

Las mallas estructuradas pueden representarse en un sistema *cartesiano* o *curvilíneo*. En el primer caso, las líneas que configuran las celdas son siempre paralelas al sistema de ejes coordenados; por el contrario, en los sistemas curvilíneos, el sistema de coordenadas es deformado para adaptarse a la geometría del objeto de estudio.

Por otro lado, también pueden clasificarse en mallas *ortogonales* y mallas *no ortogonales*. Las *mallas ortogonales* son aquellas en las que todas las líneas que la configuran se cortan entre sí con un ángulo de  $90^\circ$ . Algunos flujos pueden considerarse como axisimétricos; en estos caso, las ecuaciones de flujo pueden ser expresadas en coordenadas polares  $(r, \theta)$ , en vez de en coordenadas cartesianas  $(x, y)$ .

Otra metodología, relacionada con los mallados estructurados, es la llamada técnica de la quimera. La idea básica es generar en primer lugar, mallas separadas alrededor de cada una de las entidades geométricas en el dominio. Después, las mallas se combinan de forma que se produzcan solapes de elementos. Lo más importante es la transferencia precisa de las cantidades entre diferentes mallas y la región donde se produce el solape. La ventaja de esta metodología de mallado es que se pueden generar mallas para problemas particulares sin tener que generar mallas particulares, independientes unas de otras. Por otro lado, el problema de la técnica de la quimera es que la conservación de las propiedades de las ecuaciones de gobierno del fluido no es satisfecha exactamente en la zona donde se produzca el solape de mallas [15].

### **8.1.1.3 Mallas no estructuradas**

El segundo tipo de mallas, son los mallados *no estructurados*. Éstos ofrecen gran flexibilidad en el tratamiento de geometrías complejas. La principal ventaja de los mallados no estructurados reside en que los triángulos y cuadriláteros (2D) o los tetraedros (3D), se pueden generar automáticamente, independientemente de la complejidad del dominio. En la práctica, es necesario determinar unos parámetros adecuadamente para obtener una buena calidad de malla. El tiempo requerido por una computadora para generar un mallado no estructurado es mucho menor que el que requiere para uno estructurado. Otra ventaja de este tipo de metodología es que la solución obtenida depende del refinamiento que se realice de la malla. Una desventaja de este tipo de mallado es el espacio que la malla ocupa en una computadora, es decir, requieren más memoria que los mallados computacionales [15].

## 8.1.2 MALLADO DEL TÚNEL DE VIENTO

Para la realización del mallado del túnel de viento, se siguen los pasos de un mallado no estructurado, es decir, en nuestro caso los elementos de la malla son una mezcla de cuadriláteros y triángulos. Se realizan tres mallados (*curvatura, proximidad, curvatura y proximidad*) diferentes para la correcta obtención de los datos de la simulación. Utilizamos la *Función de Uso Avanzado de Tamaño* que nos ofrece el programa de mallado, consiguiendo [16]:

- Ángulos entre las normales para elementos de malla adyacentes (*Tipo "Curvatura"*)
- Número de elementos de malla empleados en los huecos entre dos entidades geométricas (*Tipo "Proximidad"*)

Esta serie de mallas nos dará una idea del nivel de precisión que podemos obtener adaptando la malla inicial.

### 8.1.2.1 Mallado Tipo "Curvatura"

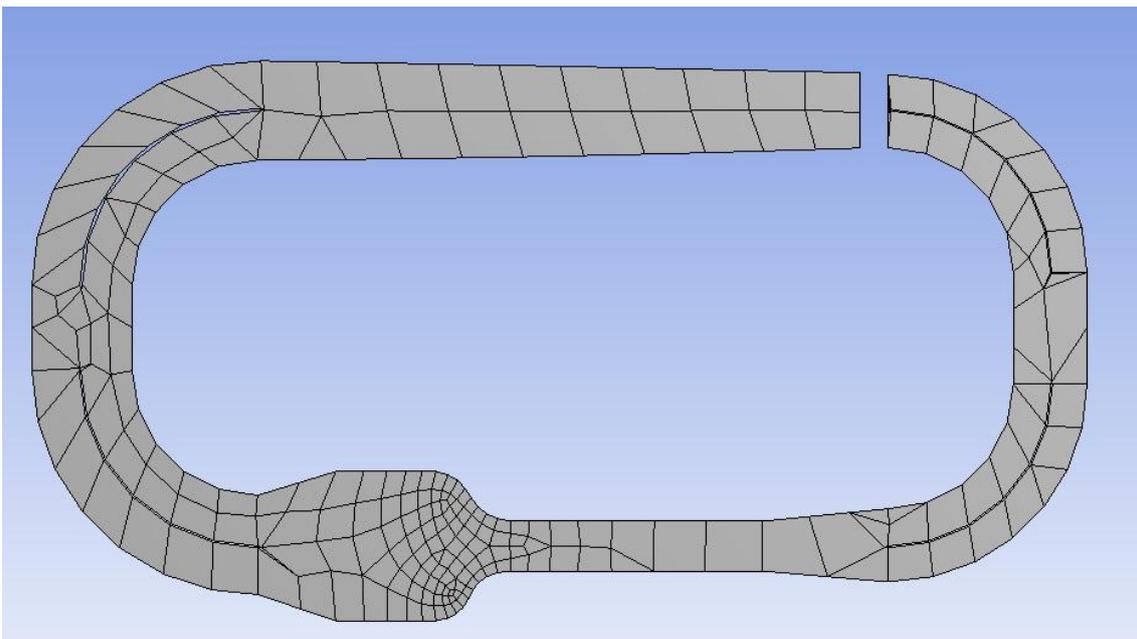


Figura 8.2: Mallado Tipo "Curvatura"

## SIMULACIÓN DE FLUJO EN 2D DEL TÚNEL DE VIENTO

Tras el mallado inicial, se realiza un reajuste de la malla para una mejor resolución de los resultados.

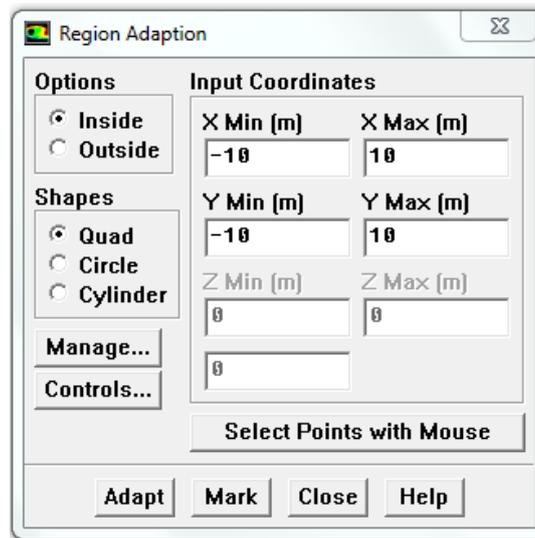
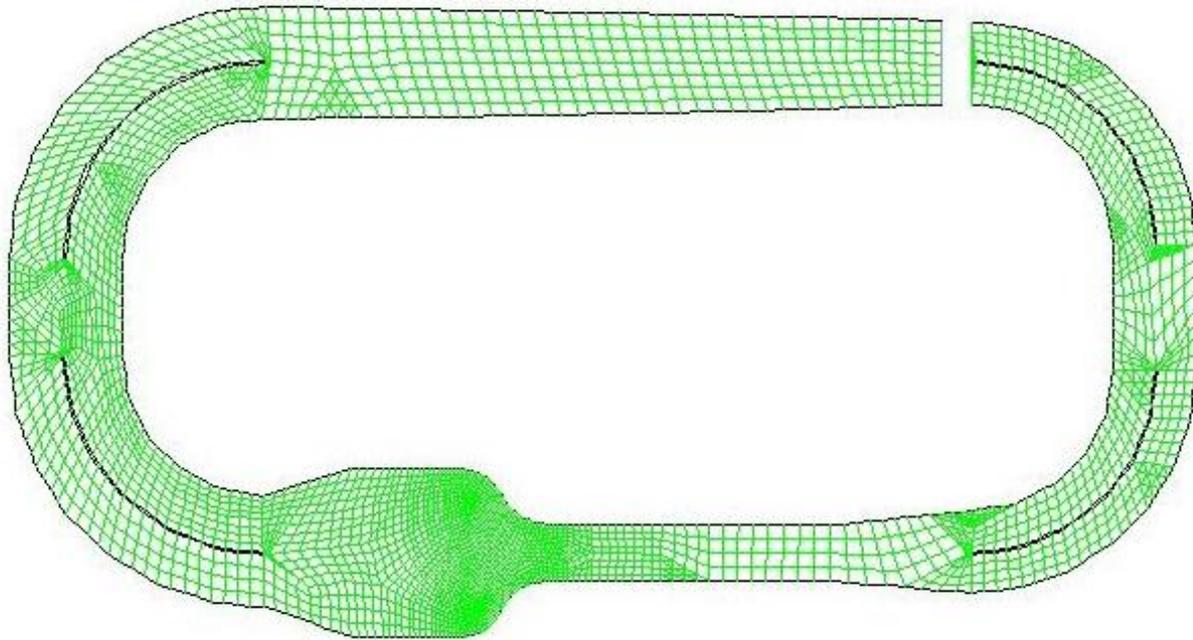


Figura 8.3: Adaptación de las regiones de la malla

**Dump usage: 3600 cells, 7426 faces, 3823 nodes**

Grid size (	original /	adapted /	change)
cells (	900 /	3600 /	2700)
faces (	1955 /	7426 /	5471)
nodes (	1052 /	3823 /	2771)

Figura 8.4: Datos del reajuste de la malla



**Figura 8.5: Malla Tipo “Curvatura” reajustada**

## 8.1.2.2 Mallado Tipo “Proximidad”

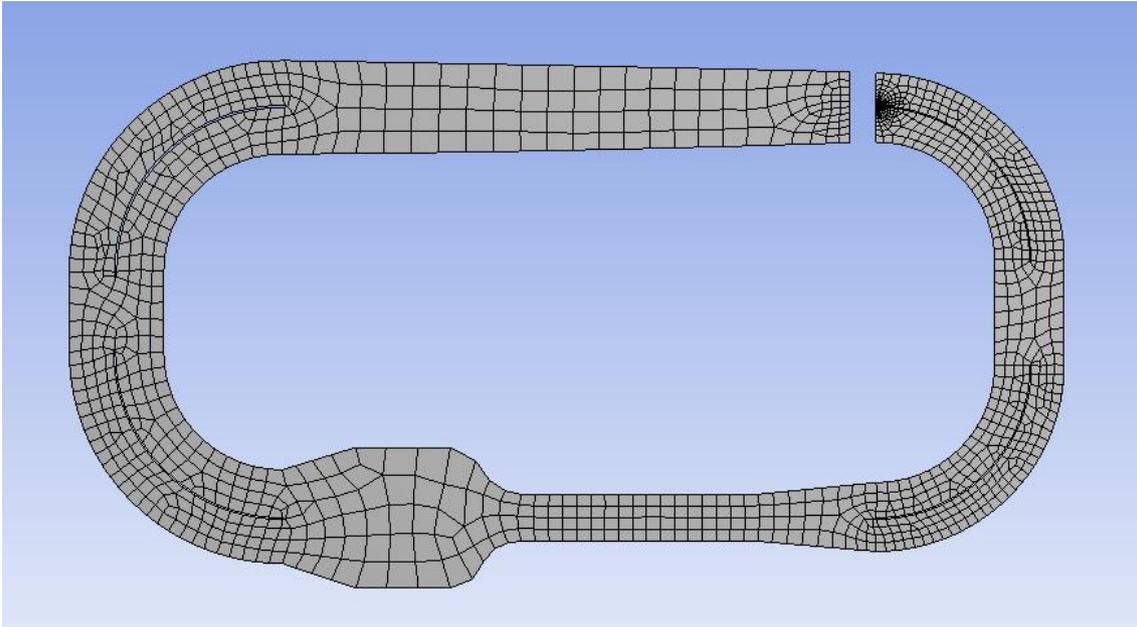


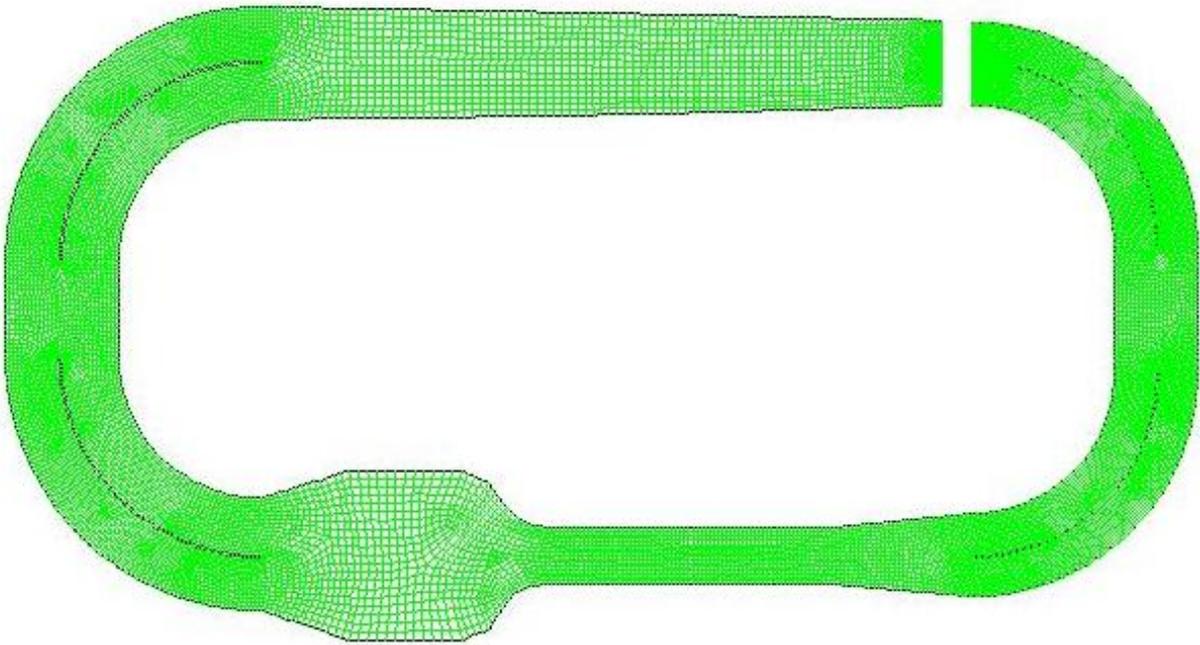
Figura 8.6: Mallado Tipo “Proximidad”

Realizamos la misma operación de reajuste de la malla, quedando:

```
Dump usage: 20048 cells, 41086 faces, 21035 nodes

Grid size ( original /   adapted /   change)
cells (      5012 /    20048 /    15036)
faces (     10557 /    41086 /    30529)
nodes (      5542 /    21035 /    15493)
```

Figura 8.7: Datos del reajuste de la malla



**Figura 8.8: Malla Tipo “Proximidad” reajustada**

## 8.1.2.3 Mallado Tipo “Curvatura y Proximidad”

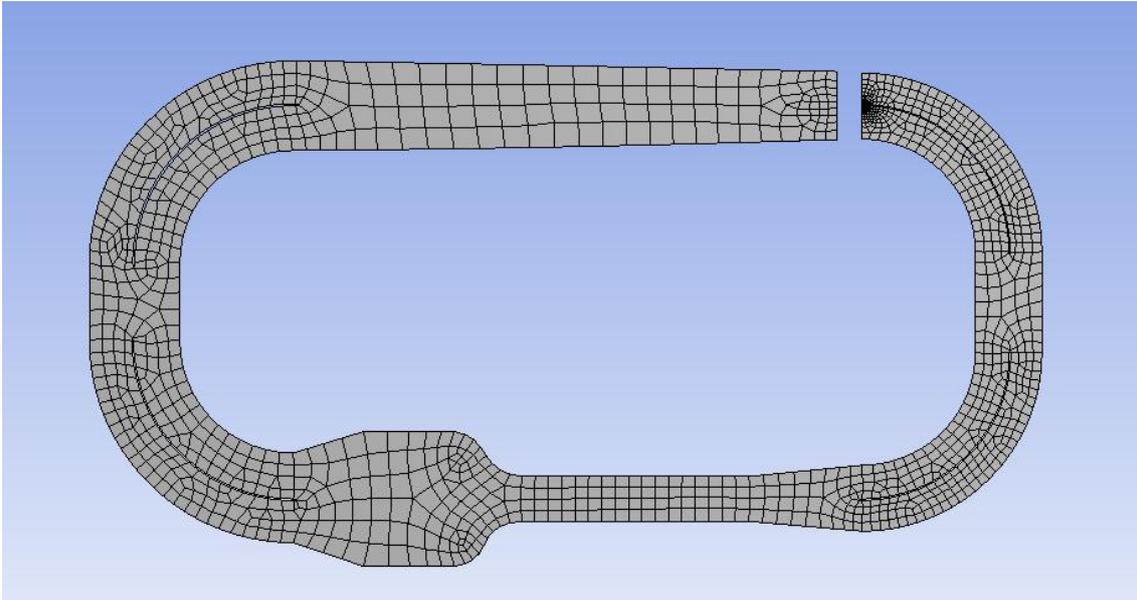


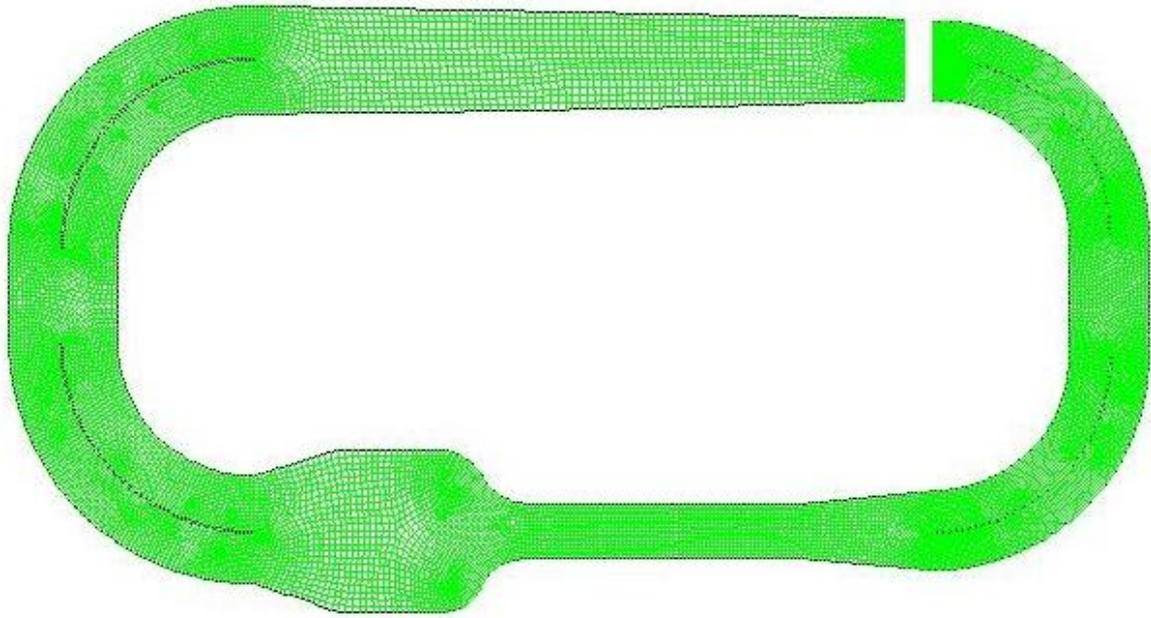
Figura 8.9: Mallado Tipo “Curvatura y Proximidad”

Siguiendo los pasos de mallado anteriores, tenemos:

```
Dump usage: 21120 cells, 43214 faces, 22091 nodes
```

```
Grid size ( original /   adapted /   change)  
cells (    5280 /    21120 /   15840)  
faces (   11093 /   43214 /   32121)  
nodes (    5810 /    22091 /   16281)
```

Figura 8.10: Datos del reajuste de la malla



**Figura 8.11: Mallado Tipo “Curvatura y Proximidad” reajustada**

## 8.2 SIMULACIÓN PASO A PASO (MALLA TIPO “CURVATURA”)

A continuación se mostrarán los pasos a seguir para la correcta simulación de nuestro túnel de viento. Al repetirse las mismas operaciones para las distintas mallas, sólo se mostrará el proceso de la malla de *Tipo “Curvatura”*

### 8.2.1 DEFINICIÓN DEL SOLUCIONADOR DEL MODELO

Se define el modelo, utilizando una base por presión, espaciado en 2D, con velocidad absoluta, basado en Celdas de Green-Gauss, formulación implícita, en situación estática y velocidad superficial.

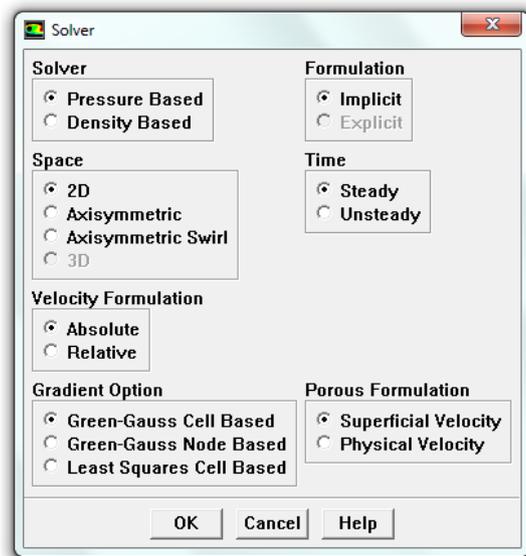


Figura 8.12: Solucionador del modelo

### 8.2.2 DEFINICIÓN DE LA ENERGÍA

En este caso se marca la casilla para la Ecuación de la Energía.

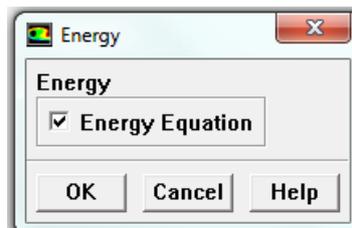


Figura 8.13: Definición de la ecuación de energía

## 8.2.3 DEFINICIÓN DE LA VISCOSIDAD DEL MODELO

En esta fase, se marca el modelo Spalart-Allmaras, y dejamos las constantes por defecto.

