



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA

VALIDACIÓN DE DISEÑO TEÓRICO DE TÚNEL DE VIENTO
SUBSÓNICO DE CIRCUITO ABIERTO, MEDIANTE
SIMULACIONES COMPUTACIONALES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROF. GUÍA: DR.-ING. JORGE HINOJOSA REHBEIN

DIEGO ALONSO ARIAS CORDERO

CURICÓ - CHILE
2021

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular stamps and signatures. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS UNIVERSIDAD DE TALCA' with a signature over it. The right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO' with a signature over it.

Curicó, 2022

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todo aquel que ha formado parte de este proceso. Desde mis profesores del Colegio Monseñor Manuel Larraín Errázuriz, quienes aún preguntan por mí, así como a aquellos profesores de la universidad que me dedicaron tiempo más allá del aula. Sobre todo, a mi profesor guía, Jorge Hinojosa Rehbein, que desde su propuesta del tema de esta memoria me ha acompañado con la mejor disposición, siempre muy afable, aconsejándome durante todo el proceso.

A mis compañeros de clase, con quienes desarrollamos múltiples proyectos donde el trabajo en equipo fue fundamental. A los amigos que hice, que si bien el contexto social en que se culmina este trabajo no es ideal y nos ha alejado físicamente, aún están presentes.

A mi familia y todo aquel que desde el primer minuto de mi formación ha estado a mi lado, mis abuelos, padres, tías, hermanos. A mi novia y a su familia, que de igual forma me han brindado su apoyo, incluso en los momentos más difíciles.

Y no menos importante, a mis queridas mascotas, que me acompañaron fielmente en largas noches de trabajo.

Diego Alonso Arias Cordero

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a quienes me acompañaron en este largo proceso. A quienes lucharon y se sacrificaron por mí. A quienes compartieron mis alegrías y me alentaron en los peores momentos. A quienes siempre confiaron en que llegaría al final de este camino. A quienes se interesaron por mi trabajo. A quienes me enseñaron todo lo que sé y me aconsejan día a día.

A mi mamá, mi novia y toda mi familia.

RESUMEN

El desarrollo de este proyecto de tesis se centra en la validación del diseño analítico de un túnel de viento subsónico de circuito abierto, mediante simulaciones computacionales de dinámica de fluidos. Este estudio comienza por un diseño anteriormente realizado, que entrega parámetros dimensionales y condiciones iniciales de operación del túnel, que sienta las bases para el proceso experimental de simulación.

Se construyeron geometrías representativas del flujo interior del túnel en 2 y 3 dimensiones, las que se evaluaron en Ansys FLUENT para obtener y comparar resultados de flujo. Entre los parámetros más significativos para validar el diseño se contemplan las velocidades máximas alcanzadas en la zona de pruebas del túnel, así como un estudio del crecimiento de la capa límite. Ambos valores tienen incidencia en la uniformidad del flujo, que se debe procurar sea laminar en dicha zona.

Finalmente, los resultados de las simulaciones validan el diseño inicial, con resultados similares de velocidad y rangos de capa límite aceptables. Sin embargo, éstos últimos pueden ser minimizados con algunas modificaciones en el diseño, y por ello, se entregan propuestas de mejoras del modelo inicial, que permitan aumentar el volumen útil de trabajo en la cámara de pruebas del túnel. Además, se entregan recomendaciones para la disposición del modelo a ensayar y se sugieren tareas futuras que ayuden en la concepción de un modelo físico, instalado en las inmediaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Talca.

Palabras claves: Validación, túnel de viento, cámara de pruebas, capa límite, flujo laminar, dinámica de fluidos computacional.

ABSTRACT

The development of this thesis project focuses on the validation of the analytical design of an open circuit subsonic wind tunnel by means of computational fluid dynamics simulations. This study begins with a previously made design, which provides dimensional parameters and initial operating conditions of the tunnel, which sets the basis for the experimental simulation process.

Representative geometries of the tunnel interior flow in 2 and 3 dimensions were constructed and evaluated in Ansys FLUENT to obtain and compare flow results. Among the most significant parameters to validate the design are the maximum velocities reached in the tunnel test zone, as well as a study of the boundary layer growth. Both values have an impact on the uniformity of the flow, which should be laminar in that zone.