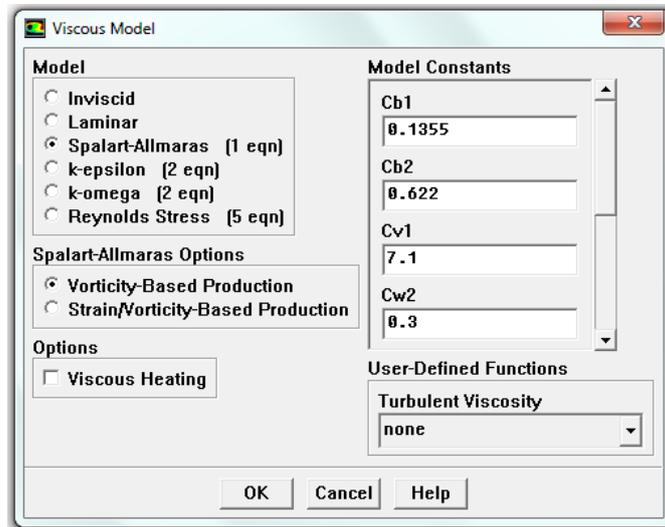


Figura 8.14: Definición de la viscosidad del modelo

## 8.2.4 DEFINICIÓN DEL MATERIAL DEL FLUJO

Para la definición del material, mantenemos el aire con sus propiedades físicas incluidas por defecto.

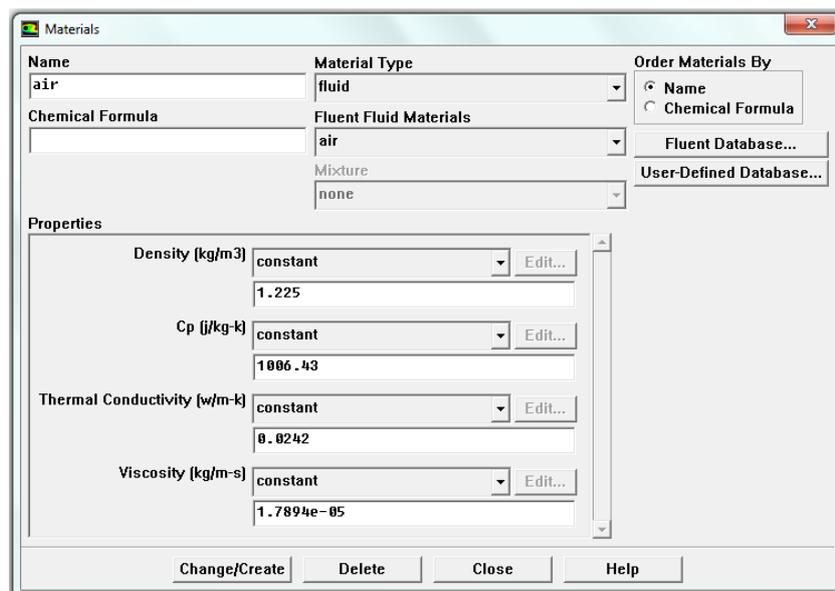


Figura 8.15: Definición del material del flujo

## 8.2.5 DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

En este apartado, mantenemos la Presión de Operación por defecto.

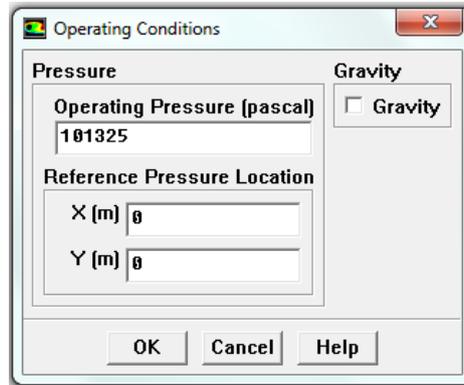


Figura 8.16: Definición de las condiciones de operación

## 8.2.6 DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES DE FRONTERA

Para las condiciones de frontera, se introducen los parámetros de la velocidad, temperatura y se añade el método de Intensidad Turbulenta y Diámetro Hidráulico. Para las paredes, se ajusta la Rugosidad.

8.2.6.1 Entrada

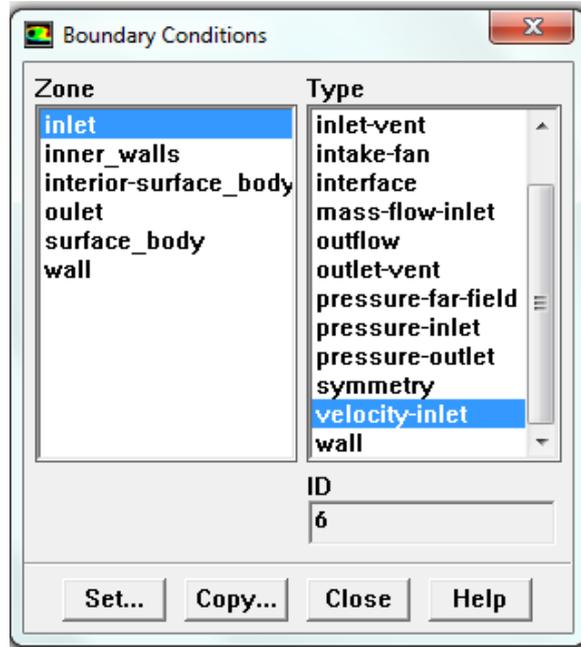


Figura 8.17: Definición de las condiciones de frontera para la entrada

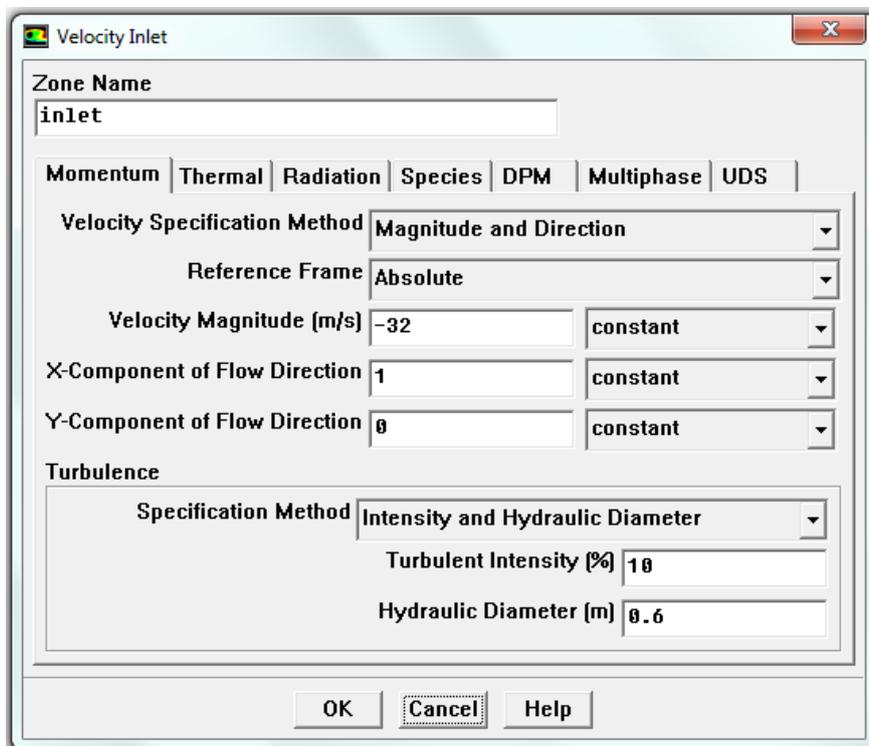


Figura 8.18: Parámetros de velocidad, turbulencia y diámetro hidráulico para la entrada

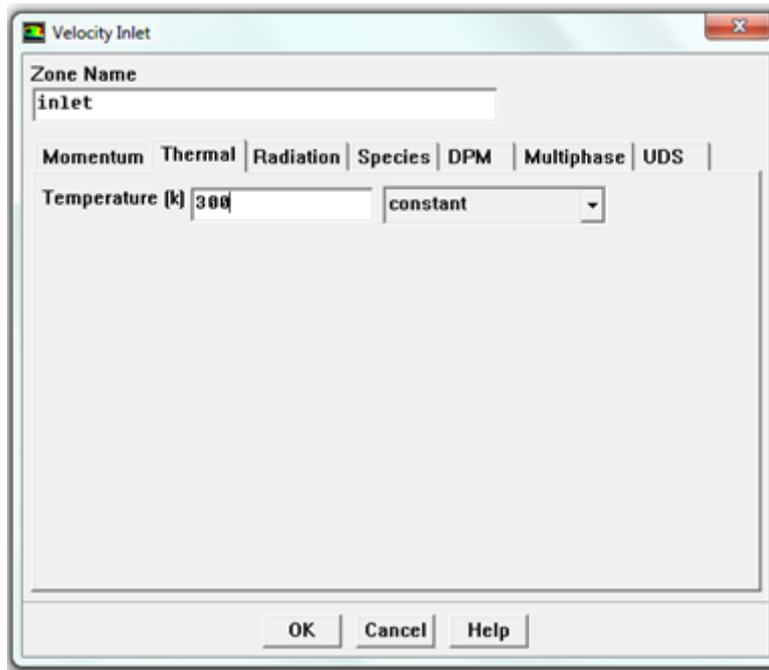


Figura 8.19: Parámetro de temperatura para la entrada

## 8.2.6.2 Salida

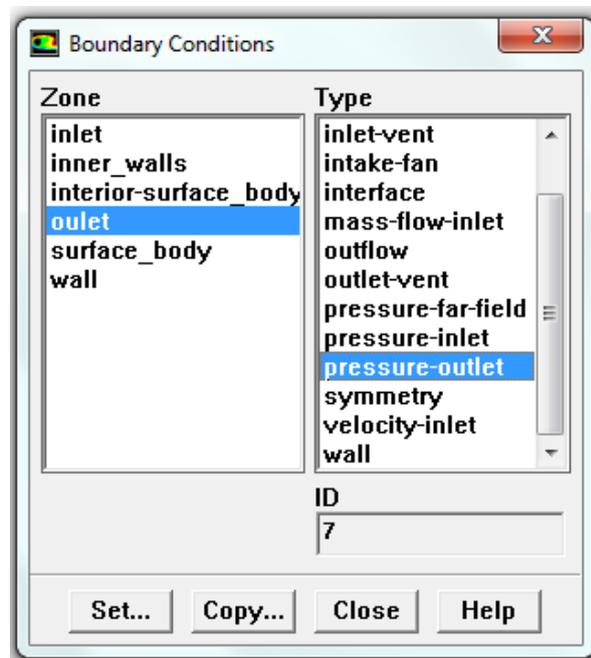


Figura 8.20: Definición de las condiciones de frontera para la salida

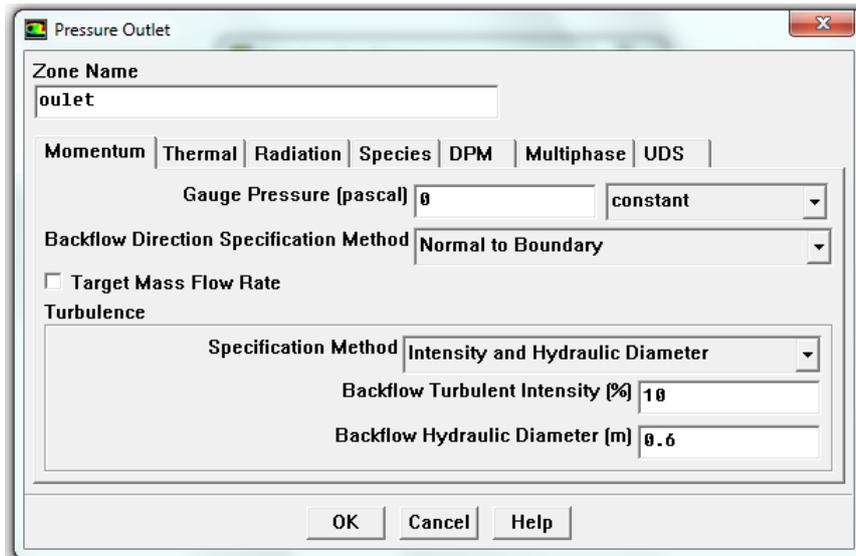


Figura 8.21: Parámetros de turbulencia y diámetro hidráulico para la salida

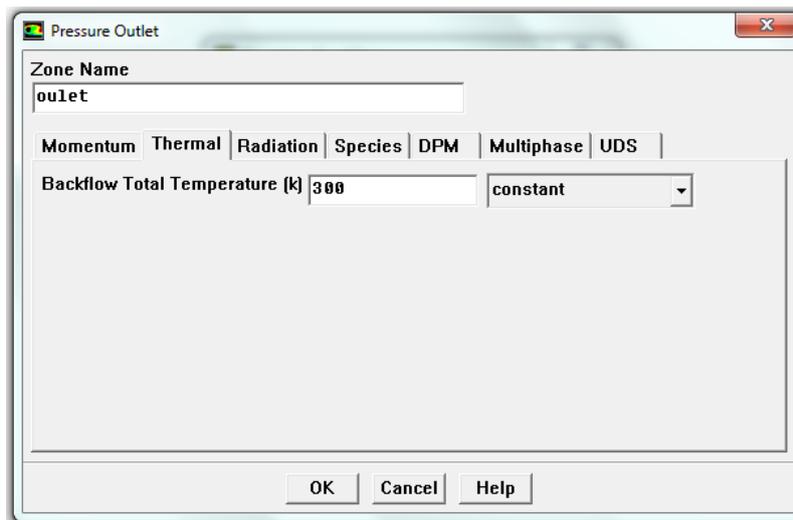


Figura 8.22: Parámetro de la temperatura para la salida

## 8.2.6.3 Paredes

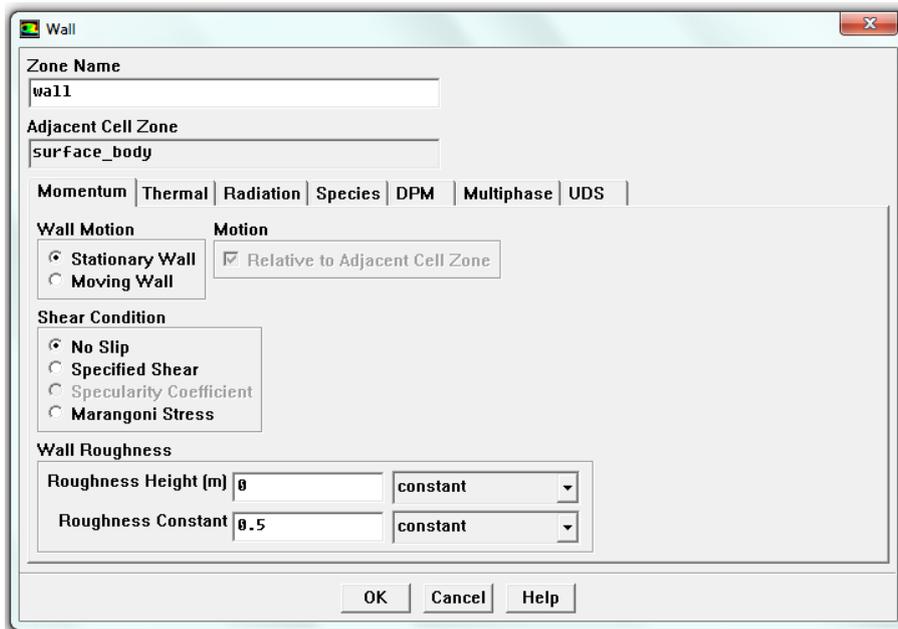


Figura 8.23: Parámetros de rugosidad para las paredes

## 8.2.6.4 Fluido

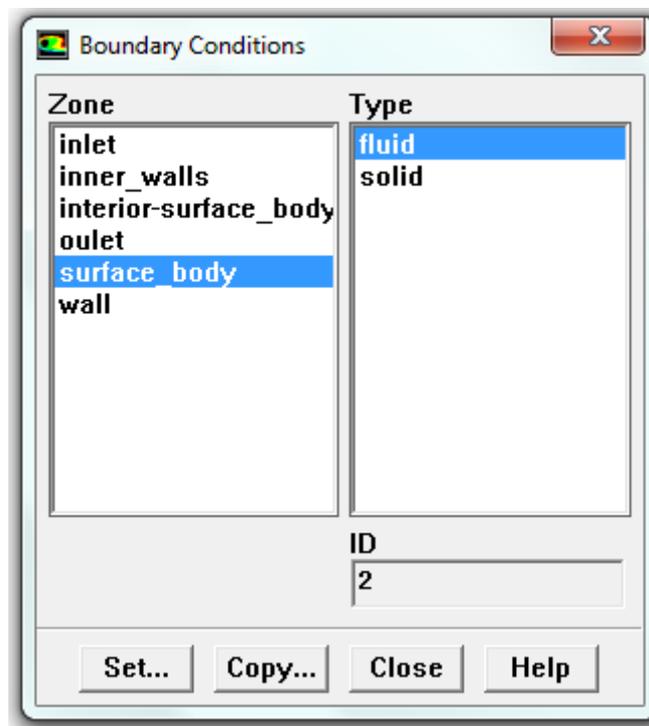


Figura 8.24: Definición de las condiciones de frontera para el fluido

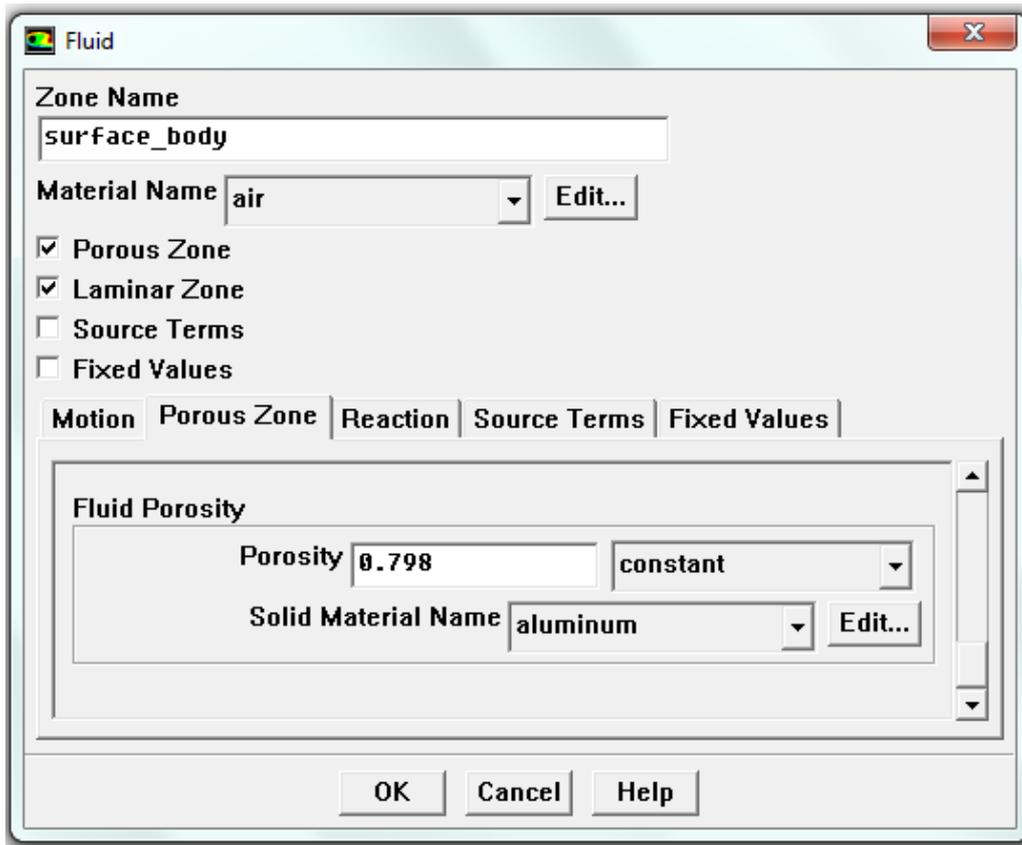


Figura 8.25: Porosidad que atraviesa el fluido

### 8.2.7 DEFINICIÓN DE SUPERFICIES POROSAS

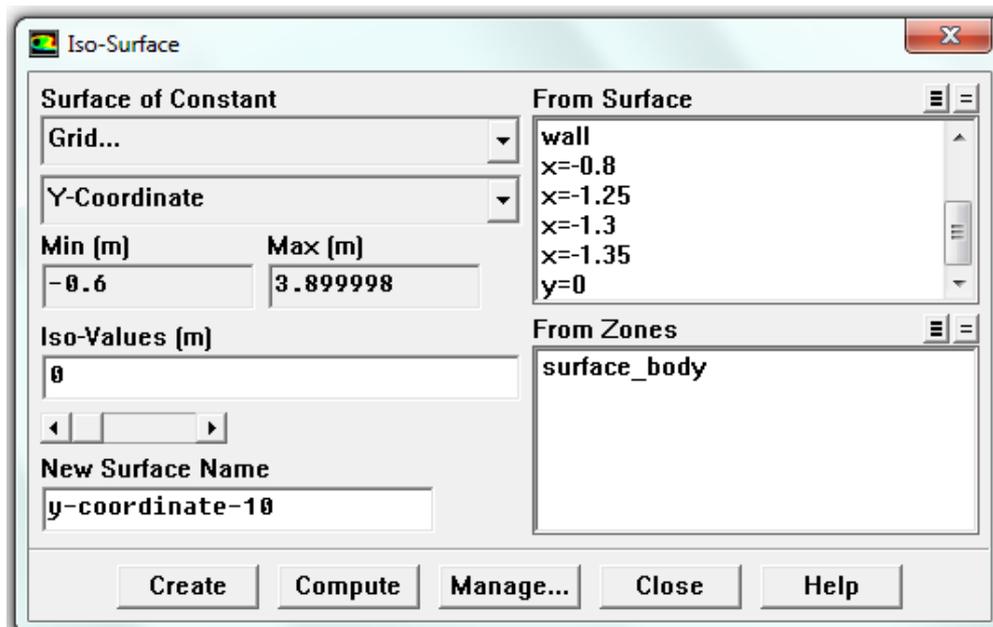


Figura 8.26: Definición de las superficies porosas

## 8.2.8 DEFINICIÓN DE LOS CONTROLES DE SOLUCIÓN

Se empieza por un análisis de Primer Orden

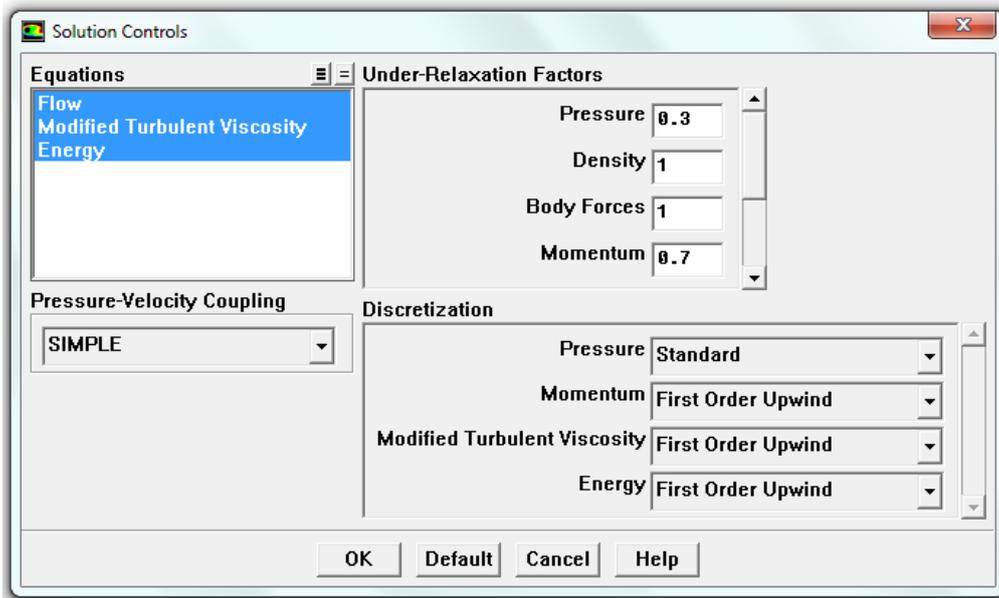


Figura 8.27: Definición de los controles de solución de primer orden

## 8.2.9 DEFINICIÓN DE LOS MONITORES DE RESIDUOS

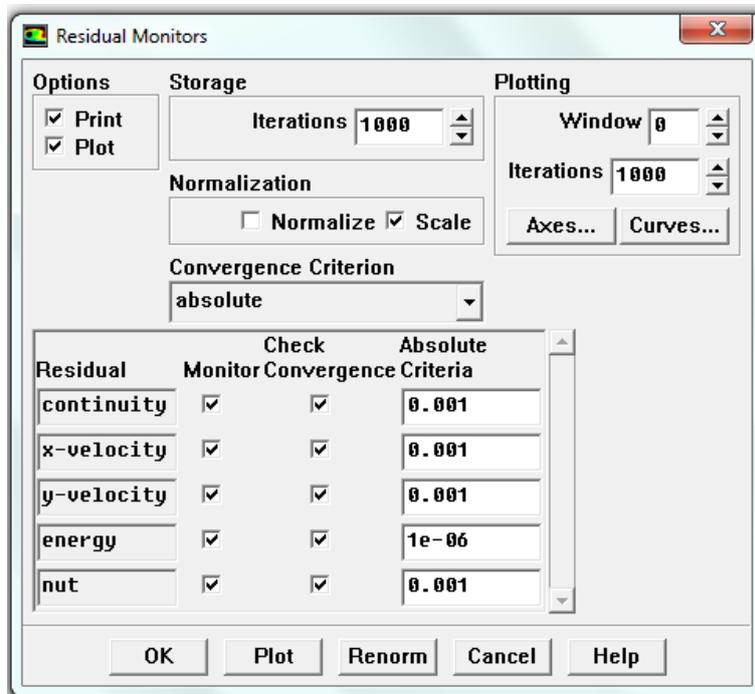


Figura 8.28: Definición de los monitores de residuos

8.2.10 DEFINICIÓN DEL NÚMERO DE ITERACIONES

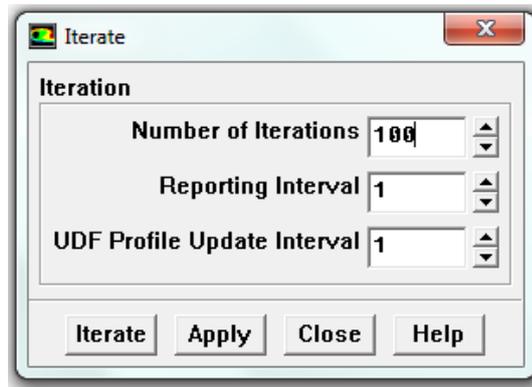
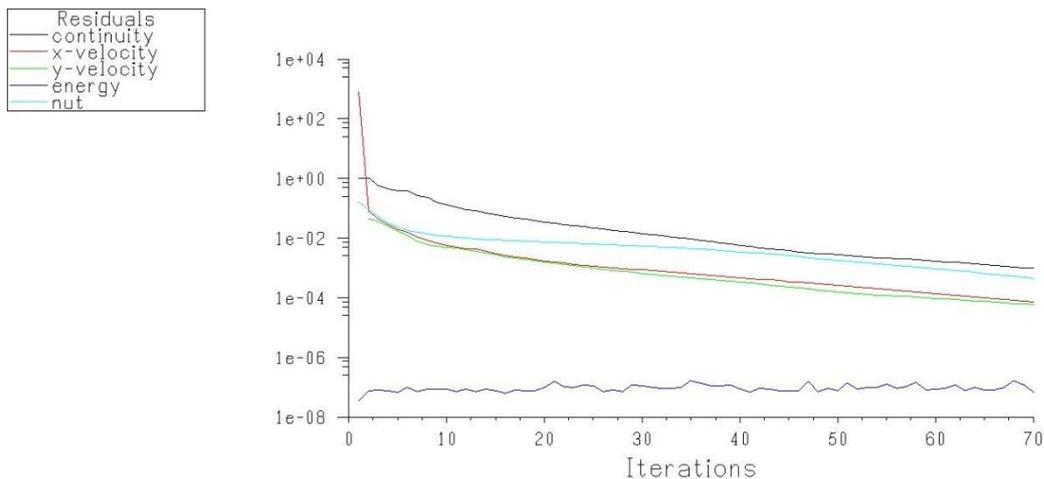


Figura 8.29: Definición del número de iteraciones

Tras las primeras iteraciones, la solución converge tras 70 iteraciones:

iter	continuity	x-velocity	y-velocity	energy	nut	time/iter	
67	1.1449e-03	9.0300e-05	6.9284e-05	1.0110e-07	5.7274e-04	0:00:45	133
68	1.0928e-03	8.4734e-05	6.6210e-05	1.6278e-07	5.3004e-04	0:00:36	132
69	1.0363e-03	7.9449e-05	6.2942e-05	1.1861e-07	4.8975e-04	0:00:28	131
?	70 solution is converged						
70	9.8118e-04	7.4560e-05	5.9333e-05	6.9424e-08	4.5228e-04	0:00:22	130

Figura 8.30: Solución de primer orden convergente



Scaled Residuals FLUENT 6.3 (2d, pbns, S-A)

Figura 8.31: Gráfico de residuos convergentes de primer orden

## SIMULACIÓN DE FLUJO EN 2D DEL TÚNEL DE VIENTO

Así pues, se pasa a un análisis de Segundo Orden para una solución más precisa y se vuelve a iterar:

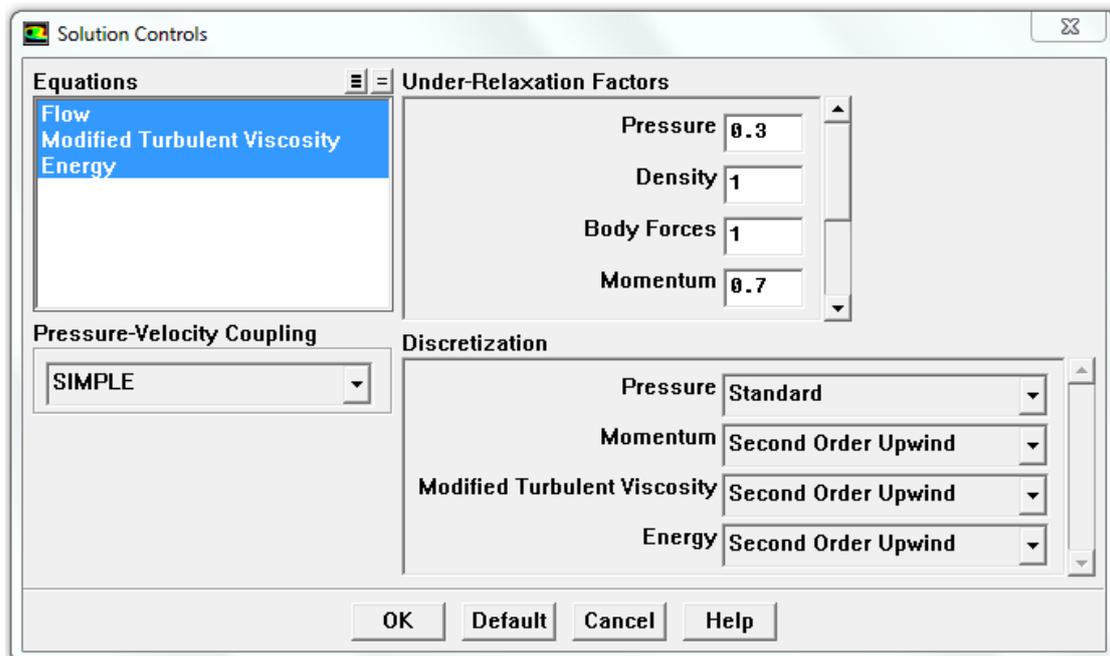


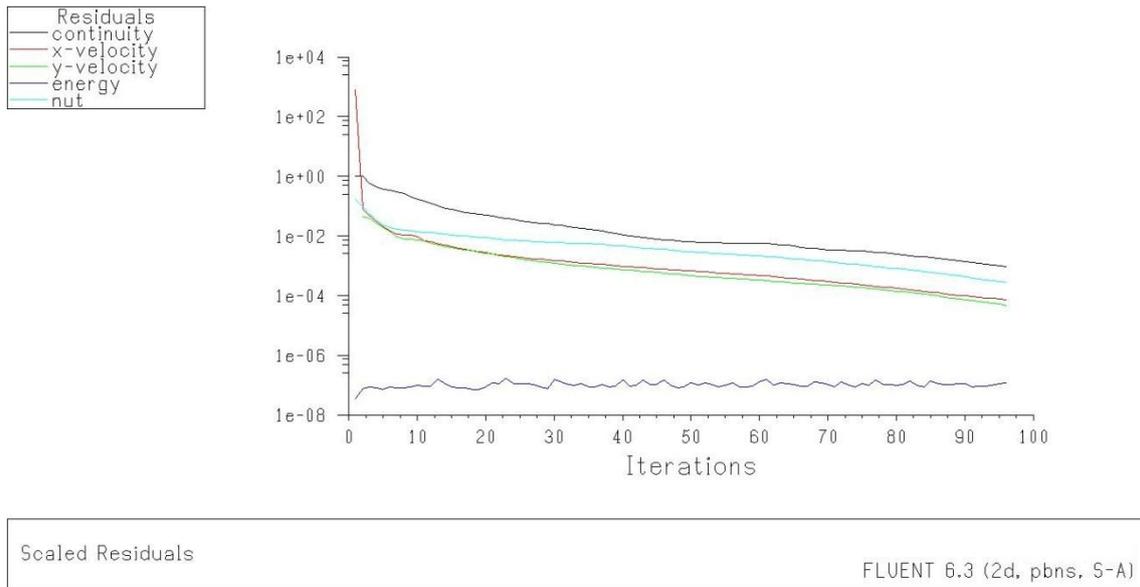
Figura 8.32: Definición de los controles de solución de segundo orden

```
iter continuity x-velocity y-velocity energy nut time/iter
89 1.4583e-03 1.0337e-04 7.8750e-05 1.1196e-07 4.5599e-04 0:00:30 111
90 1.3686e-03 9.7272e-05 7.3587e-05 1.1412e-07 4.2698e-04 0:00:24 110
91 1.2858e-03 9.2256e-05 6.8781e-05 8.8795e-08 3.9693e-04 0:00:19 109
92 1.2128e-03 8.8000e-05 6.3720e-05 9.1281e-08 3.6785e-04 0:00:37 108
93 1.1456e-03 8.3815e-05 5.8598e-05 9.3934e-08 3.4126e-04 0:00:29 107
94 1.0963e-03 8.0337e-05 5.4731e-05 9.8649e-08 3.1689e-04 0:00:23 106
95 1.0305e-03 7.5308e-05 5.1298e-05 1.1369e-07 2.9382e-04 0:00:18 105
? 96 solution is converged
96 9.7043e-04 7.1494e-05 4.7079e-05 1.2109e-07 2.7255e-04 0:00:35 104
```

Figura 8.33: Solución de segundo orden convergente

La solución converge para el análisis de Segundo Orden después de 96 iteraciones, por lo que ya se puede pasar a mostrar los resultados del análisis.