Finally, the results of the simulations validate the initial design, with similar results of velocity and acceptable boundary layer ranges. However, the latter can be minimized with some modifications in the design, and therefore, proposals for improvements to the initial model are provided, which allow increasing the useful working volume in the tunnel test chamber. In addition, recommendations are given for the layout of the model to be tested and future tasks are suggested to help in the conception of a physical model, installed in the vicinity of the Faculty of Engineering of the University of Talca.

Keywords: Validation, wind tunnel, test chamber, boundary layer, laminar flow, computational fluid dynamics.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN	2
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	3
1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA	3
1.4. OBJETIVOS.....	4
1.4.1. Objetivo general	4
1.4.2. Objetivos específicos	4
1.5. ALCANCES DEL PROYECTO	4
1.6. METODOLOGÍA.....	5
1.7. RESULTADOS ESPERADOS	8
1.8. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.....	8
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	10
2.1. MECÁNICA DE FLUIDOS.....	11
2.1.1. Flujo laminar y turbulento	11
2.1.2. Flujo interno y externo	12
2.1.3. Capa límite.....	12
2.2. TÚNEL DE VIENTO.....	13
2.2.1. Túnel de viento subsónico	14
2.2.2. Túnel de viento de circuito abierto	15
2.2.3. Componentes de un túnel de viento.....	16
2.2.4. Procedimiento de diseño de un túnel de viento	18
2.3. ANÁLISIS DIMENSIONAL Y SIMILITUD	19

2.3.1.	Principio de Similitud.....	20
2.3.2.	Análisis Dimensional.....	20
2.3.3.	Método de Repetición de Variables y Teorema Pi de Buckingham.....	21
2.4.	SIMULACIONES COMPUTACIONALES	22
2.4.1.	Ecuaciones de movimiento.....	23
2.4.1.1.	Ecuación de continuidad.....	23
2.4.1.2.	Ecuaciones de Navier-Stokes.....	24
2.4.2.	Método de volúmenes finitos	25
2.4.3.	Dinámica de fluidos computacional (CFD).....	26
2.4.4.	Ansys FLUENT	27
2.4.4.1.	Turbulencia	27
CAPÍTULO 3.	DATOS INICIALES	31
3.1.	DATOS INICIALES DE DISEÑO	32
3.1.1.	Condiciones iniciales en la cámara de pruebas o parámetros base.....	32
3.1.2.	Condiciones iniciales del flujo de entrada.....	32
3.1.3.	Ventilador	33
3.1.4.	Dimensiones de componentes	34
3.1.5.	Geometría del diseño analítico	36
CAPÍTULO 4.	SIMULACIÓN 2D.....	37
4.1.	GEOMETRÍA.....	38
4.2.	MALLA	39
4.3.	CONDICIONES DE BORDE	39
4.4.	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN 2D	41
CAPÍTULO 5.	SIMULACIÓN 3D.....	46
5.1	GEOMETRÍA.....	47

5.2.	MALLA	48
5.3.	CONDICIONES DE BORDE	50
5.4.	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN 3D	51
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS		58
6.1.	SIMULACIÓN 2D	59
6.2.	SIMULACIÓN 3D	61
6.3.	PROPUESTA DE MEJORAS	62
CONCLUSIONES		64
REFERENCIAS		68
ANEXOS		70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Fotografía de flujo laminar, de transición y turbulento (1).....	11
Figura 2.2: Desarrollo de capa límite en superficie plana para diferentes flujos (2).....	13
Figura 2.3: Crecimiento de la capa límite en tubería (3).....	13
Figura 2.4: Túnel de viento de circuito abierto de succión (15).....	15
Figura 2.5: Túnel de viento de circuito cerrado (15).....	16
Figura 2.6: Componentes túnel de viento de circuito abierto de succión (10).....	16
Figura 2.7: Prueba de modelo de submarino en túnel de viento Langley (1).....	19
Figura 2.8: Discretización de dominio por MVF (17).....	25
Figura 3.1: Ventilador axial modelo HPX (13).....	33
Figura 3.2: Gráfica de curva de cono de contracción (6).....	35
Figura 3.3: Modelo en 2D del resultado del diseño analítico (6).....	36
Figura 3.4: Modelo en 3D del resultado del diseño analítico (6).....	36
Figura 4.1: Geometría del túnel de viento en 2 dimensiones.....	38
Figura 4.2: Malla del túnel de viento en 2 dimensiones.....	39
Figura 4.3: Condiciones de borde en entrada y salida del túnel de viento en 2D.....	40
Figura 4.4: Líneas de corriente de la geometría en 2D.....	41
Figura 4.5: Contornos de velocidad de la geometría en 2D.....	42
Figura 4.6: Vectores de velocidad sobre líneas auxiliares de la geometría en 2D.....	43
Figura 4.7: Gráfica Velocidad en u vs Posición en y de la geometría en 2D.....	44
Figura 4.8: Gráfica Velocidad en v vs Posición en y de la geometría en 2D.....	45
Figura 5.1: ¼ del dominio del fluido interior del túnel de viento en 3D y planos de diseño	47
Figura 5.2: Capa exterior de la geometría en 3D.....	48
Figura 5.3: Regiones de simetría en geometría en 3D.....	49