## SIMULACIÓN DE FLUJO EN 2D DEL TÚNEL DE VIENTO



**Figura 8.34: Gráfico de los residuos convergentes de segundo orden**

### 8.3 RESULTADOS DEL ANÁLISIS (MALLA TIPO “CURVATURA”)

#### 8.3.1 MAPA DE PRESIÓN ABSOLUTA

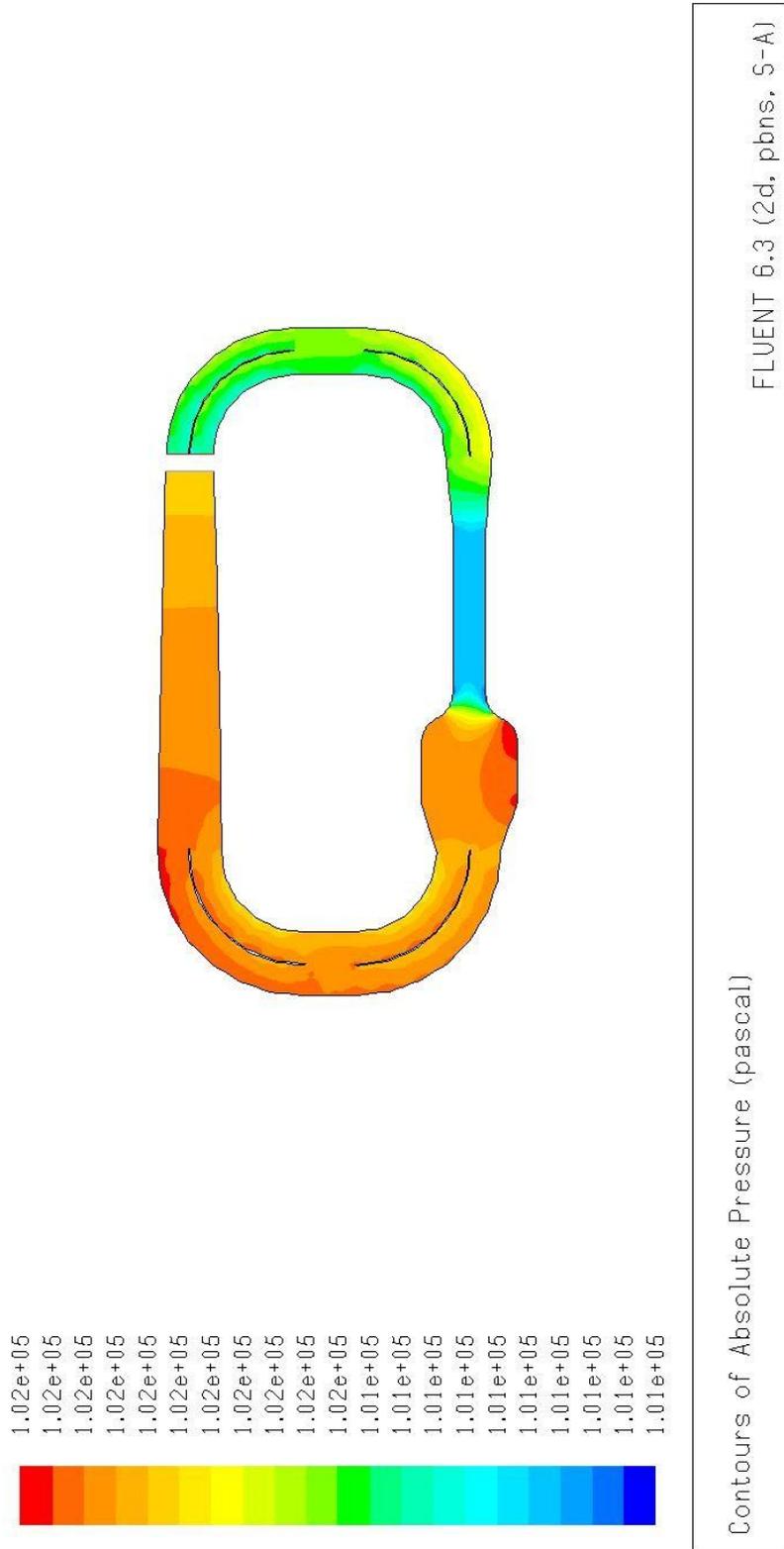


Figura 8.35: Mapa de presión absoluta en el túnel de viento

8.3.2 MAPA DE VELOCIDAD

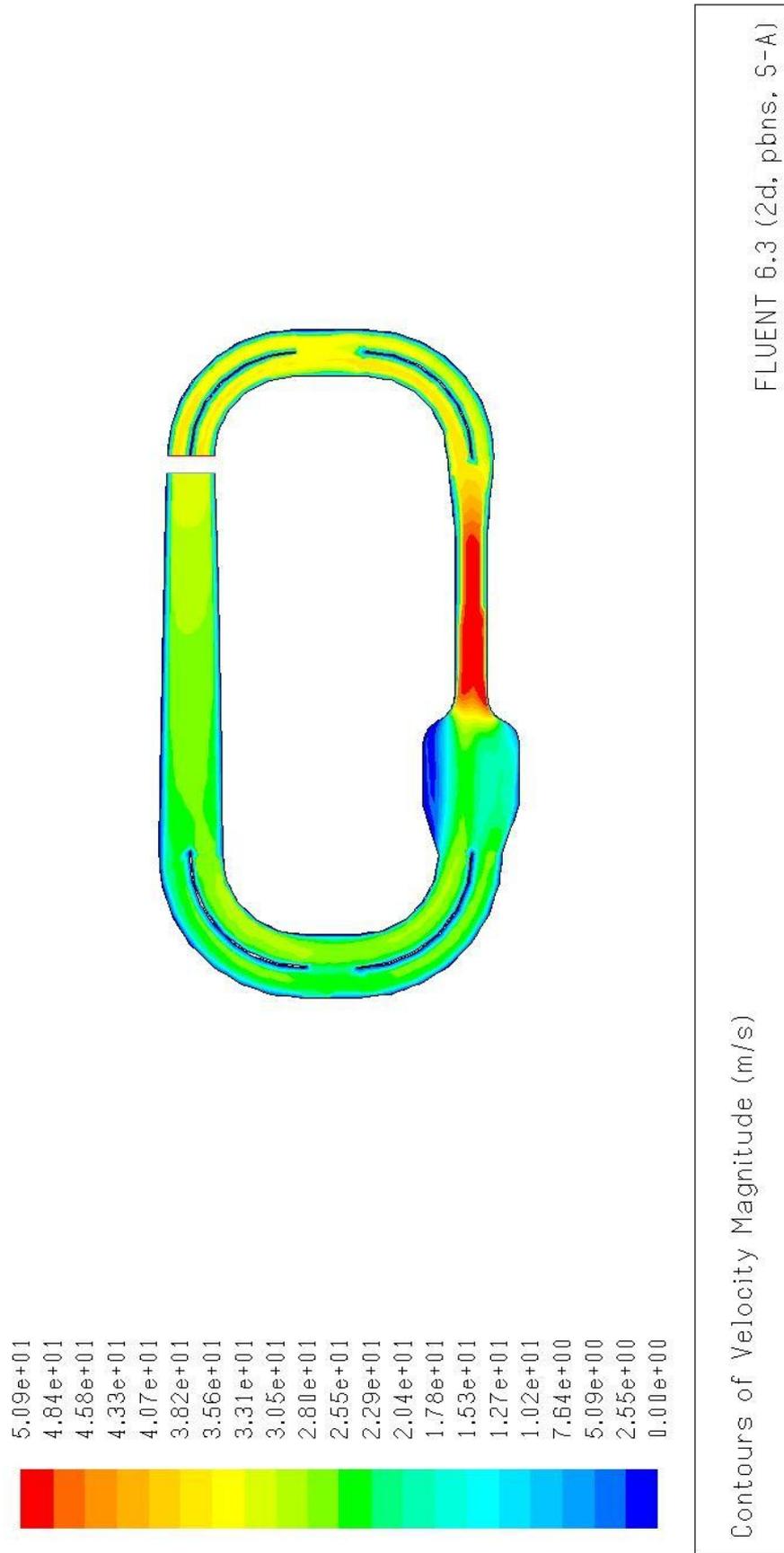


Figura 8.36: Mapa de velocidades en el túnel de viento

8.3.3 MAPA DE VECTORES DE VELOCIDAD

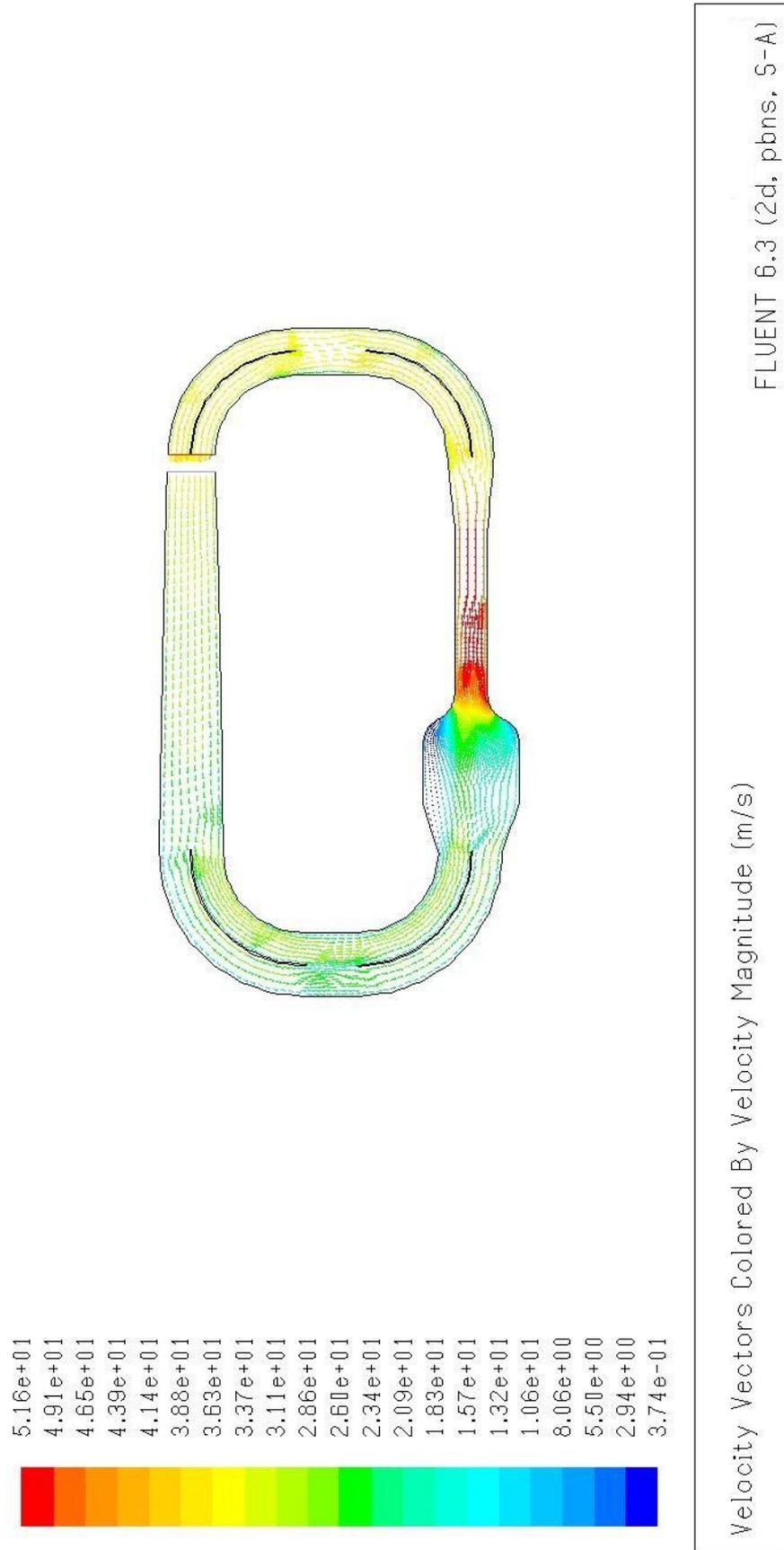


Figura 8.37: Mapa de vectores de velocidad en el túnel de viento

8.3.4 MAPA DE TEMPERATURA

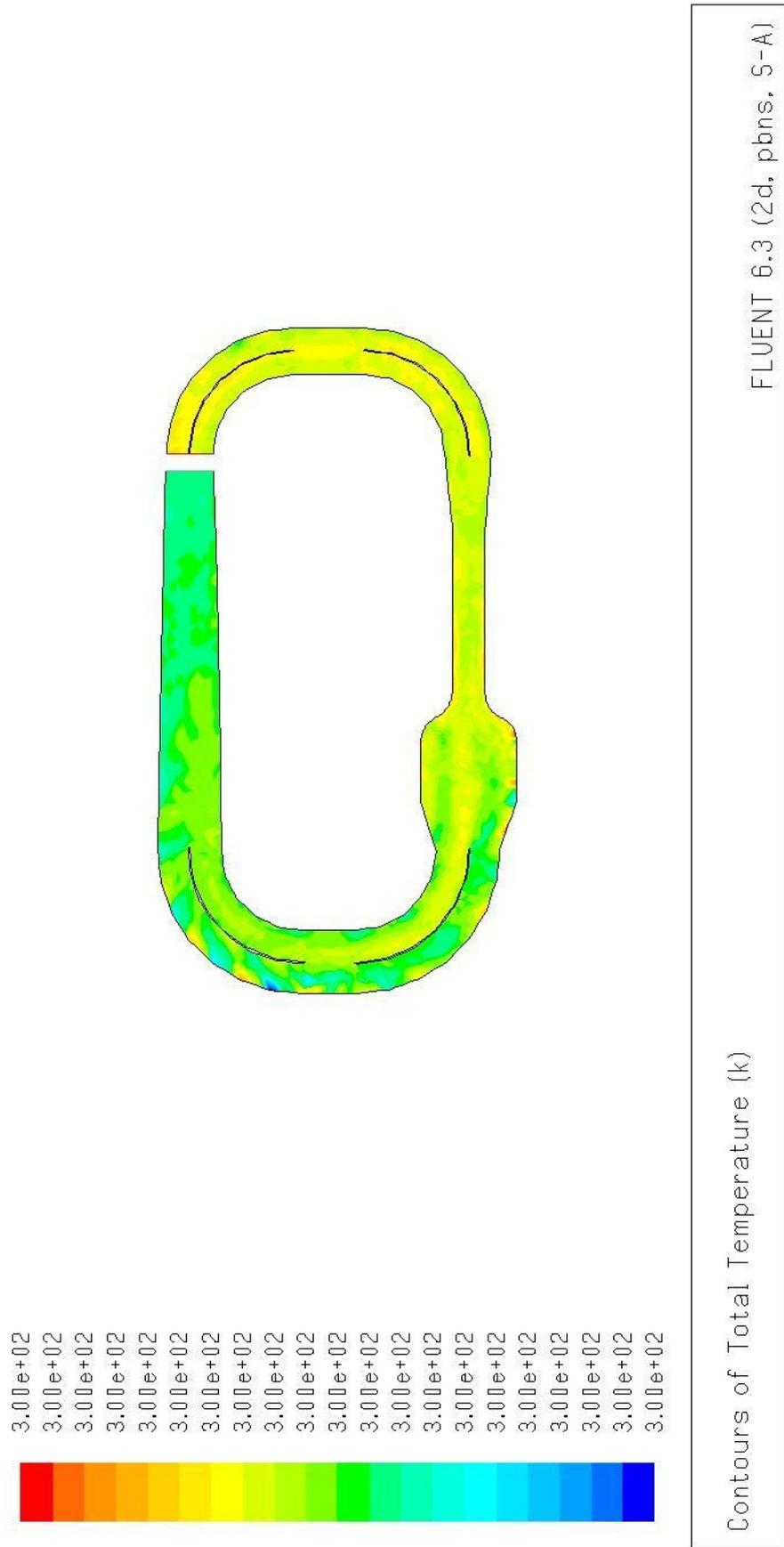


Figura 8.38: Mapa de velocidades en el túnel de viento

8.3.5 MAPA DE TURBULENCIA

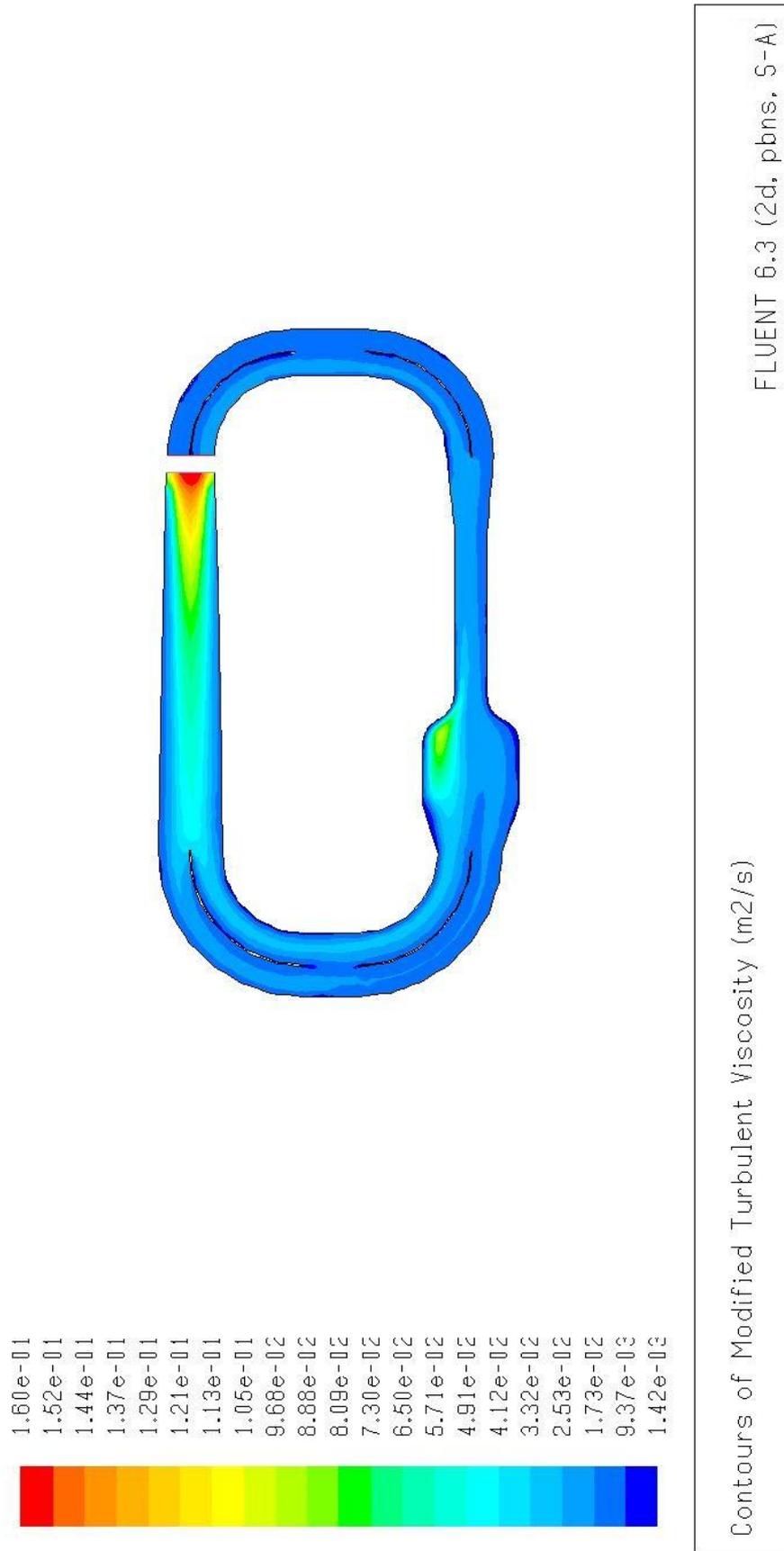


Figura 8.39: Mapa de turbulencias en el túnel de viento

## 8.4 RESULTADOS DEL ANÁLISIS (MALLA TIPO “PROXIMIDAD”)

### 8.4.1 RESULTADO DE LA ITERACIÓN

```

iter continuity x-velocity y-velocity energy nut time/iter
! 177 solution is converged
177 9.8486e-04 1.0551e-04 6.8035e-05 6.9132e-07 2.7891e-04 0:00:07 23
    
```

Figura 8.40: Solución convergente de segundo orden

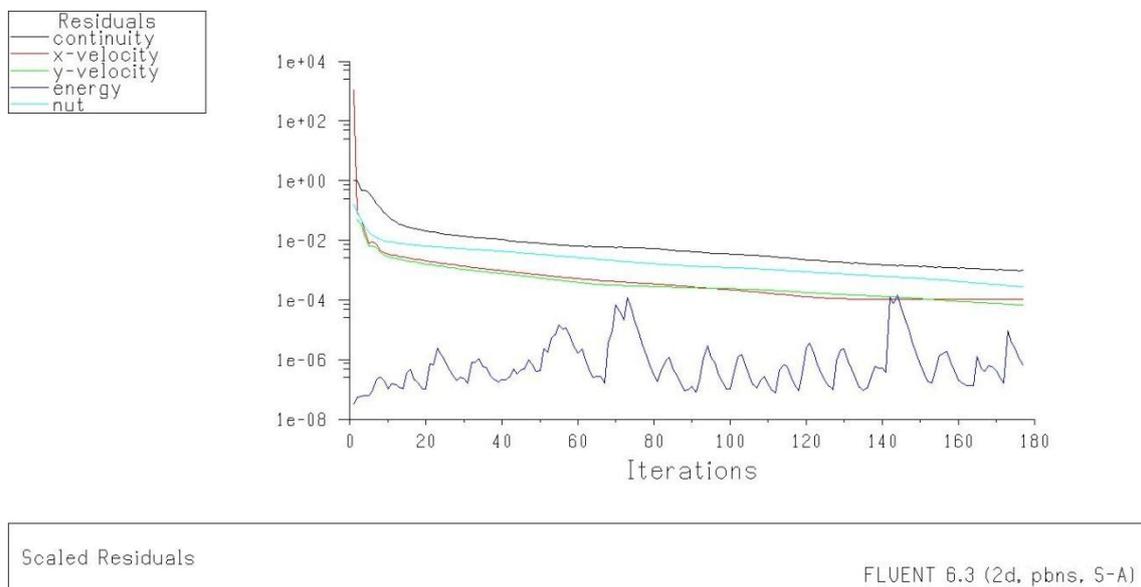


Figura 8.41: Gráfico de los residuos convergentes de segundo orden

Como se puede observar, el número de iteraciones necesarias para que el análisis de segundo orden en esta malla, converja, más de 80 iteraciones que para el mallado anterior, es decir, el tiempo del análisis se ve incrementado.