Figura 5.4: Malla en la capa exterior de la geometría en 3D.....	49
Figura 5.5: Malla en la geometría completa en 3D	50
Figura 5.6: Líneas de corriente en geometría 3D	51
Figura 5.7: Contornos de velocidad en geometría 3D	52
Figura 5.8: Planos y líneas auxiliares en geometría en 3D.....	53
Figura 5.9: Contornos de velocidad en planos A, B, C, D, E y F de geometría en 3D	54
Figura 5.10: Contornos de velocidad en planos G, H, I, J y K de geometría en 3D	55
Figura 5.11: Gráfica Velocidad en u vs Posición en y de la geometría en 3D.....	56
Figura 5.12: Gráfica Velocidad en v vs Posición en y de la geometría en 3D.....	57
Figura 6.1: Contornos de velocidad en v en geometría en 2D	60
Figura 6.2: Contornos de presiones en geometría en 2D.....	60
Figura 6.3: Túnel de viento subsónico C2-00 con bordes biselados (21).....	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Condiciones iniciales de la cámara de pruebas (6).....	32
Tabla 3.2: Condiciones iniciales de flujo de entrada (6)	32
Tabla 3.3: Valores finales del diseño analítico y dimensionamiento (6).....	34

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN

Es parte de la misión de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Talca, el promover la innovación, investigación y desarrollo tecnológico, lo que se expresa claramente en su visión donde declara aspiraciones de ser reconocida por: “desarrollar una actividad investigadora relevante y de impacto y por transferir sus resultados a nivel nacional e internacional”.

Esto motiva el ampliar la variedad de equipamientos tecnológicos que permitan el desarrollo de tales actividades, siendo, la implementación de un túnel de viento, una gran oportunidad que permita a estudiantes y docentes la realización de investigaciones, proyectos de tesis, diseño de modelos, actividades de laboratorios o incluso trabajos en colaboración con la industria.

Junto con esto, la posibilidad de aprovechar un motor ya existente en la facultad, que si bien restringe algunos parámetros de diseño del túnel de viento, abarata los costos de construcción. Este mismo, ya fue incluido en el desarrollo analítico de una memoria de titulación de un estudiante de ingeniería mecánica (16), por lo que, a partir de dichos resultados, se realizarán las simulaciones del diseño obtenido, y se optimizarán según el comportamiento de éste.

Gran parte de los problemas de mecánica de fluidos involucra no sólo un desarrollo de cálculos físico-matemáticos, sino que es fundamental la realización de ensayos experimentales, y es aquí donde se requiere de un túnel de viento. Ejemplo de su uso es el de las pruebas realizadas a vehículos monoplace de Fórmula 1. Según Prada y Nogueira (2006):

Para ensayar y optimizar la aerodinámica de un vehículo de competición existen tres métodos fundamentalmente: pruebas en circuito, empleo de un túnel de viento y métodos computacionales. (...). Hoy en día, el túnel de viento es la herramienta fundamental para el ensayo de la aerodinámica en la F1. (p.1)

Si bien es posible realizar un primer análisis netamente de carácter computacional, hay aspectos que deben ser llevados a la práctica, y realizarlos directamente en la pista significaría la completa construcción del vehículo, significando costes muy elevados en el ensayo y error. Es por esto que dichas pruebas de prototipos se realizan en túneles de viento, donde se pueden simular controladamente las condiciones de la pista y emplear métodos de equivalencia adimensional que permite variar el prototipo en materiales y tamaño respecto del producto final.

La NASA puede ser el mejor ejemplo de aplicaciones de campo con pruebas en túneles de viento, quienes en el año 1956 completaron el Plan Unitario de Túneles Aerodinámicos (UPWT). Este túnel ha sido el más utilizado de la NASA. Cada avión comercial de gran tamaño y casi todos los jets militares construidos en Estados Unidos, además de las cápsulas del Mercury, el Gemini, el Apollo y transportadores espaciales han sido probados en esta unidad.

Capítulo 1. Introducción

De esta forma, este complejo de túneles de viento “representa una posesión única nacional de vital importancia para la defensa nacional y su posición competitiva en el mundo del mercado aeroespacial” (Dunbar, 2008).

Las simulaciones computacionales en fluidos dinámicos, por otro lado, son la herramienta fundamental en el trabajo a realizar en esta memoria, pues permitirán ejecutar pruebas virtuales del comportamiento que tendría el flujo de viento en un prototipo materializado.

Cabe destacar que dicho equipo, servirá tanto para pruebas dentro de la Escuela de Ingeniería Mecánica, así como también ofrecerá la posibilidad de estudiar el comportamiento de modelos a escala de edificaciones insertos en algún sector urbano o puentes, donde el viento pueda ser un factor relevante en su construcción, como es el caso de obras civiles. También permitiría probar prototipos en otras áreas, tales como minería o mecatrónica.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente, no existe un equipo en la Universidad de Talca ni un laboratorio en la VII Región de Chile, que permita el desarrollo de actividades de investigación e innovación en el área de mecánica de fluidos. Concretamente no es posible realizar pruebas de modelos aerodinámicos ni estructuras al ser sometidos a cargas de viento que simulen su comportamiento en servicio.

1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA

Con el diseño de un túnel de viento, que si bien será realizado computacionalmente, una posterior oportunidad de construcción e implementación en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Talca, ofrecería la posibilidad de realizar distintas pruebas de modelos a escala simulando flujos de aire a distintas velocidades en la sección de pruebas del túnel.

Estos estudios son fundamentales en la construcción de dispositivos aerodinámicos y edificaciones sometidas a oleadas de viento que puedan alcanzar la frecuencia de resonancia de la estructura, permitiendo obtener datos de funcionamiento que aseguren su desempeño de manera segura y bajo parámetros controlados.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Validar el diseño teórico de túnel de viento subsónico de circuito abierto, mediante simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD), para obtener una zona de pruebas con flujo laminar.

1.4.2. Objetivos específicos

- 1) Estudiar el diseño teórico de túnel de viento y parámetros variables del mismo, detectando aspectos que permitan optimizar el diseño con las simulaciones computacionales.
- 2) Realizar un modelo en 2 dimensiones del diseño inicial y simular su comportamiento con un software CFD, obteniendo una primera comparación de resultados que permitan validarlo.
- 3) Desarrollar un modelo 3D de las distintas partes del túnel de viento y detectar zonas que generen crecimiento de la capa límite mediante simulaciones computacionales, validando el diseño analítico con resultados empíricos.
- 4) Proponer modificaciones de parámetros que permitan reducir el tamaño de la capa límite en la cámara de pruebas.

1.5. ALCANCES DEL PROYECTO

El diseño del túnel de viento comprende todo el análisis computacional para validar una geometría optimizada, otorgando las herramientas dimensionales para su posterior construcción, que no se considera en esta oportunidad.

El diseño se remite a parámetros dimensionales del ducto por donde fluye el aire, no así a aspectos referentes al funcionamiento del mecanismo impulsor (motor y ventilador), los cuales fueron previamente seleccionados y entregan datos iniciales para el diseño.

No se considerarán aspectos estructurales de soporte para el túnel ni de montaje.