8.4.3 MAPA DE VELOCIDAD

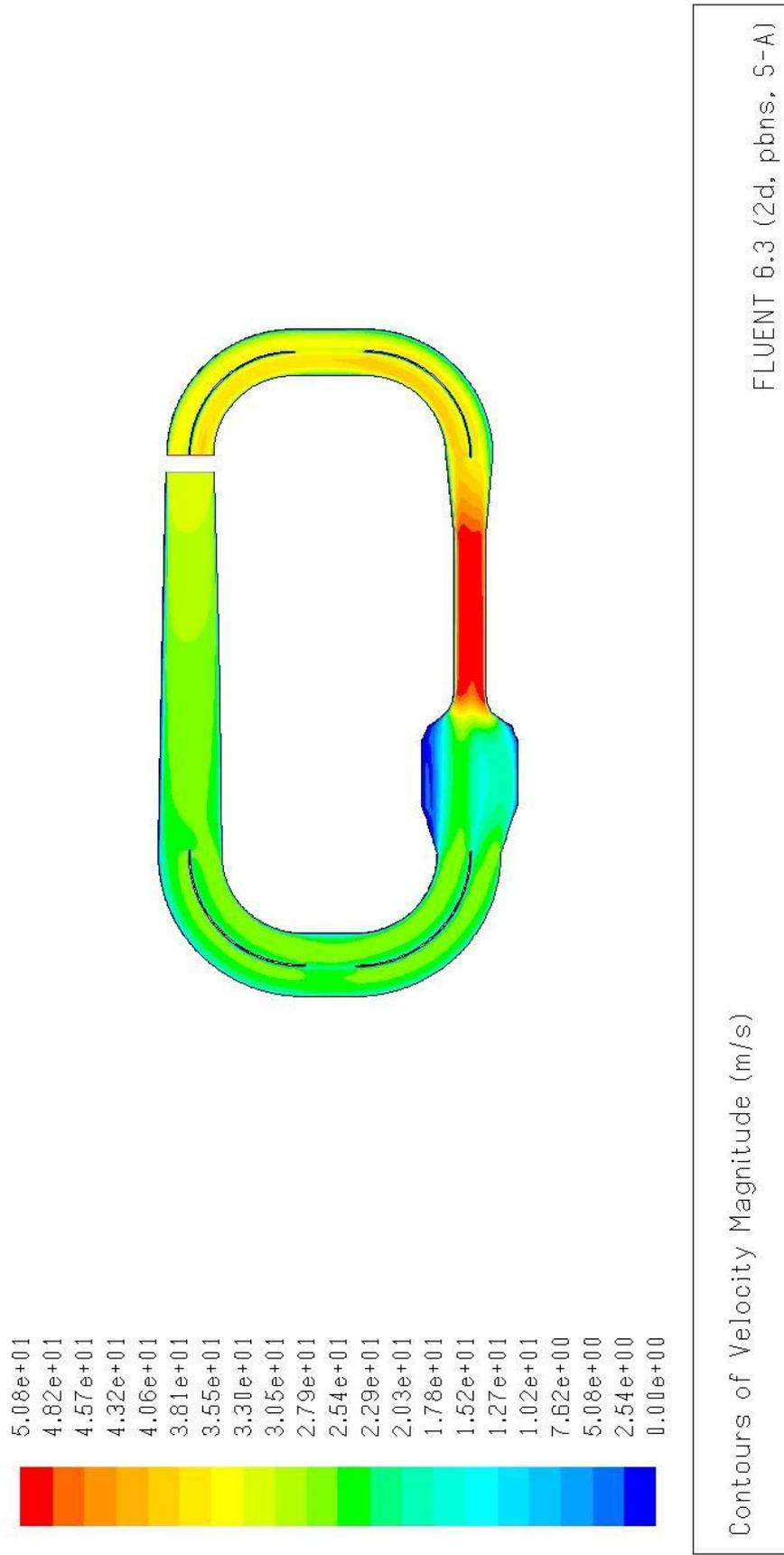


Figura 8.43: Mapa de velocidades en el túnel de viento

8.4.4 MAPA DE VECTORES DE VELOCIDAD

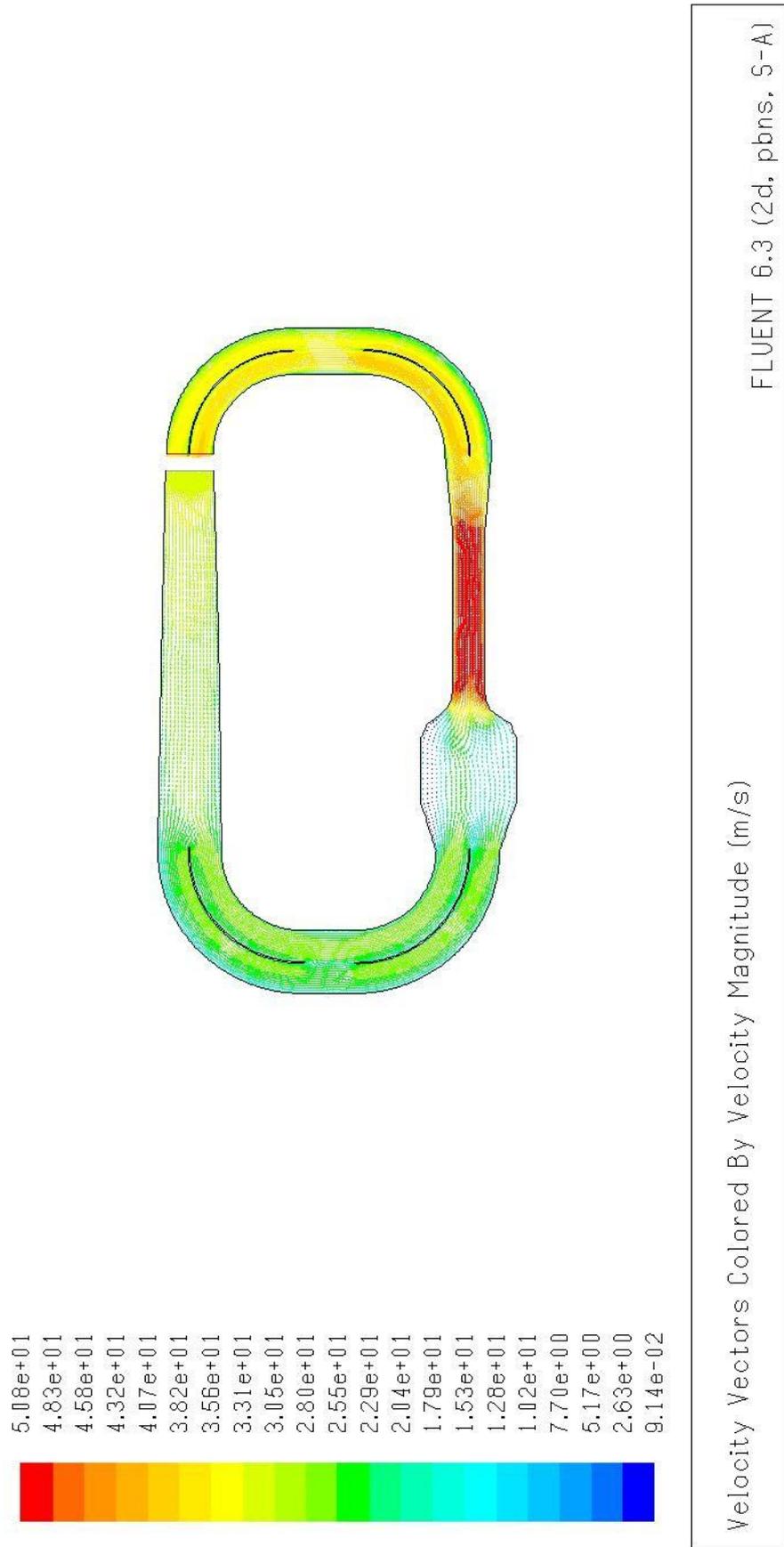


Figura 8.44: Mapa de vectores de velocidad en el túnel de viento

8.4.5 MAPA DE TEMPERATURA

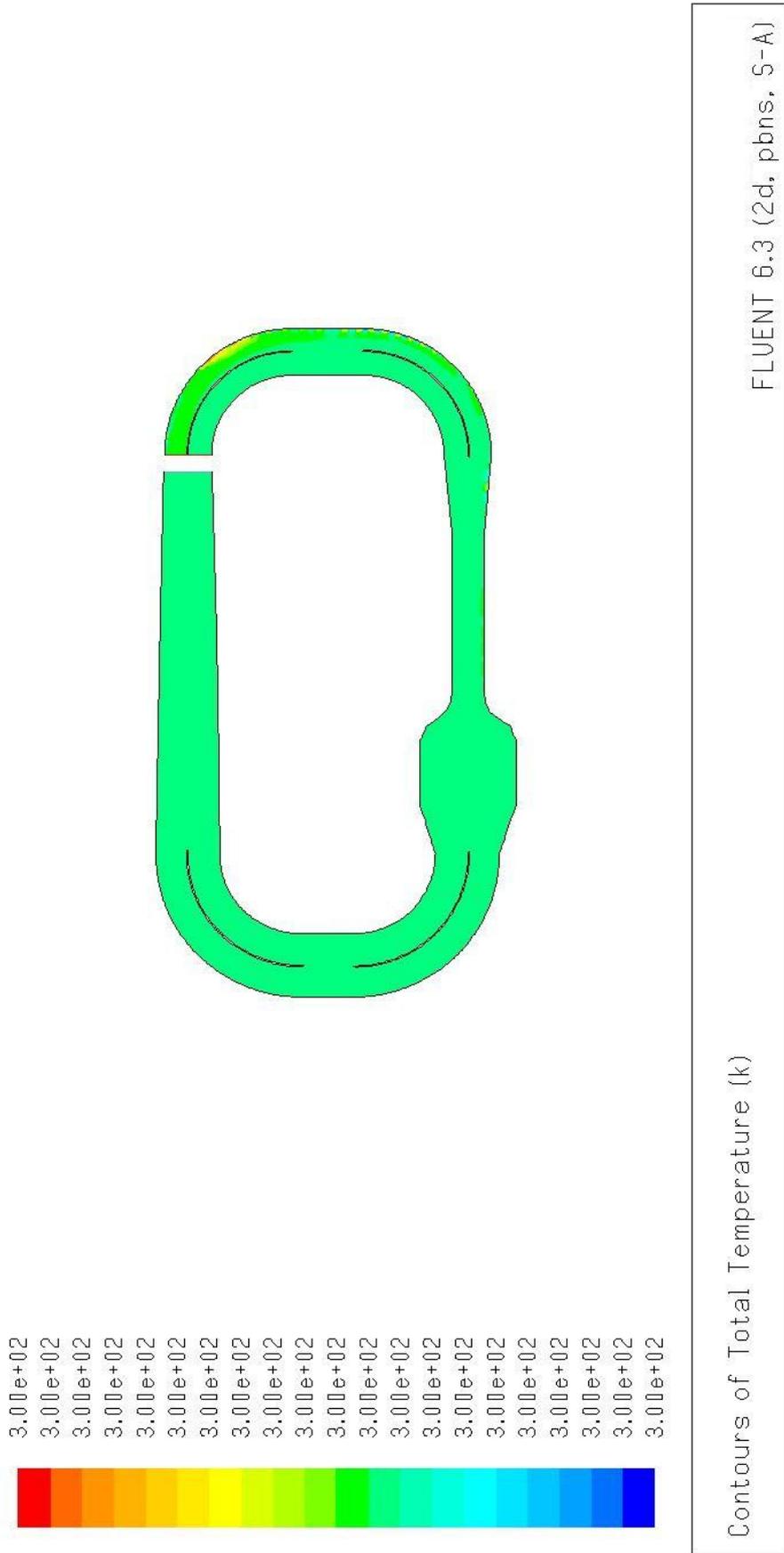


Figura 8.45: Mapa de temperatura en el túnel de viento

8.4.6 MAPA DE TURBULENCIA

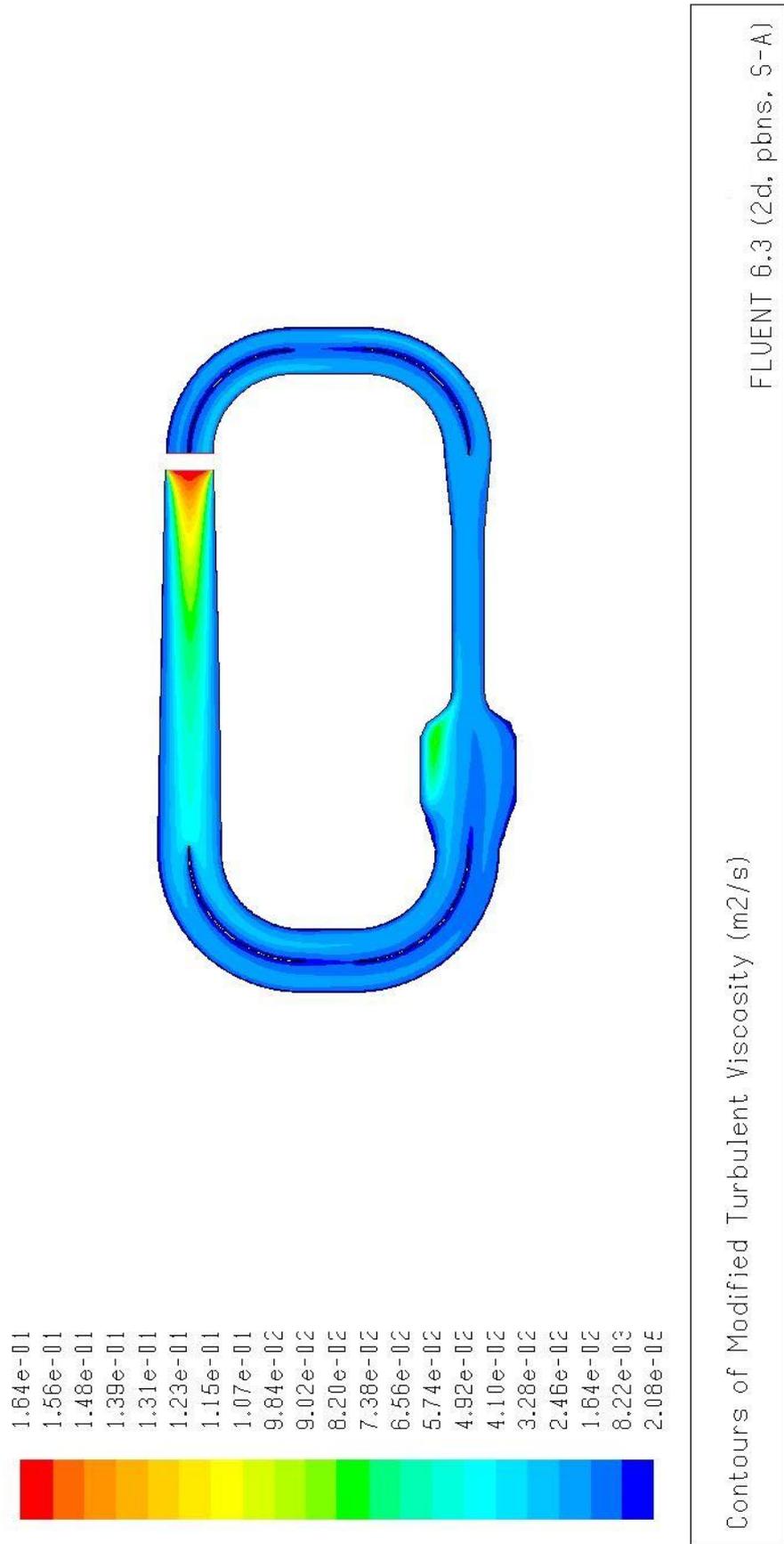


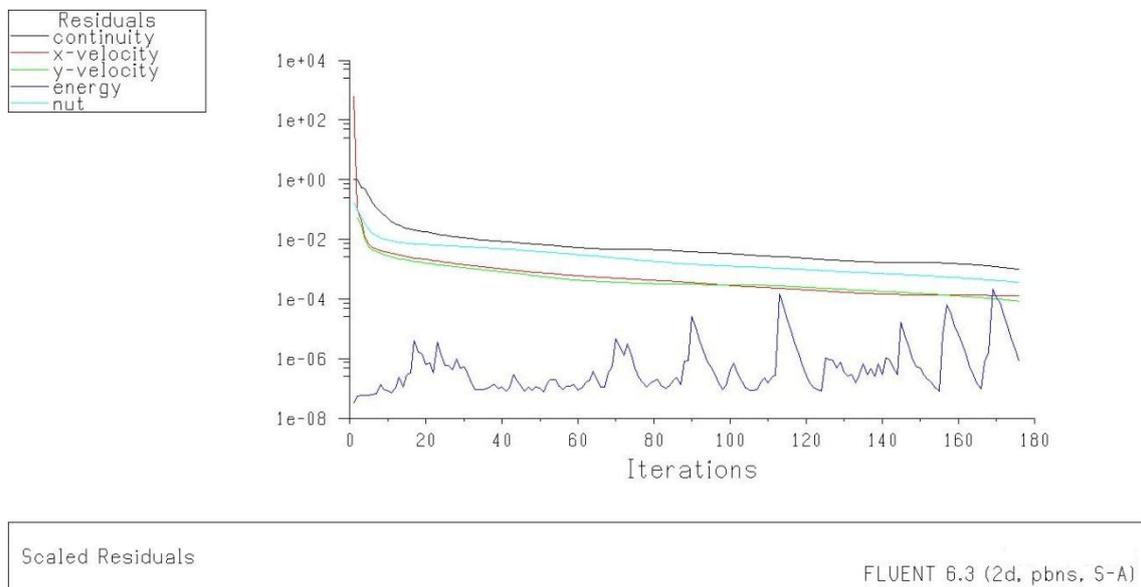
Figura 8.46: Mapa de turbulencias en el túnel de viento

## 8.5 RESULTADOS DEL ANÁLISIS (MALLA TIPO “CURVATURA Y PROXIMIDAD”)

### 8.5.1 RESULTADO DE LA ITERACIÓN

iter	continuity	x-velocity	y-velocity	energy	nut	time/iter
177	1.0030e-03	1.2859e-04	8.2438e-05	1.1354e-07	3.6108e-04	0:00:07 23
!	178 solution is converged					
178	9.7893e-04	1.2765e-04	8.0656e-05	9.5495e-08	3.5345e-04	0:00:05 22

**Figura 8.47: Solución convergente de segundo orden**



**Figura 8.48: Gráfico de los residuos convergentes de segundo orden**

En este caso se observa, que el número de iteraciones que necesita el análisis de segundo orden para converger para este mallado es bastante mayor que para el mallado *Tipo Curvatura*, pero apenas realiza 1 iteración más que el mallado *Tipo Proximidad*.