1.6. METODOLOGÍA

1) Objetivo 1

❖ Actividades:

- Estudiar documentación de tesis: "Diseño de túnel de viento subsónico de circuito abierto para fines académicos a partir de un motor existente en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Talca".
- Estudiar aspectos de aerodinámica y mecánica de fluidos involucrados en el diseño de un túnel de viento.
- Estudiar software de volúmenes finitos y simulaciones CFD.

❖ Recursos:

- Internet
- Microsoft Office (Excel, Word, PowerPoint)
- Ansys FLUENT
- PC
- Zoom
- Correo electrónico
- Documentación referenciada (paper, tesis, libros, manuals, catálogos)
- Tiempo

❖ Tiempos:

- 10 semanas de investigación.
- Aproximadamente 50 horas efectivas de trabajo.

❖ Productos Esperados:

- Conocimiento del diseño analítico del túnel de viento.
- Conocimiento de parámetros de diseño que estén sujetos a modificaciones.
- Conocimiento de parámetros que influyan en el comportamiento y desempeño de un túnel de viento.
- Conocimiento de formas de disminuir el crecimiento de la capa límite, que permitan obtener una zona de pruebas con flujo laminar.
- Conocimiento de funcionalidades y utilidades de los softwares de volúmenes finitos.
- Conocimiento sobre el software Ansys FLUENT para la simulación del túnel de viento.

2) Objetivo 2

❖ Actividades:

- Dibujo de modelo 2D del diseño inicial del túnel de viento en software CAD.
- Simulación del modelo 2D en software Ansys FLUENT.

Capítulo 1. Introducción

- Verificación y análisis de resultados obtenidos en la simulación.
- ❖ Recursos:
 - Autodesk Inventor
 - Ansys Design Modeler
 - Ansys Meshing
 - Ansys FLUENT
 - PC
 - Zoom
 - Correo electrónico
 - Documentación diseño analítico
 - Tiempo
- ❖ Tiempos:
 - 6 semanas de trabajo de modelado, simulación y análisis de resultados.
 - Aproximadamente 40 horas efectivas de trabajo.
- ❖ Productos Esperados:
 - Modelo en 2 dimensiones del diseño analítico.
 - Comportamiento del modelo al ser simulado con un flujo de aire.
 - Datos iniciales sobre el modelo diseñado analíticamente.
 - Parámetros iniciales que influyan en el crecimiento de la capa límite en la cámara de pruebas del modelo.
 - Modelo diseñado analíticamente validado.

3) Objetivo 3

- ❖ Actividades:
 - Construir modelo 3D del túnel de viento en software CAD.
 - Simulación del modelo 3D en software Ansys Fluent.
 - Verificación y análisis de resultados obtenidos en la simulación.
- ❖ Recursos:
 - Autodesk Inventor
 - Ansys Design Modeler
 - Ansys Meshing
 - Ansys FLUENT
 - PC
 - Zoom
 - Correo electrónico
 - Documentación diseño analítico
 - Tiempo
- ❖ Tiempos:
 - 7 semanas de trabajo de modelado, simulación y análisis de resultados.
 - Aproximadamente 60 horas efectivas de trabajo.

Capítulo 1. Introducción

- ❖ Productos Esperados:
 - Modelo en 3 dimensiones de los componentes del túnel de viento.
 - Modelo del ensamble del túnel de viento diseñado.
 - Datos del modelo diseñado analíticamente.
 - Zonas de flujo turbulento.
 - Parámetros que propicien el crecimiento de la capa límite en la cámara de pruebas.
 - Datos empíricos que respalden la propuesta de diseño.

4) Objetivo 4

- ❖ Actividades:
 - Recopilar datos de simulaciones.
 - Realizar una propuesta de modificaciones que permitan reducir el tamaño de la capa límite.
- ❖ Recursos:
 - Internet
 - Autodesk Inventor
 - Ansys FLUENT
 - Microsoft Office (Excel, Word, PowerPoint)
 - Documentación (marco teórico, datos simulación 2D y 3D)
 - PC
 - Zoom
 - Correo electrónico
 - Tiempo
- ❖ Tiempos:
 - 5 semanas de trabajo en procesamiento de datos y análisis de resultados.
 - Aproximadamente 25 horas efectivas de trabajo.
- ❖ Productos Esperados:
 - Abanico de parámetros que influyan en el crecimiento de la capa límite, considerando todas las pruebas realizadas anteriormente.
 - Propuestas de modificaciones de los parámetros disfuncionales y que propicien un flujo turbulento en la cámara de pruebas.
 - Datos de simulación final con flujo laminar en zona de pruebas del túnel de viento.
 - Conjunto de conclusiones y comentarios que completen el análisis realizado y resultados obtenidos.