8.5.2 MAPA DE PRESIÓN ABSOLUTA

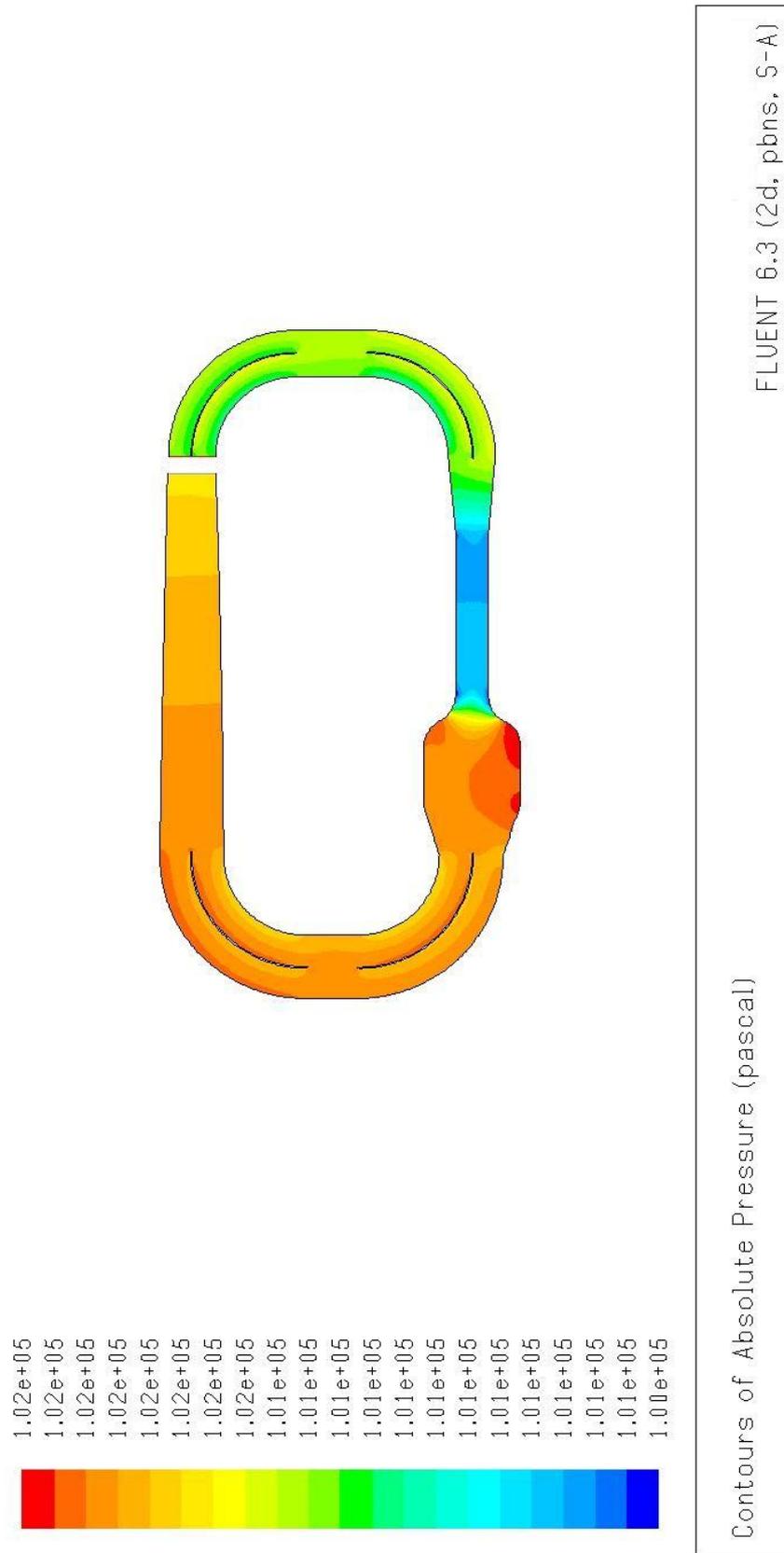


Figura 8.49: Mapa de presión absoluta en el túnel de viento

8.5.3 MAPA DE VELOCIDAD

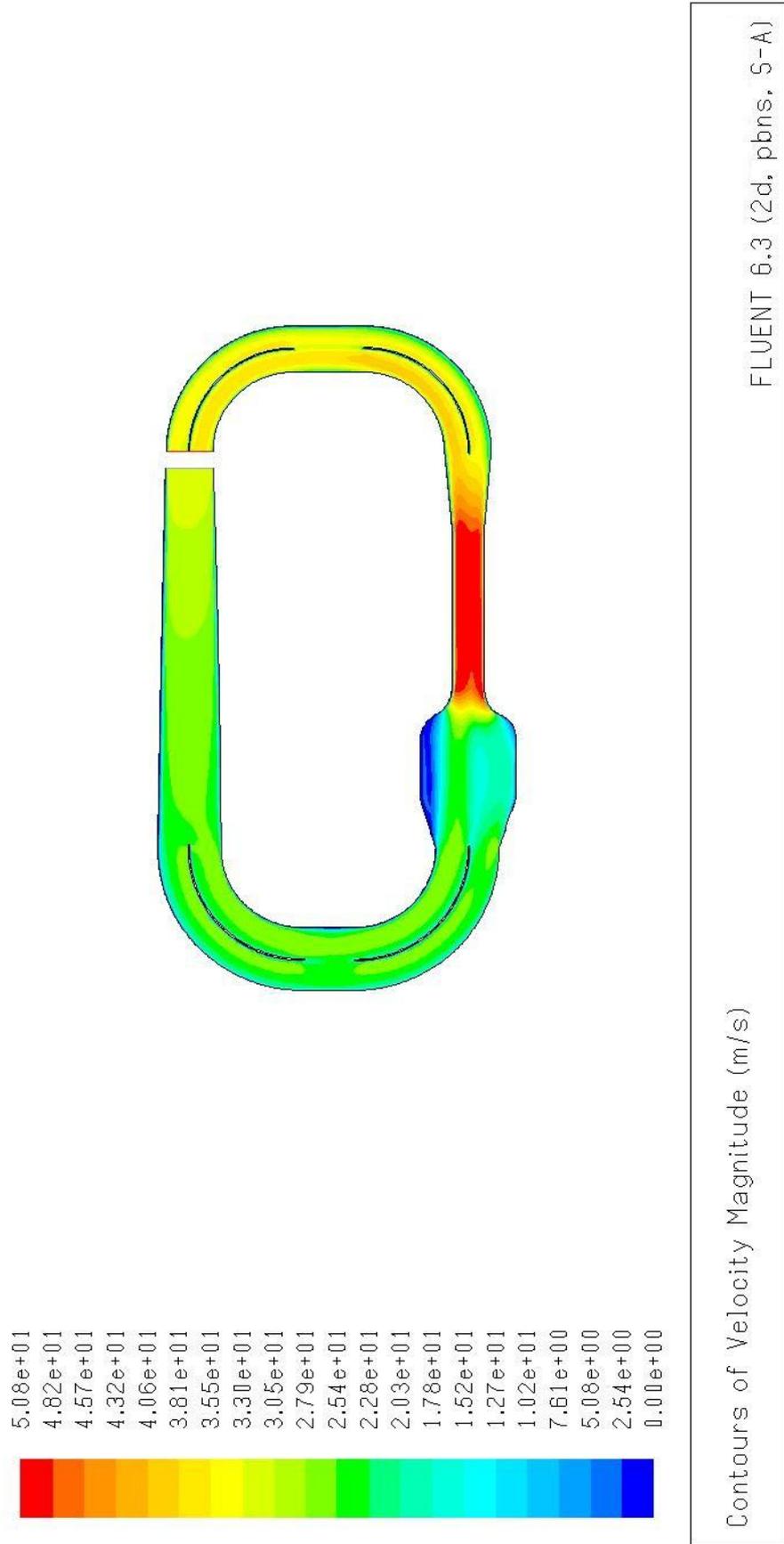


Figura 8.50: Mapa de velocidades en el túnel de viento

8.5.4 MAPA DE VECTORES DE VELOCIDAD

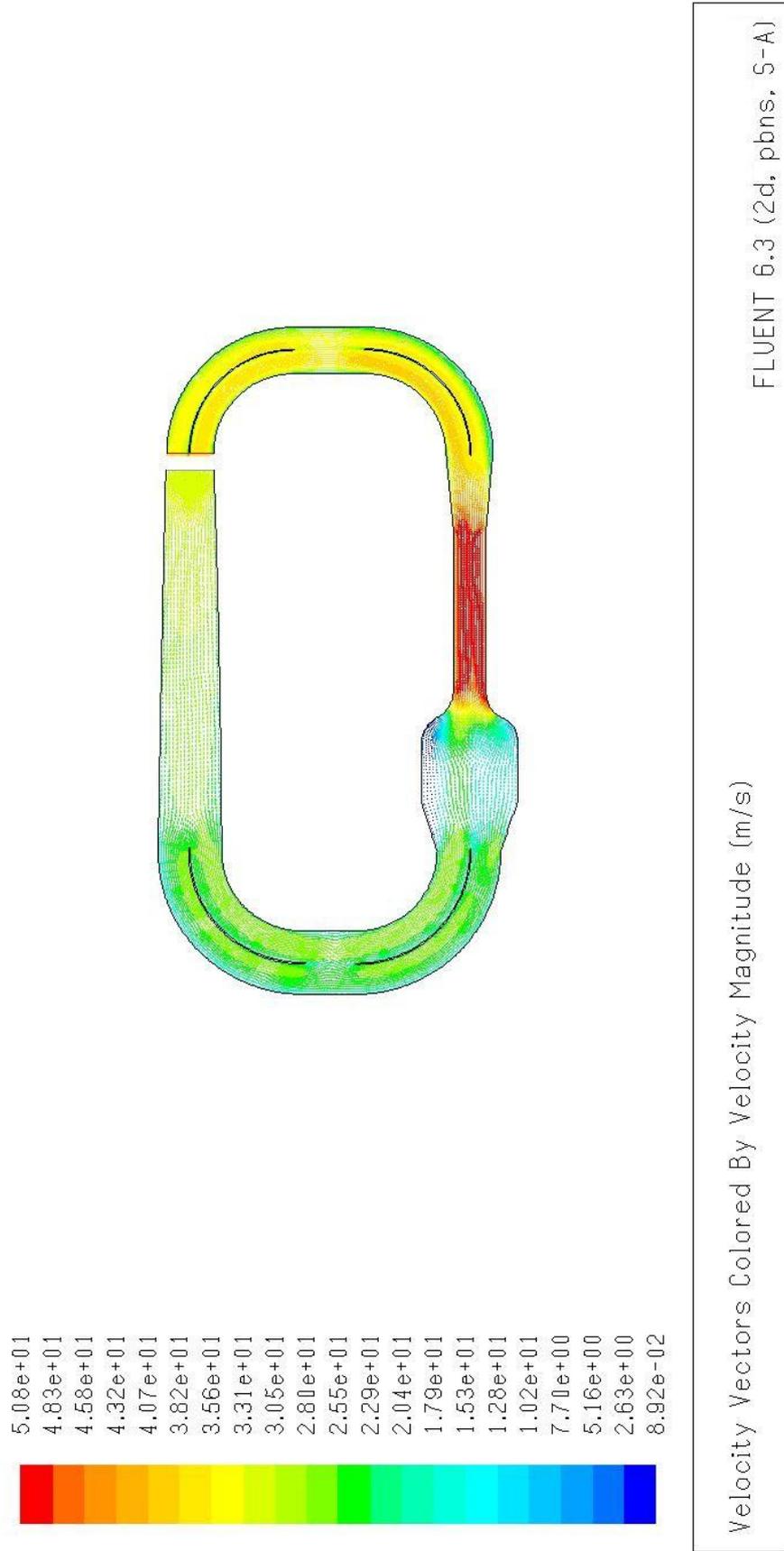


Figura 8.51: Mapa de vectores de velocidad en el túnel de viento

8.5.5 MAPA DE TEMPERATURA

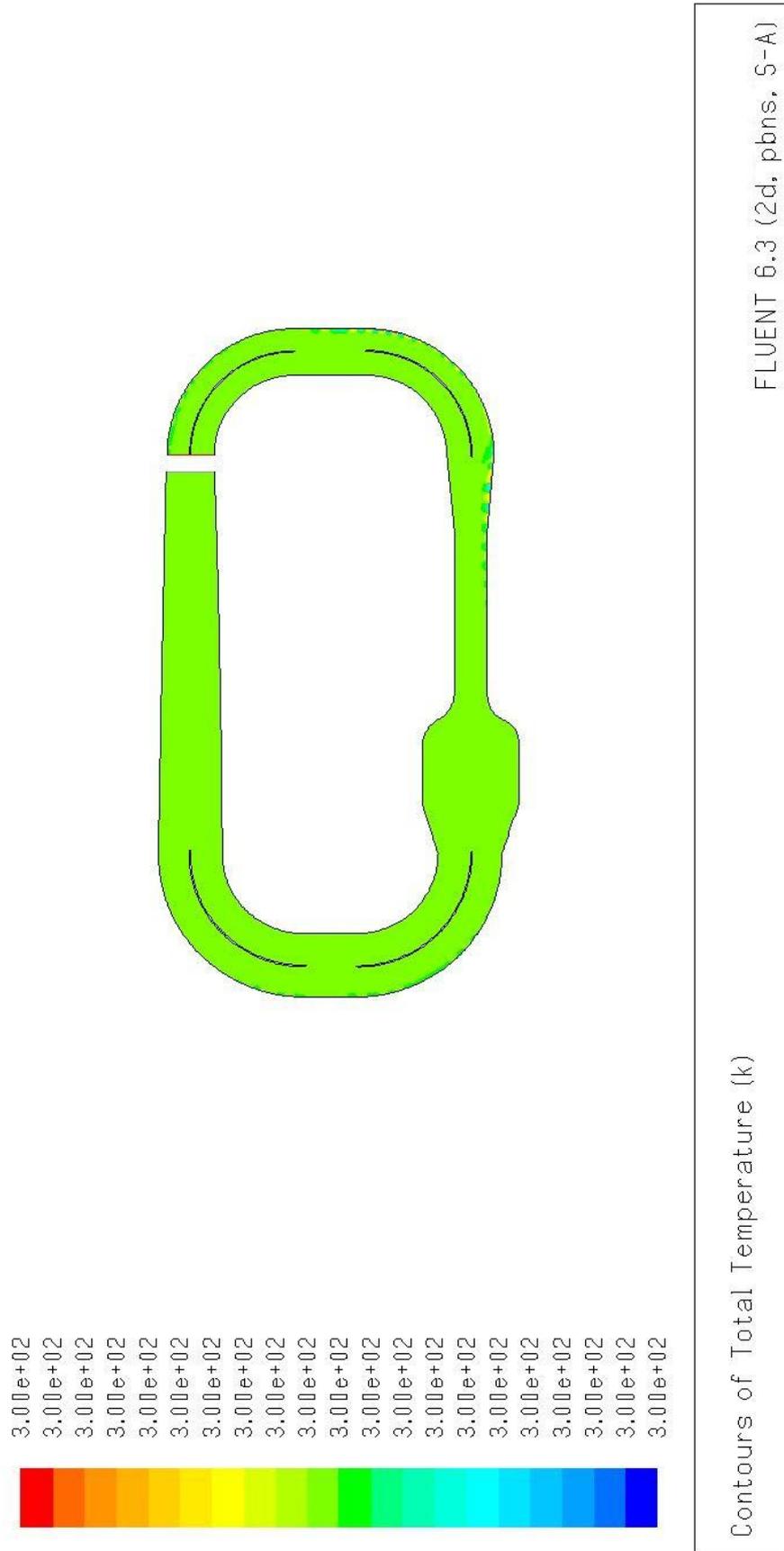


Figura 8.52: Mapa de temperaturas en el túnel de viento

8.5.6 MAPA DE TURBULENCIA

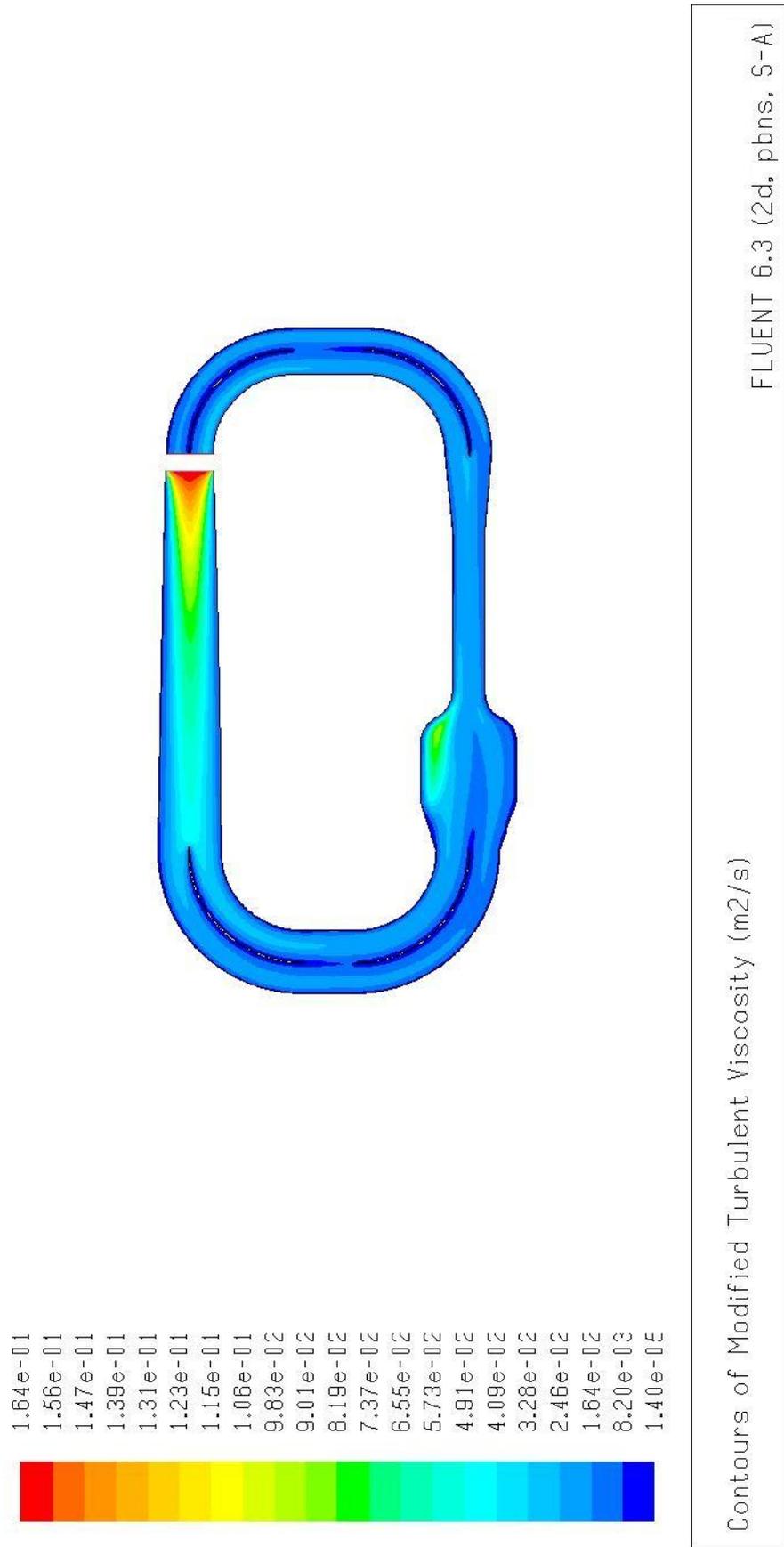


Figura 8.53: Mapa de turbulencias en el túnel de viento

## 8.6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este apartado analizaremos los resultados obtenidos en la simulación 2D del túnel de viento. En este caso, mostraremos los resultados obtenidos en los mapas de resultados para la sección de pruebas o ensayos.

	<b>TIPO "CURVATURA"</b>	<b>Error</b>	<b>TIPO "PROXIMIDAD"</b>	<b>Error</b>	<b>TIPO "CURVATURA Y PROXIMIDAD"</b>	<b>Error</b>
<b>Presión (Pa)</b>	1.01·e+05	±0.01·e+05	1.01·e+05	±0.01·e+05	1.01·e+05	±0.01·e+05
<b>Velocidad (m/s)</b>	5.09·e+01	±0.01·e+00	5.08·e+01	±0.01·e+00	5.08·e+01	±0.01·e+00
<b>Temperatura (K)</b>	3.00·e+02	±0.01·e+02	3.00·e+02	±0.01·e+02	3.00·e+02	±0.01·e+02
<b>Turbulencia (m<sup>2</sup>/s)</b>	1.73·e-02	±0.01·e-02	1.64·e-02	±0.01·e-02	1.64·e-02	±0.01·e-02

**Tabla 8:** Tabla de resultados para la sección de pruebas según mallado

	<b>TIPO "CURVATURA"</b>	<b>TIPO "PROXIMIDAD"</b>	<b>TIPO "CURVATURA Y PROXIMIDAD"</b>
<b>Nº Iteraciones</b>	96	177	178
<b>Nº Celdas</b>	3600	20048	21120
<b>Nº Caras</b>	7426	41086	43214
<b>Nº Nodos</b>	3823	21035	22091

**Tabla 9:** Tabla del número de iteraciones, celdas, caras y nodos según mallado

Para comenzar, analizamos los diferentes tipos de mallado según la Tabla 9. Comprobamos que la malla de *Tipo "Curvatura y Proximidad"* es la que más número de celdas, número de caras y número de nodos tiene, con un total de 21120 celdas, 43214 caras y 22091 nodos. Esto ayudará a que los resultados obtenidos puedan ser más precisos. A su vez, este mallado es el que mayor número de iteraciones necesita para converger la solución del análisis, con un total de 178. Esto quiere decir que es la malla que más tiempo tarda en conseguir los resultados.

## SIMULACIÓN DE FLUJO EN 2D DEL TÚNEL DE VIENTO

---

Según la Tabla 9, la malla *Tipo “Proximidad”* se asemeja en números a la malla *Tipo “Curvatura y Proximidad”*, por lo que podemos prever que los resultados para ambas mallas no estarán muy alejados entre sí. Sin embargo, para la malla *Tipo “Curvatura”* observamos que tanto en el número de iteraciones, como en el número de celdas, caras y nodos, es notablemente inferior. Esto nos indica que esta malla puede ser la menos precisa, y es la que menos tiempo tarda en realizar el análisis y conseguir los resultados.

Pasamos a analizar los datos de la Tabla 8; como se puede observar, apenas hay cambios en los números obtenidos por los mapas de resultados, de hecho, los resultados se repiten exceptuando para el dato de *Velocidad* y de *Turbulencia* para la malla *Tipo “Curvatura”* que es mayor que para los otros dos *Tipos*. Esto quiere decir, que para la Sección de Pruebas existe una ligera mayor turbulencia para este tipo de malla. Pese a que el resto de datos ofrecidos en esta Tabla 8 son todos iguales, y concuerdan con los resultados teóricos obtenidos anteriormente en el Capítulo 5, pasamos a observar los Mapas de Resultados, en los cuales comenzamos a notar claramente diferencias entre los *Tipos de Mallado*.

Tras analizar los Mapas de los diferentes mallados, se observan diferencias gráficas que nos ayudan a comprender mejor el comportamiento del flujo a través del túnel de viento, entendiendo que el mallado *Tipo “Curvatura y Proximidad”* será el que mayor precisión de resultados nos ofrezca.

En el Mapa de Presión Absoluta comprobamos que los datos obtenidos se ajustan a los datos teóricos, variando los resultados desde  $1.01 \cdot 10^5$  Pa hasta  $1.02 \cdot 10^5$  Pa en los tres *Tipos de Mallado*. Pese a esto, según los colores del Mapa, para el mallado *Tipo “Curvatura y Proximidad”* se puede ver una menor presión en la cámara de ensayos, con lo que nos quedamos en este caso con este *Tipo de Mallado*.

En los Mapas de Velocidad, vemos que la velocidad que sigue el flujo a través de los conductos del túnel de viento se asemejan a los resultados obtenidos teóricamente, llegando a obtener una velocidad aproximada de  $50 \text{ m/s}$  en la zona de la cámara de ensayos en los tres *Tipos de Mallado*. Sin embargo, comprobamos que la velocidad más estable en toda la geometría de la cámara de ensayos la encontramos en el Mapa de Velocidad para la malla *Tipo “Curvatura y Proximidad”*, con lo que optamos por elegir esta malla.

En el Mapa de Temperatura, la temperatura no tiene variaciones y se mantiene constante a  $300^\circ\text{C}$  en los tres *Tipos de Mallado*. En este caso nos mantendremos indiferentes a la hora de elegir un *Tipo de Mallado*.

En el Mapa de Turbulencia lo analizamos gráficamente y comprobamos que a lo largo de túnel de viento, el flujo no sufre turbulencias y se considera un flujo laminar en la zona de la cámara de ensayos en los tres *Tipos de Mallado*.

## SIMULACIÓN DE FLUJO EN 2D DEL TÚNEL DE VIENTO

---

Tras un análisis gráfico, y apoyándonos en los datos de los resultados, confirmamos que en malla en la cual encontramos menos turbulencias en la cámara de ensayos es en la malla *Tipo "Proximidad"* y *Tipo "Curvatura y Proximidad"*, con lo que serían estas las elegida para nuestro caso.

Para finalizar el análisis, podemos decir que los resultados obtenidos son buenos y precisos, en consonancia con los datos previamente calculados de manera teórica. Es decir, el túnel de viento diseñado mantiene un flujo laminar en todo su recinto, teniendo la velocidad requerida en la zona de ensayos, y sin variaciones de temperatura y presión. Estamos entonces, ante un túnel de viento que cumple con las exigencias propuestas desde un principio, y que podrá ser utilizado de manera fiable y segura para el estudio aerodinámico.

# 9 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

---

## 9.1 CONCLUSIONES

En esta sección se recogen las conclusiones más significativas derivadas de la realización del presente Proyecto Fin de Carrera. Inicialmente se expondrán las conclusiones relacionadas con el trabajo de investigación desarrollado para, a continuación, destacar alguna conclusión personal.

En primer lugar, destacar la gran variedad de recursos que permite un software de diseño 3D, proporcionando facilidad para el diseño y modelado de un túnel de viento de baja velocidad. El túnel de viento diseñado es una valiosa herramienta didáctica que facilita el estudio y comprensión en el campo de la aerodinámica.

El problema de un túnel de viento viene derivado de los problemas a la hora de conseguir un régimen de flujo laminar en la sección de pruebas. Este problema se ha corregido con un diseño novedoso de las secciones de los conductos. Un diseño que viene precedido de un riguroso estudio del comportamiento del fluido a través de las tuberías. Hay que resaltar la importancia de un diseño de las tuberías específico para este tipo de problemas. Un diseño que comienza con la eliminación de cualquier posible concentración de generadores de turbulencias, como vienen siendo las esquinas cuadradas de las tuberías que hasta ahora se venían diseñando para los túneles de viento.

Otro diseño importante son los deflectores. Hasta el momento se diseñaban varios deflectores para reconducir el flujo que pasaba por las esquinas del circuito cerrado del túnel de viento. En este trabajo se apostó por un diseño de los deflectores de una sola pieza, consiguiendo así una reducción en el coste del túnel de viento y unos resultados más que óptimos que garantizan el correcto funcionamiento de esta herramienta de estudio.

La elección del propulsor es una pieza muy importante, puesto que es el generador del flujo dentro del túnel, convirtiéndose así en un requerimiento de alto estudio y conocimiento a la hora de diseñar un túnel de viento. Por esto, y por ser una parte importante del coste final, su elección acompaña en todo momento una gran implicación por parte de quien lo diseña.

Gracias a que hoy en día se cuenta con buenos simuladores de flujos, nuestro trabajo ha sido encauzado con más o menos facilidad, obteniendo unos resultados acordes con las teorías que se aplican en este tipo de elementos. Unos resultados que reflejan unos datos que desde un principio se venían buscando, ayudados por este tipo de simuladores. Datos que han sido obtenidos mediante un exhaustivo estudio de las teorías empíricas de flujo. Todo ello para conseguir que en nuestro de túnel de viento se puedan practicar estudios aerodinámicos veraces y con un alto porcentaje de precisión.

Observando el *Análisis de los Resultados*, concluimos que para un diseño del túnel de viento en el cual se premie la rapidez de la obtención de los resultados, el mallado elegido deberá ser el *Tipo "Curvatura"*. Mientras que si lo que buscamos es precisión en los resultados, tanto el mallado *Tipo "Proximidad"* como el *Tipo "Curvatura y Proximidad"* deberán de ser nuestras elecciones. No obstante y tras el *Análisis de los Resultados*, el mallado *Tipo "Curvatura y Proximidad"* puede llegar a ser el más preciso de los dos *Tipos*.

Finalmente, destacar que a nivel personal este proyecto ha servido para aumentar mi aprendizaje y manejo con herramientas de diseño y modelado en 3D, así como ha simular y analizar datos de flujo en geometrías en 2D. Esta investigación ha servido para adquirir una perspectiva más general de cómo afrontar los problemas relacionados con el diseño, simulación y análisis de grandes herramientas de estudio, como es el túnel de viento, así como de los aspectos a tener en cuenta a la hora de realizar un trabajo de investigación. Este trabajo ha supuesto una experiencia enormemente enriquecedora sobre una rama del estudio aerodinámico que desconocía y que ha incrementado el interés del ponente para seguir investigando en este campo.

Como conclusión final, destacar que en la investigación no siempre se consiguen los resultados esperados, pero con esfuerzo y trabajo se pueden conseguir cosas muy importantes, aunque estas lleguen con el paso del tiempo.

### 9.2 LÍNEAS FUTURAS

Los estudios realizados en el presente Proyecto Fin de Carrera dejan abiertas muchas líneas de investigación.

Por una parte, el trabajo realizado sobre el diseño del túnel de viento es difícil de mejorar, puesto que las condiciones que se deben dar en la cámara de ensayos son de una alta calidad y precisión, en concordancia con lo

## CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

---

requerido inicialmente y posteriormente ratificado con las teorías de flujos. No obstante, una posible línea de investigación sería profundizar en la reducción de dimensiones del propio túnel, puesto que es evidente que con una reducción de estas, se mejoraría la implementación de dicho túnel en laboratorios más pequeños, llegando así a facilitar el estudio de casi cualquier persona que disponga de una habitación, no demasiado grande.

Por otro lado, el trabajo de diseño de las tuberías, deflectores y zona de acondicionamiento y la elección del propulsor permite abrir varias ramas de investigación. Por un lado, es posible reducir aún más la potencia con la que se impulsa el aire desde el propulsor, diseñando dichas secciones con una mayor precisión, llegando a conseguir las mismas condiciones de flujo en la sección de ensayos, pero consumiendo menor energía y por lo tanto reduciendo los costes del túnel de viento. Por otro lado, la investigación en el ámbito de los materiales utilizados en un túnel de viento, puede llegar a ser de gran importancia, ya que las pérdidas de carga a través de los conductos y por lo tanto, pérdida de velocidad, son tan importantes como el resto de elementos que componen un túnel de viento.

No cabe la menor duda, que cualquiera de estas líneas de investigación será una ardua tarea, que se verá recompensada con los buenos resultados que en ellas se obtengan.



# 10 PRESUPUESTO

A continuación se detalla el cálculo de los costes aproximados de la realización del proyecto descrito en la presente memoria. El presupuesto se dividirá en el cálculo de dos bloques diferenciados, por un lado los costes asociados a materiales empleados y por otro, los costes debidos a honorarios de las personas que han participado en el proyecto.

## 10.1 COSTE DEL MATERIAL

En este apartado se incluyen tanto los costes de la parte de hardware y software, como de cada uno de los materiales utilizados para la realización de los elementos del túnel de viento.

- PC con un coste aproximado de 600€. Puesto que puede ser reutilizado, su coste puede amortizarse hasta la cantidad de 400€.
- Espacio de trabajo con las debidas condiciones de luz, calefacción, más el mobiliario necesario; tiene un coste asociado de 500€. Al tratarse de un sala compartida, tendrá un coste individual asociado de 50€/mes. Puesto que el proyecto a durado 6 meses, el coste asociado asciende a 300€.
- La licencia educativa del software PRO-Engineer tiene un coste de 3.000€. Al tratarse de una licencia compartida, el coste individual asociado es de 10€ [10].
- La licencia educativa del software ANSYS 12.1 tiene un coste de 4000€. Dicha licencia es compartida, por lo que el coste individual asociado es 15€ [16].
- Tol de acero negro, con una superficie requerida para la construcción de todas las piezas de tuberías y de los deflectores del túnel de  $70m^2$ , y con un precio por metro cuadrado de 10€, el coste asciende a 700€. Añadiendo un coste de 300€ por el moldeado y ensamblaje de las piezas por una empresa privada [17].

- Mallas de alambre de aluminio con marco de madera con medidas específicas compradas, con un valor de 50€ por malla [17].
- Panel de abejas de PVC con marco de madera con medidas específicas comprado, con un valor de 80€ [18].
- Sección de ensayos de plexiglás con medidas específicas comprado por un valor de 100€ [19].
- Propulsor comercial, con un precio de 350€ con gastos de envío incluidos [14].

En la siguiente tabla están resumidos los costes relacionados con el material empleado.

MATERIAL	PRESUPUESTO
PC	400€
Lugar de Trabajo	300€
Licencia PRO-E	10€
Licencia ANSYS	15€
Tol de acero negro	1000€
Mallas	50€
Panel de abejas	80€
Sección de ensayos	100€
Propulsor comercial	350€
<b>TOTAL</b>	<b>2305€</b>

**Tabla 10: Presupuesto de los materiales**

## 10.2 COSTE DE HONORARIOS

El coste asociado a los honorarios de las personas que han participado en este proyecto debe dividirse en dos; por un lado el coste asociado al realizador del proyecto, y por otro, los costes correspondientes a la dirección del mismo.

### 10.2.1 HONORARIOS DE REALIZACIÓN

Los datos correspondientes a los honorarios de un Ingeniero Mecánico pueden extraerse del *Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Industriales de Madrid* [20]:

- Coste de la hora laboral: 42€
- Coste de la hora extraordinaria: 64€

A estas cantidades hay que añadir el IVA establecido en el 10%.

El importe correspondiente al trabajo realizado por el autor del proyecto, Alberto Muñoz Mejías, con una duración aproximada de 6 meses, una dedicación diaria de 8 horas, y semanal de 5 días, hacen un total de 690 horas laborales. Si se añade el 10 de IVA, queda un importe final de 40723€ (IVA incluido); computando el total de horas laborales, sin incluir ninguna hora extraordinaria.

### 10.2.2 HONORARIOS DE DIRECCIÓN

La dirección del proyecto ha corrido a cargo de Marco Antonio Álvarez Valenzuela, y se han considerado unos costes correspondientes a sus honorarios de 7920€, debidos a 100 horas trabajadas, retribuidas a 72€ + IVA cada una.

### 10.3 PRESUPUESTO FINAL

Al presupuesto global del proyecto, debemos añadir otros costes derivados del mismo, difíciles de detallar. Estos costes están referidos a material fungible, costes asociados a trabajadores externos al proyecto, etc. Cuantificaremos estos costes derivados en un 15% del presupuesto final. Podemos ver el desglose de gastos en la siguiente tabla:

TIPO DE GASTO	PRESUPUESTO (€)
Material	2305
Honorarios Realización	40723
Honorarios Dirección	7920
Total sin costes derivados	50948
Costes derivados (15%)	7642
<b>TOTAL</b>	<b>58590</b>

Tabla 11: Tabla de presupuesto del proyecto

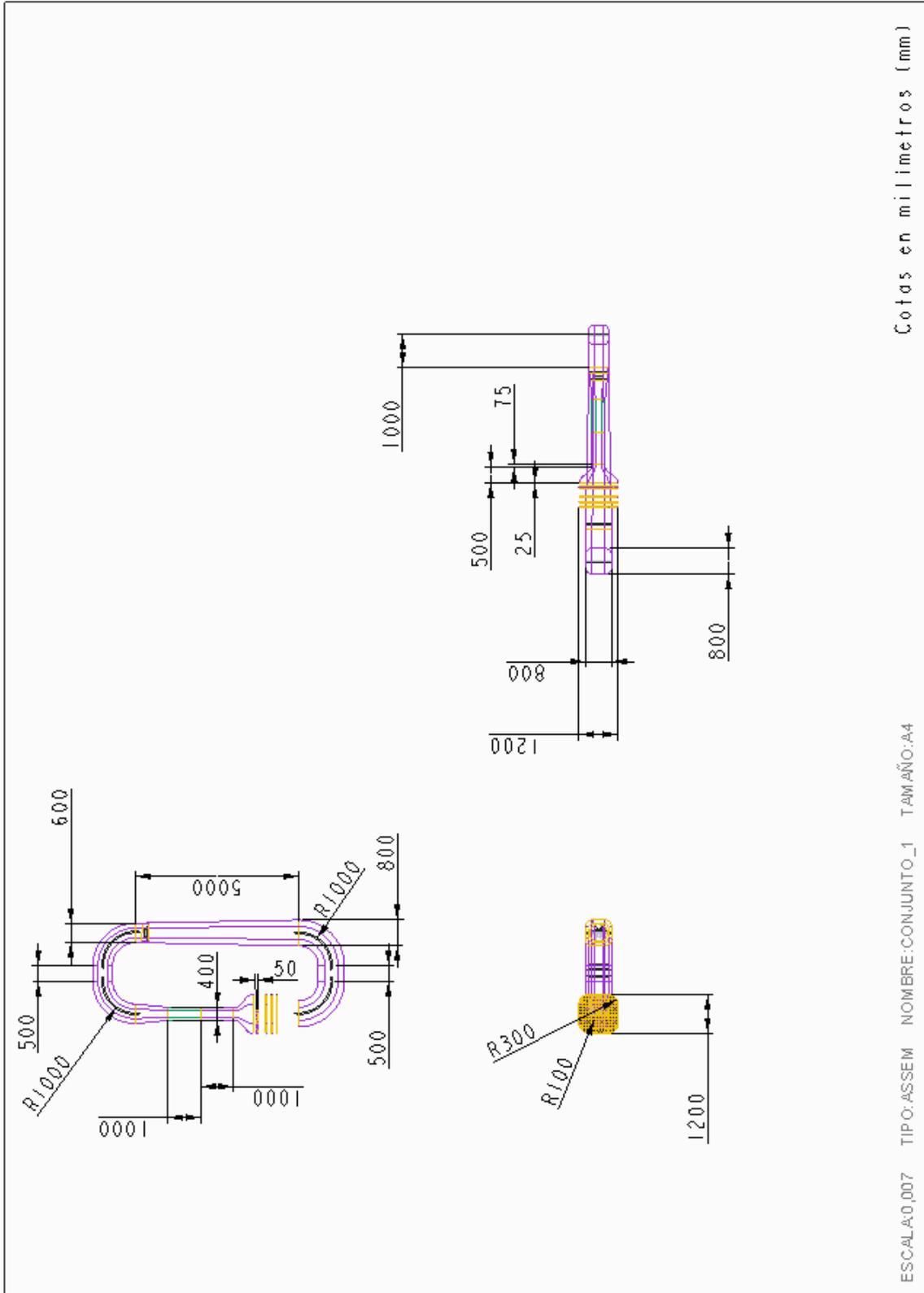
# 11 BIBLIOGRAFÍA

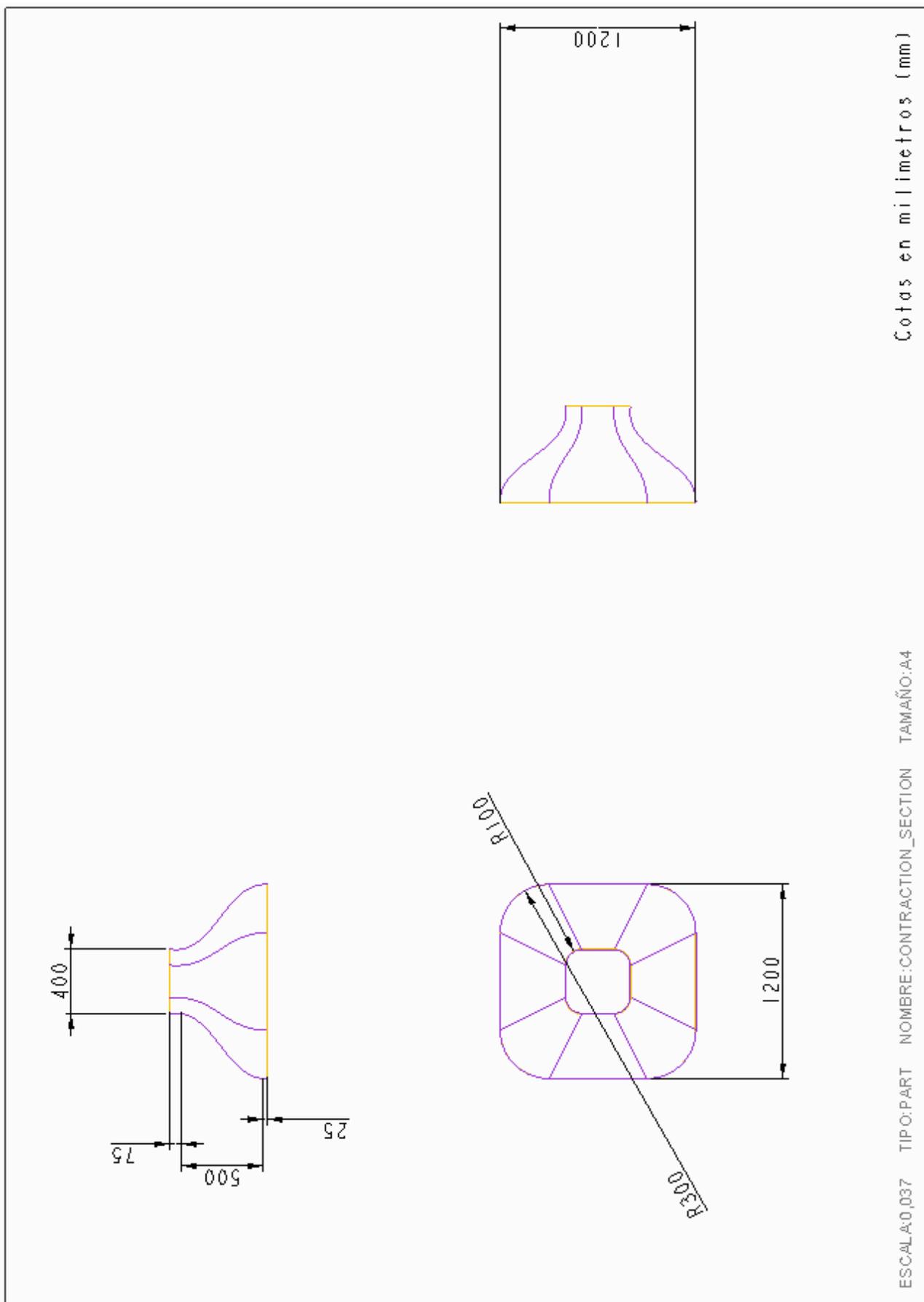
- [1] Manuel López-Rivadulla Sáñez. *Análisis CFD de un flap Gurney instalado en perfiles NACA*. Leganés, España. 2008.
- [2] Túnel de viento. <http://aerotecnologia.blogspot.com.es/2011/01/tunel-de-viento.html>. Último acceso 15/9/2012.
- [3] Luis Díaz Iriberri. *Estudio de propulsores para aplicación de túneles de viento*. Castelfell, España. 2005.
- [4] Diego Patricio Pineda Maigua y William Hernán Vega Santillán. *Diseño y construcción de un túnel de viento subsónico con sistema de adquisición de datos para el estudio de la aerodinámica de los vehículos*. Latacunga, Ecuador. 2010.
- [5] Rubén Emilio Campos López. *Diseño de un alerón de un vehículo de competición: comparación de la simulación aerodinámica numérica y la simulación aerodinámica experimental*. Castelldefels, España. 2008.
- [6] Ecuación de Darcy-Weisbach. [http://es.wikipedia.org/wiki/Ecuaci%C3%B3n\\_de\\_Darcy-Weisbach](http://es.wikipedia.org/wiki/Ecuaci%C3%B3n_de_Darcy-Weisbach). Último acceso 1/7/2012.
- [7] Número de Prandtl. [http://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero\\_de\\_Prandtl](http://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_de_Prandtl). Último acceso 1/7/2012.
- [8] Número de Reynolds. [http://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero\\_de\\_Reynolds](http://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_de_Reynolds). Último acceso 1/7/2012.
- [9] Número de Mach. [http://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero\\_de\\_Mach](http://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_de_Mach). Último acceso 1/7/2012.
- [10] PTC. <http://www.ptc.com/>. Último acceso 15/7/2012.
- [11] Roberto Martínez. *Construcción y caracterización de túnel de viento a bajas velocidades*. Departamento Física, Universidad Nacional de Colombia. 2011.
- [12] Materia lectiva. *Dinámica de fluidos y cálculo de conductos*. Departamento de Ingeniería Térmica y Fluidos. Universidad Carlos III de Madrid. España. 2010.
- [13] Ramón de las Heras Rodríguez. *Diseño de un túnel de viento subsónico*. A Coruña, España. 2003.
- [14] FanBuyer. <http://www.fanbuyer.co.uk/>. Último acceso 15/8/2012.
- [15] Materia lectiva. *Dinámica de fluidos computacional*. Departamento de Ingeniería Térmica y Fluidos. Universidad Carlos III de Madrid. España. 2010.

- [16] ANSYS. <http://www.ansys.com/>. Último acceso 25/7/2012.
- [17] Aceros y Aluminios. Materiales para la construcción. <http://www.acerosyaluminio.com/>. Último acceso 22/8/2012.
- [18] PVC Madrid. <http://www.pvcmadrid.com/>. Último acceso 25/8/2012.
- [19] Plexiglás Shop. <http://www.plexiglas-shop.com/ES/es/index>. Último acceso 30/8/2012.
- [20] Colegio Oficial de Ingeniero Técnicos de Madrid. <http://www.coitim.es/>. Último acceso 5/9/2012.

# 12 ANEXOS

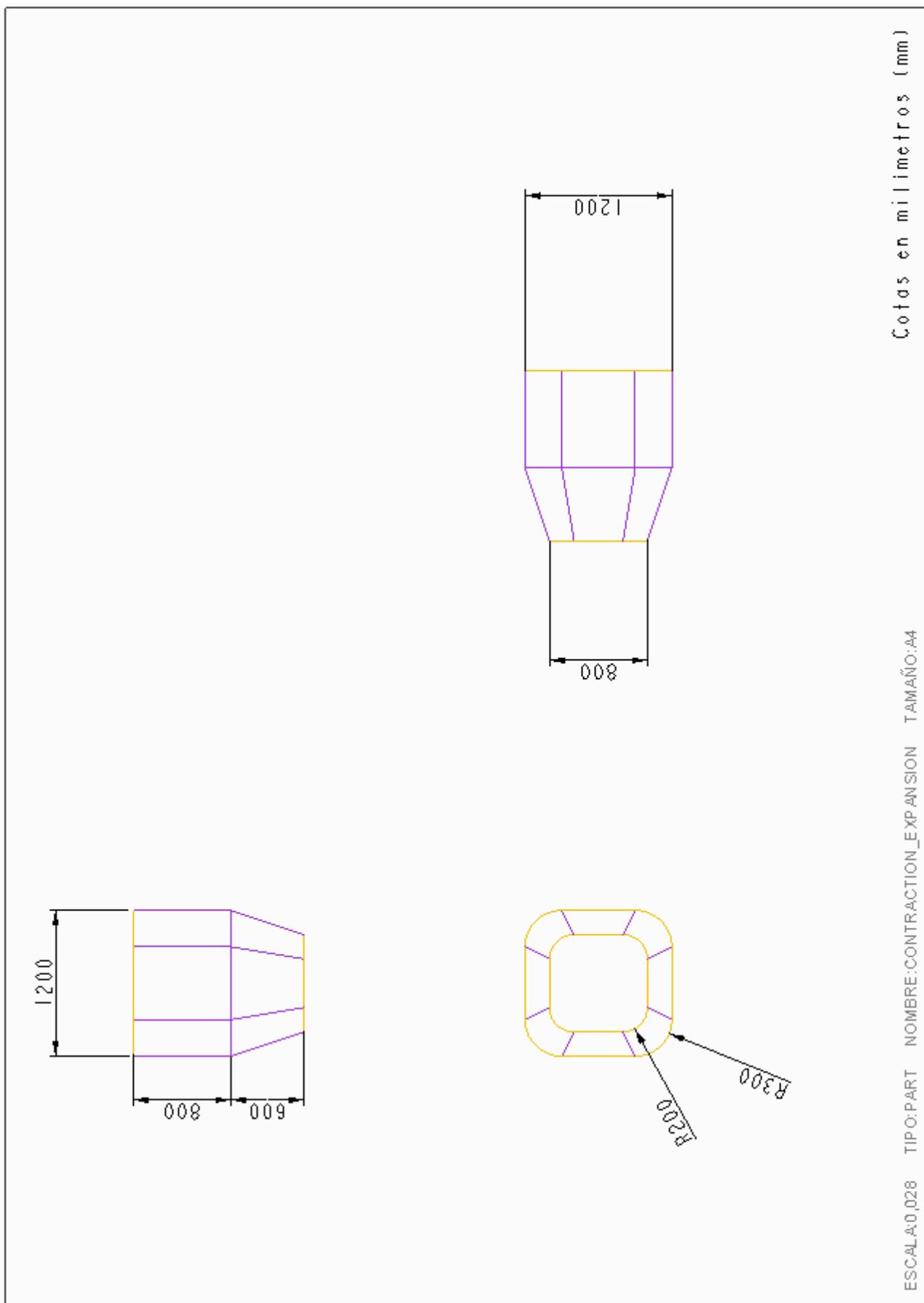
## 12.1 DIMENSIONADO DE LAS PIEZAS

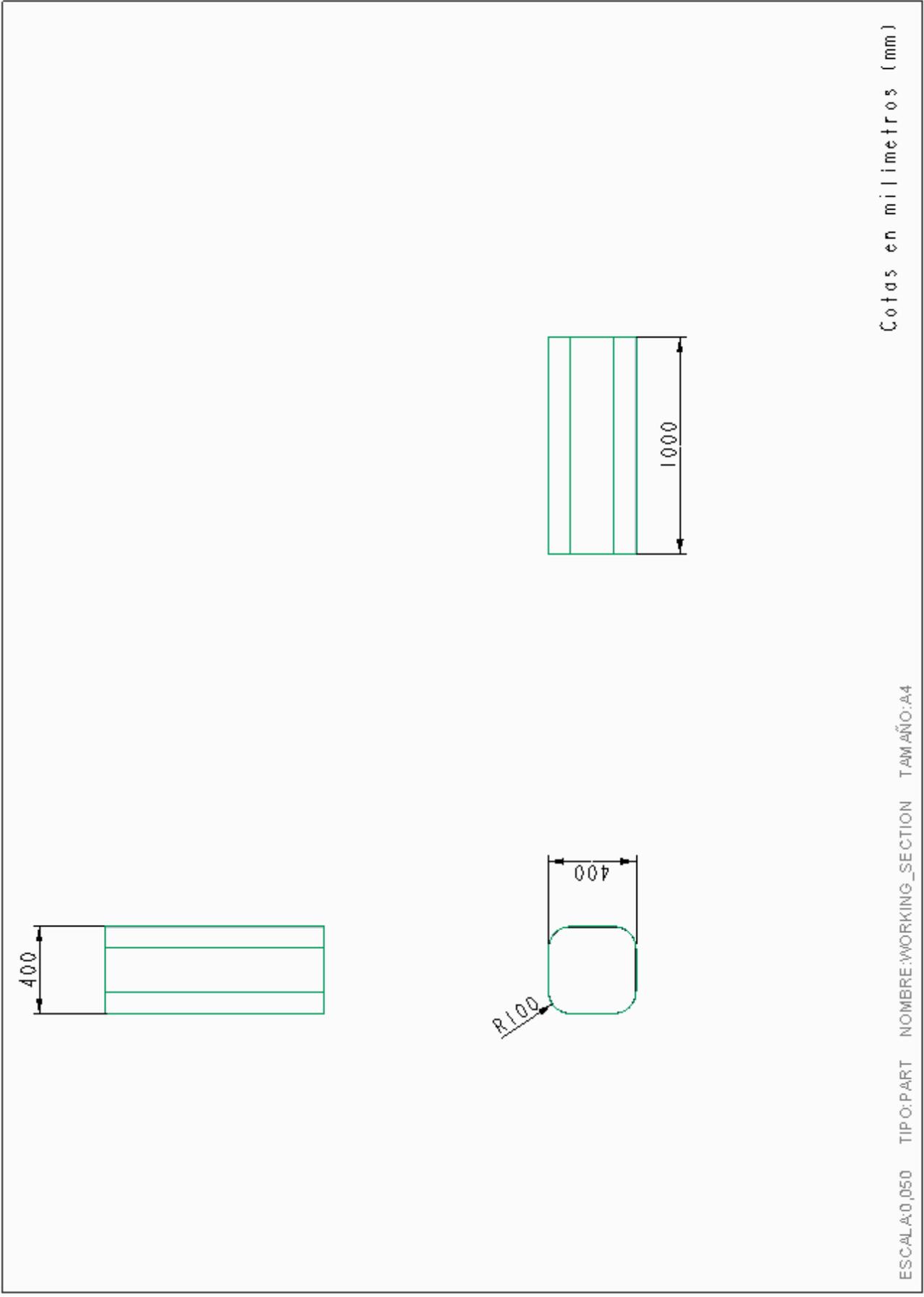




Cotas en milímetros (mm)

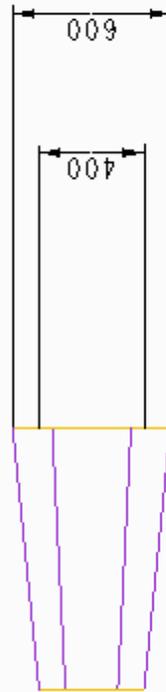
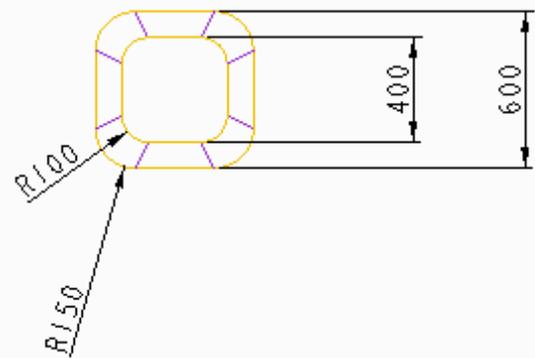
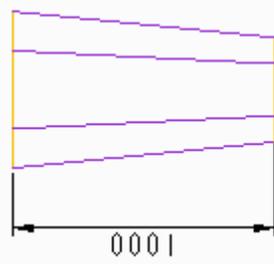
ESCALA: A0,037 TIPO: PART NOMBRE: CONTRACTION\_SECTION TAMAÑO: A4





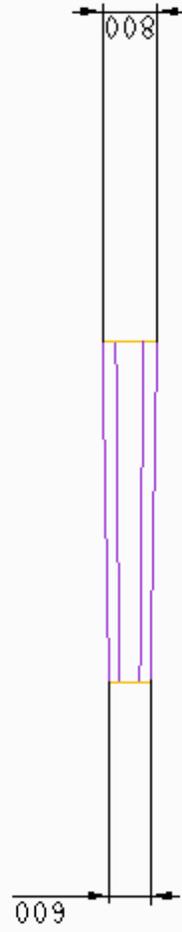
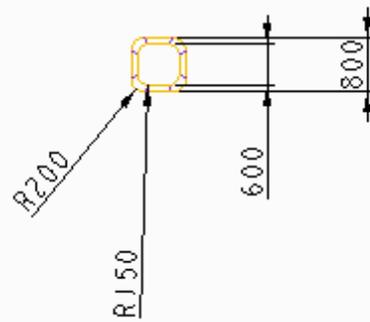
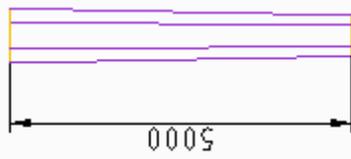
Cotas en milímetros (mm)

ESCALA:0,050 TIPO:PART NOMBRE:WORKING\_SECTION TAMAÑO:A4



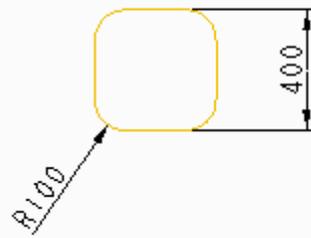
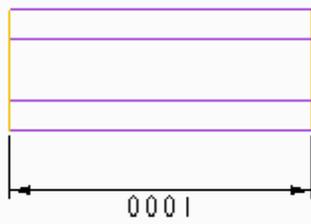
Cotas en milímetros (mm)

ESCALA:0,043 TIPO:PART NOMBRE:DUCT\_3 TAMAÑO:A4



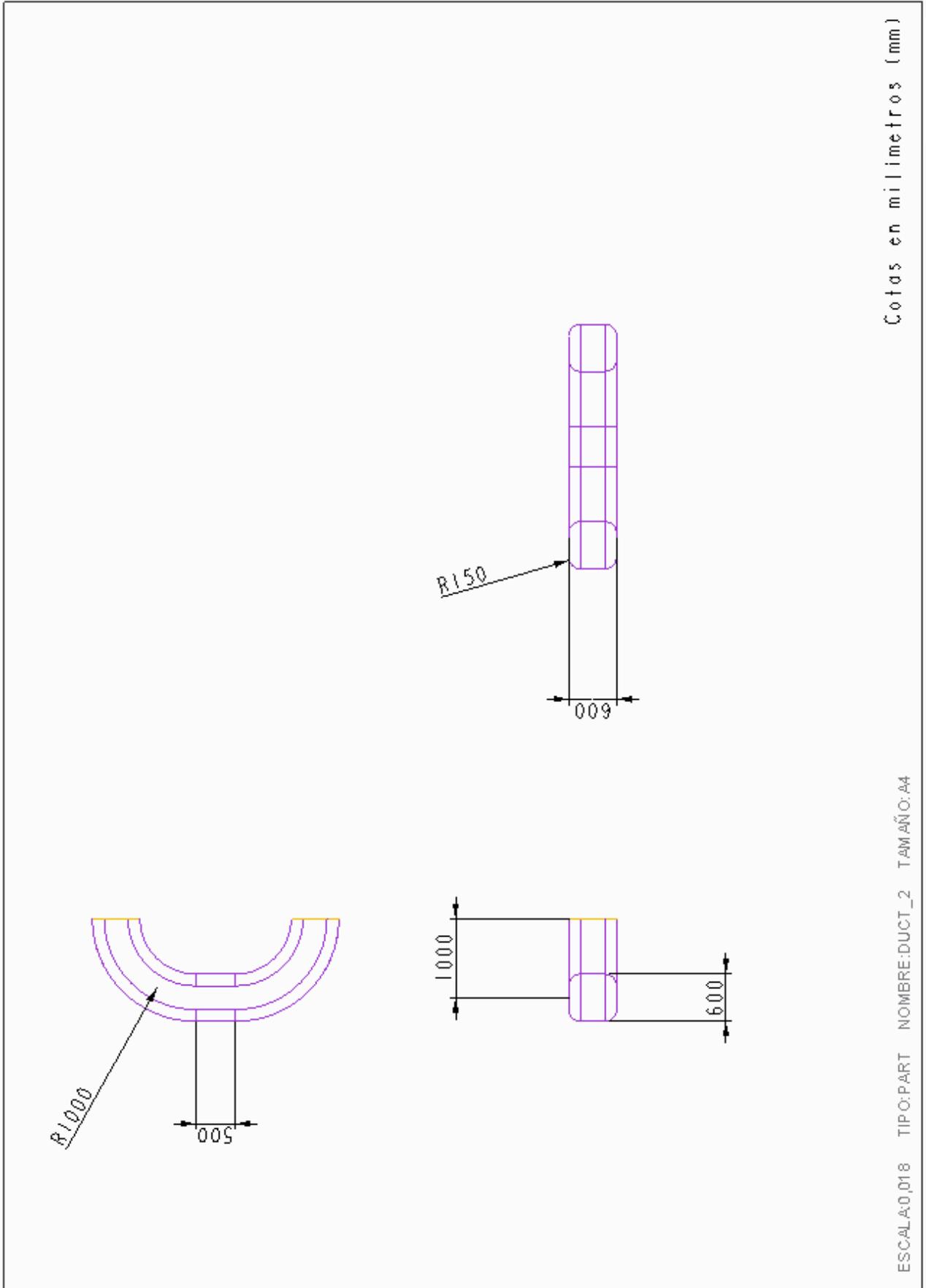
Cotas en milímetros (mm)

ESCALA:0,011 TIPO:PART NOMBRE:DUCT\_1 TAMAÑO:A4



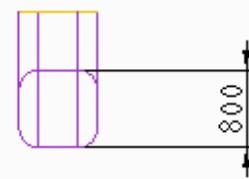
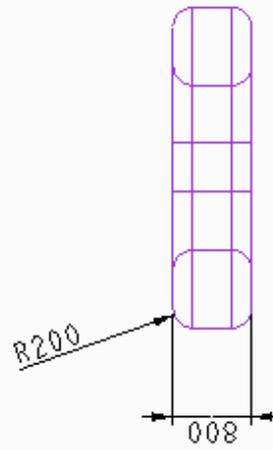
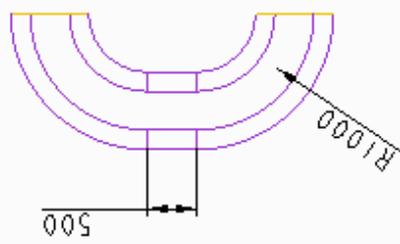
Cotas en milímetros (mm)

ESCALA:0,050 TIPO:PART NOMBRE:DUCT\_EXT TAMAÑO:A4



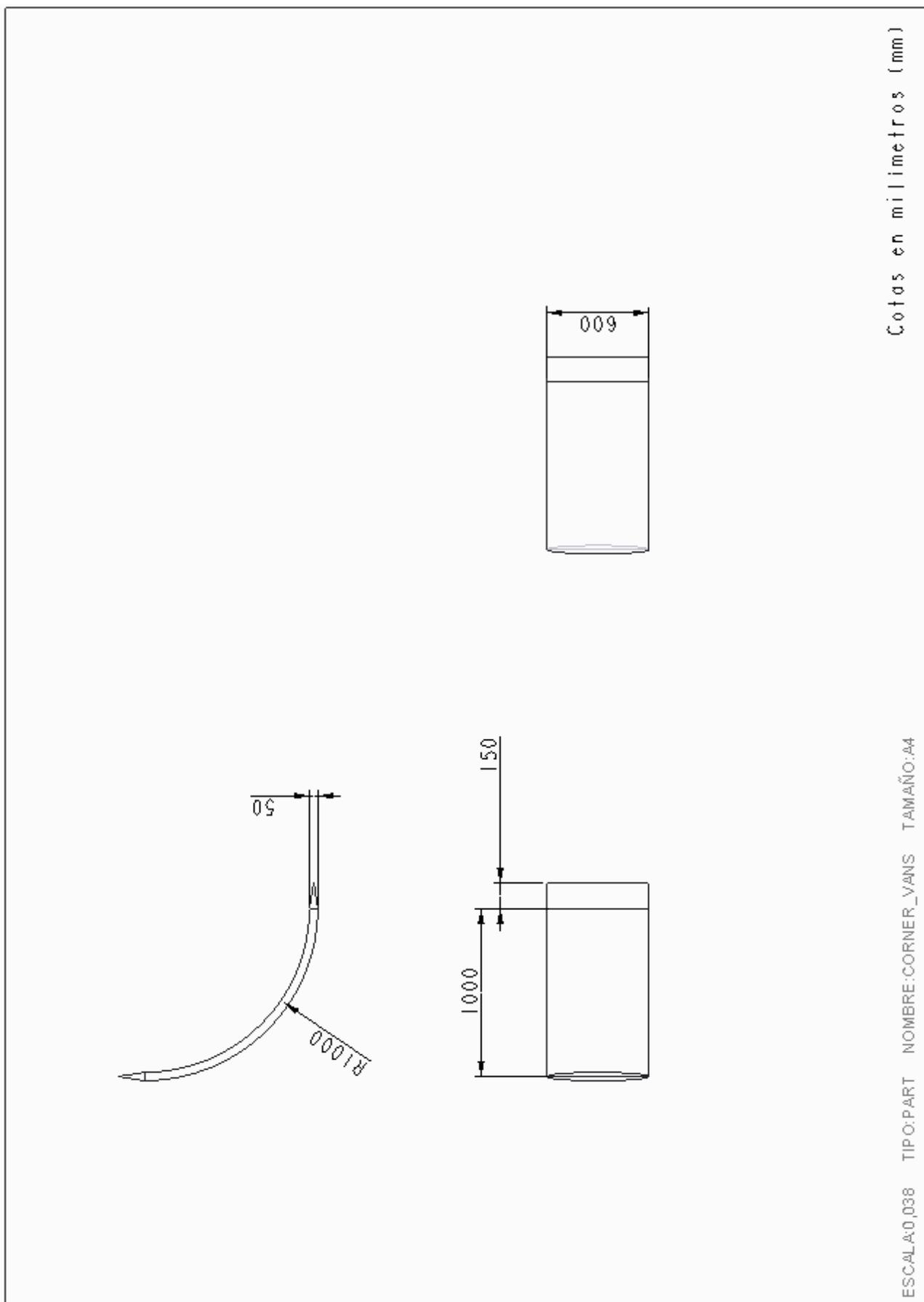
Cotas en milímetros (mm)

ESCALA:0,018 TIPO:PART NOMBRE:DUCT\_2 TAMAÑO:A4



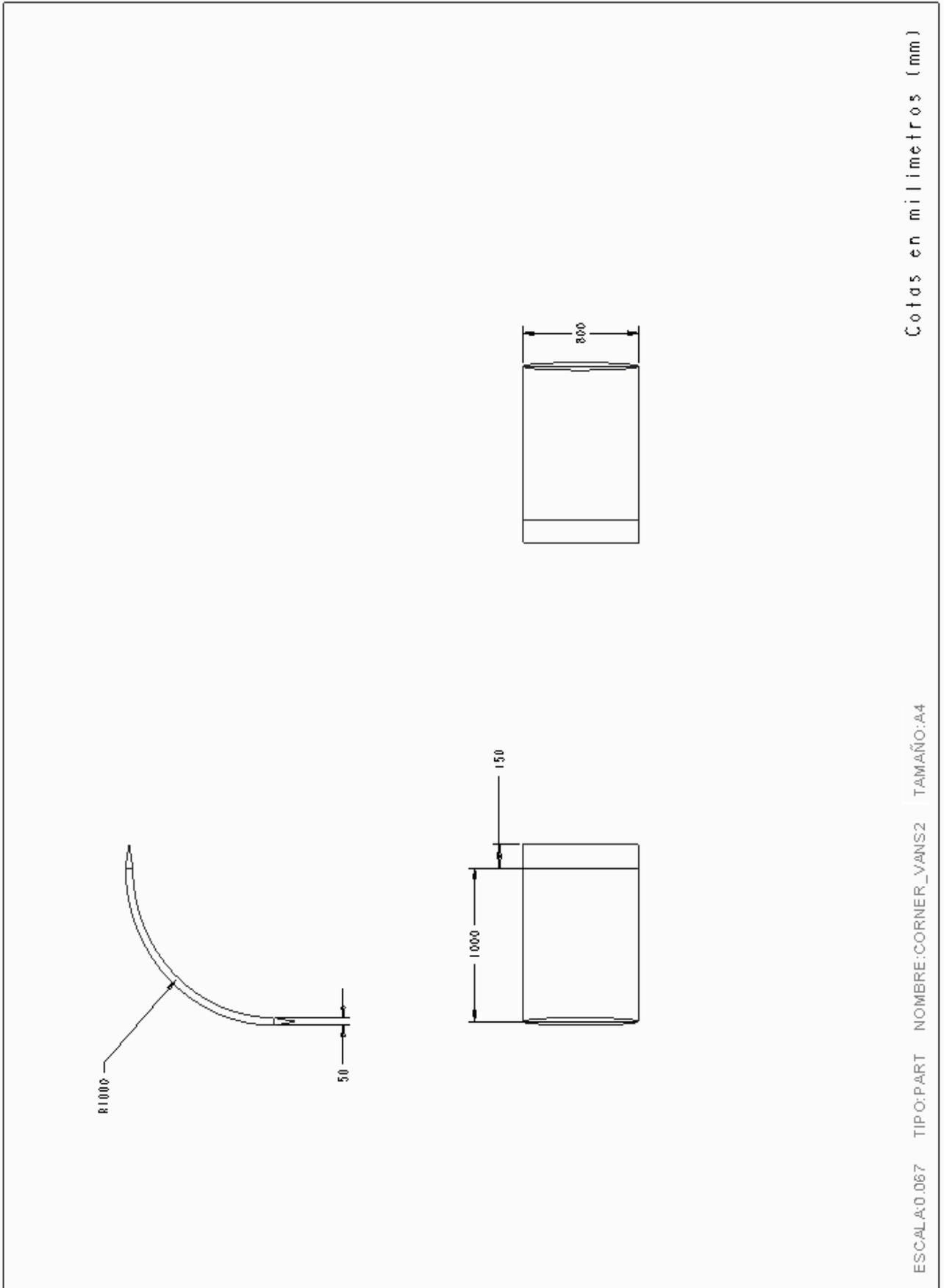
Cotas en milímetros (mm)

ESCALA:0,016 TIPO:PART NOMBRE:DUCT TAMAÑO:A4



Cotas en milímetros (mm)

ESCALA:0,038 TIPO:PART NOMBRE:CORNER\_VANS TAMAÑO:A4



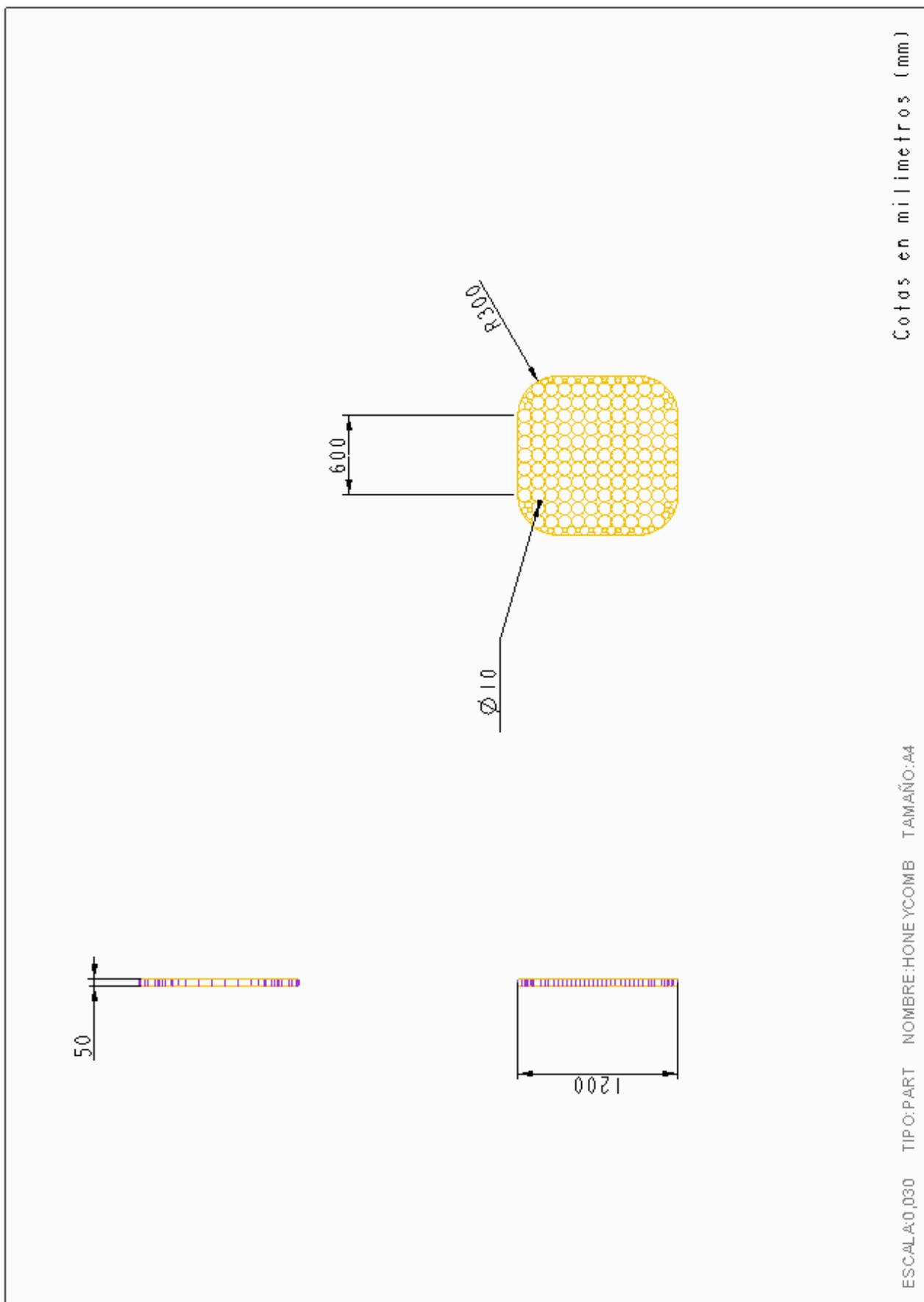
Cotas en milímetros (mm)

TAMAÑO: A4

NOMBRE: CORNER\_VANS2

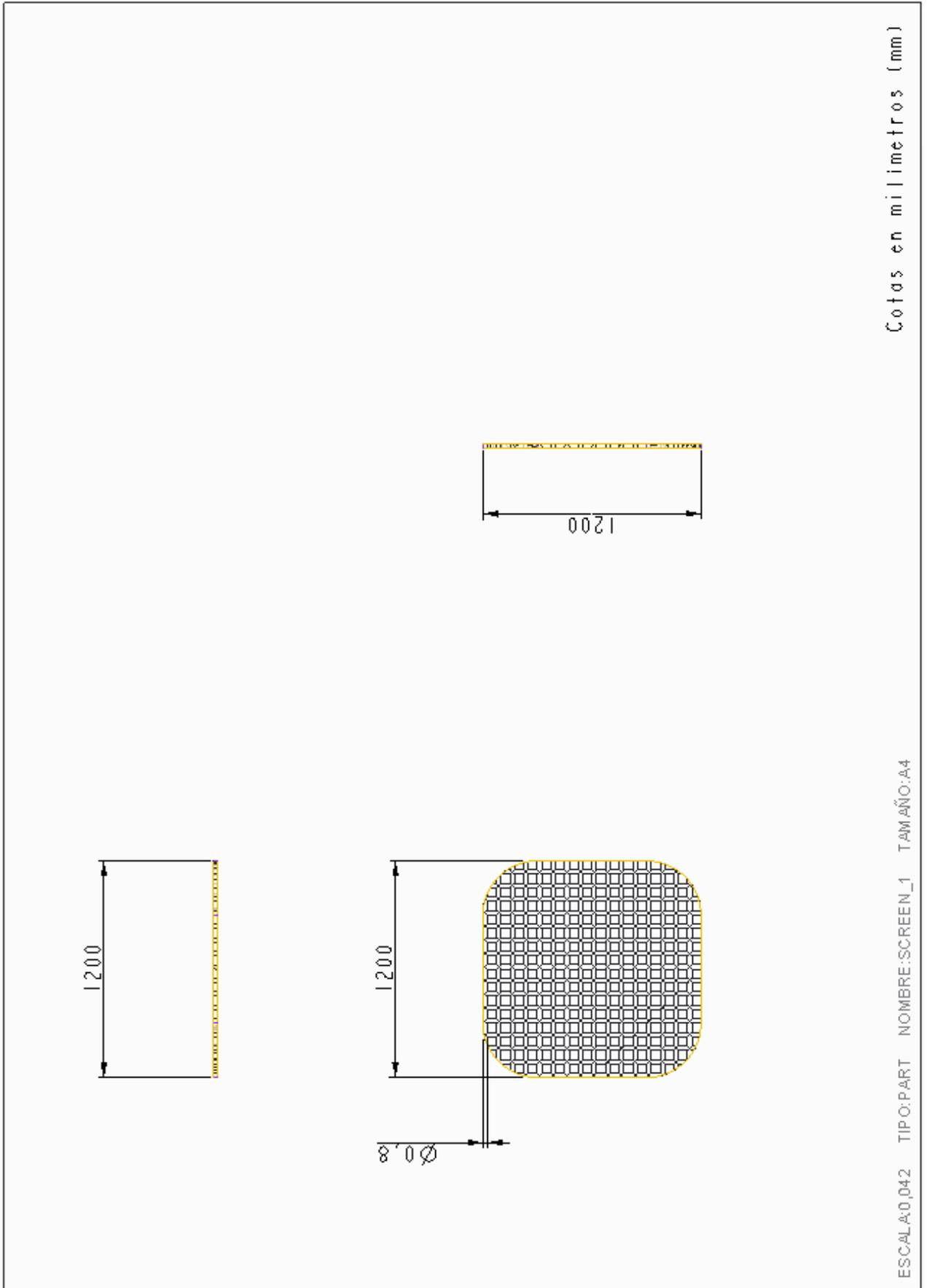
TIPO: PART

ESCALA: 0.067

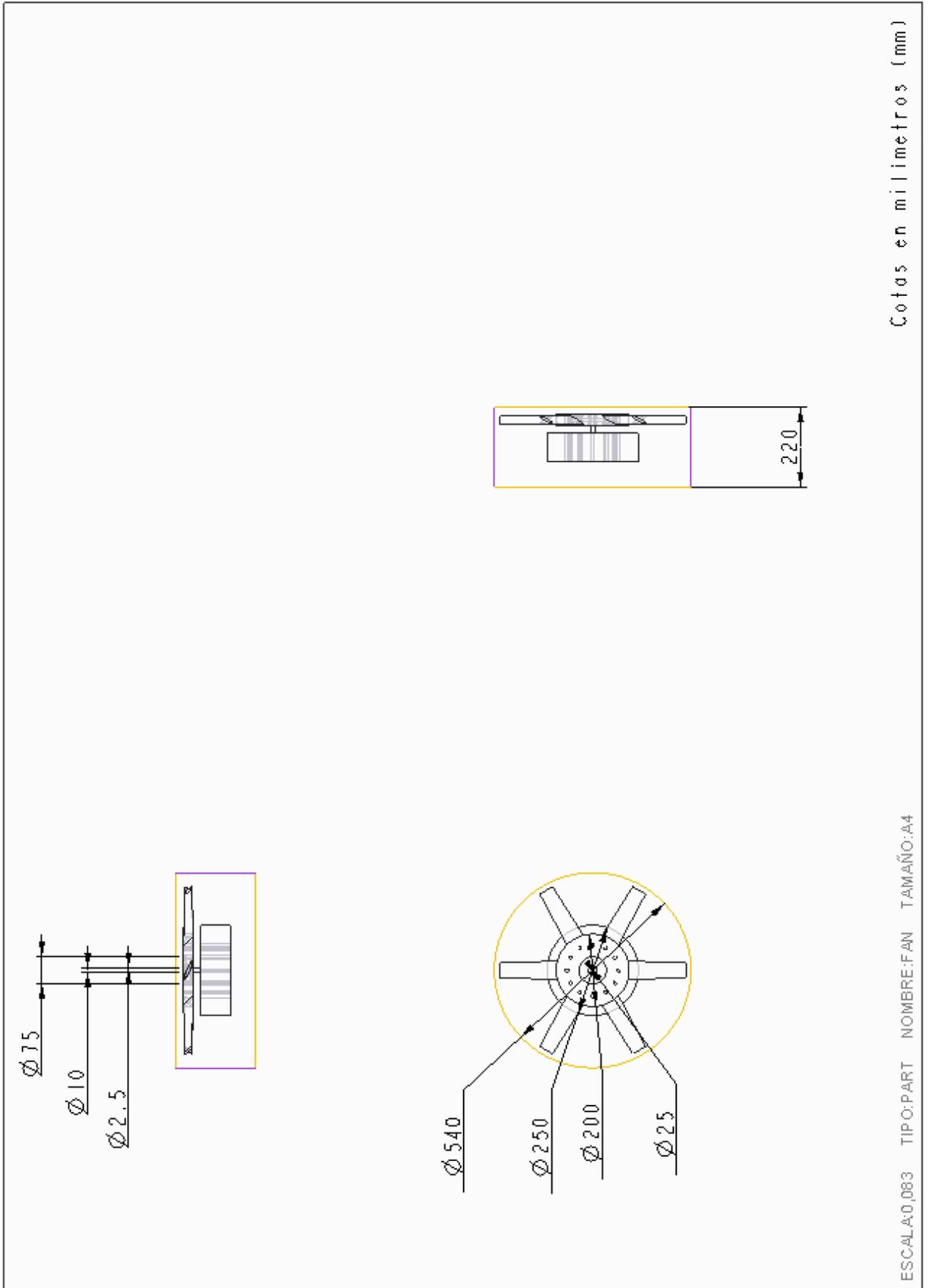


Cotas en milímetros (mm)

ESCALA:0,030 TIPO:PART NOMBRE:HONEYCOMB TAMAÑO:A4



ESCALA:0,042 TIPO:PART NOMBRE:SCREEN\_1 TAMAÑO:A4



## 12.2 CATÁLOGO DEL PROPULSOR COMERCIAL



# HEPT-45 & HEPT-50

## GENERAL DESCRIPTION

### FAN

Space saving integration of motor and impeller  
 Rolled steel casing  
 Fan guard with integral motor mounting to DIN and UNE standards  
 Impeller in Polyamide 6 with fibreglass reinforcement  
 Dynamically balanced to ISO 1940  
 Zinc phosphate surface treated steel  
 Epoxy resin anti-corrosive finish, kiln dried at 200°C

### MOTOR

Squirrel-cage induction motor  
 Three-phase dual voltage connection 230/400V 50Hz  
 Single Phase 230V 50Hz  
 IP65 dust and hosed water protection  
 Class F winding insulation with Class B temperature rise  
 Over-heat protection by self-resetting thermo-contact  
 Permitted air-stream temperatures:  
 2 pole (2800/min) motors -25°C up to +45°C  
 4 pole (1400/min) & 6 pole (930/min) motors -25°C up to +60°C

Model	Airflow rate <i>m<sup>3</sup>/h</i>	Speed <i>rpm</i>	Max electrical supply		Input power <i>W</i>	Sound level (*) <i>db(A)</i>	Weight <i>kg</i>	Curve	Dimensions (mm)					
			A	W					ØA	ØB	ØC	D	ØE	Number of holes
HEPT-45-4T/H	7300	1400	-	1.22	470	66	15.5	1	540	500	460	220	12	8
HEPT-45-4M/H	7300	1400	2.35	-	480	66	15.5							
HEPT-45-6T/H	4900	955	-	0.82	210	56	15.5	2	600	560	514	230	12	12
HEPT-45-6M/H	4900	955	1.4	-	225	56	15.5							
HEPT-50-4T/H	10150	1420	-	1.80	720	69	18.0	3	600	560	514	230	12	12
HEPT-50-4M/H	10150	1380	3.45	-	720	69	18.0							
HEPT-50-6T/H	6150	950	-	0.80	240	59	18.0	4	600	560	514	230	12	12
HEPT-50-6M/H	6150	950	1.38	-	245	59	18.0							