1.7. RESULTADOS ESPERADOS

Concretamente, se obtendrá un diseño optimizado de un túnel de viento subsónico de circuito abierto, en cuya sección de pruebas se desarrollará un flujo de viento laminar, necesario para la realización de ensayos en dicha unidad.

Los resultados de los análisis y simulaciones computacionales que abordará esta memoria, sentarán las bases para la posterior construcción e implementación del túnel de viento en estudio, que además será compatible con el motor que posee la facultad.

Se obtendrán, para esto, los modelos tridimensionales del túnel de viento, así como también todo el sustento experimental por computadora que valide su funcionamiento, conociendo el comportamiento del flujo de aire en cada sección del túnel.

Dichos resultados, serán expuestos en un documento científico, donde se entregarán los procedimientos efectuados en el desarrollo del diseño, así como también, el sustento teórico y práctico (simulaciones CFD).

Uniendo esta información con los datos obtenidos por modelamiento matemático, se completará la etapa de diseño, con un producto validado y optimizado que asegure su correcto funcionamiento.

Esto permitirá ampliar la diversidad de pruebas y experimentos que se puedan realizar en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Talca, aportando al desarrollo de investigaciones e innovación en distintas áreas de la ingeniería.

1.8. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El documento se estructura de la siguiente forma:

- **CAPITULO 1 : INTRODUCCIÓN**

En esta sección se presentan la problemática de ingeniería que justifica el desarrollo de esta memoria, así como también la propuesta de solución y resultados esperados a partir de esta.

- **CAPÍTULO 2 : MARCO TEÓRICO**

Se presentan los fundamentos teóricos que sustentan el posterior trabajo práctico. Se estudian los túneles de viento desde la aerodinámica hasta los componentes para su construcción. Se tratan temas generales desde la mecánica de fluidos hasta otros

Capítulo 1. Introducción

específicos como flujos y el crecimiento de la capa límite. Además, se consideran el análisis adimensional que permite validar el uso de prototipos a escala en el túnel de viento. Junto con esto se revisa la pertinencia en la utilización de métodos computacionales, como lo es el método de volúmenes finitos y su utilización por los softwares CFD.

– CAPÍTULO 3 : DATOS INICIALES

El desarrollo de este trabajo contempla el diseño de un túnel de viento a partir de los resultados obtenidos en un diseño analítico realizado anteriormente, por lo que en este apartado se presentan aquellos resultados que sentarán las bases para la realización del diseño mediante simulaciones computacionales.

– CAPÍTULO 4 : SIMULACIÓN 2D

En cumplimiento del objetivo específico 2 se realiza un análisis computacional de flujos en 2 dimensiones del modelo obtenido analíticamente. Con esto se obtienen parámetros iniciales para la optimización del sistema y se valida el diseño inicial.

– CAPÍTULO 5 : SIMULACIÓN 3D

En este capítulo se simula la estructura inicial del túnel en 3 dimensiones, lo que agrega factores nuevos al flujo de aire, permitiendo visualizar el comportamiento del mismo y zonas de aparición de turbulencias en los 3 planos espaciales.

– CAPÍTULO 6 : ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Aquí se analizan los resultados obtenidos en los capítulos 4 y 5, comparándolos con los datos iniciales del capítulo 3. Además, se discutirá sobre posibles mejoras que ayuden a disminuir el tamaño de la capa límite, basados en los resultados de las simulaciones.

– CONCLUSIONES

– REFERENCIAS

– ANEXOS

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. MECÁNICA DE FLUIDOS

La mecánica de fluidos es la ciencia que estudia el comportamiento de los fluidos (gases o líquidos) y la interacción de éstos con cuerpos sólidos o con otros fluidos en las fronteras, considerando la estática de fluidos y la dinámica de fluido, que trata sobre fluidos en reposo y movimiento respectivamente.

La mecánica de fluidos también se divide en varias categorías, como lo son la hidrodinámica, flujos en tubos y canales, dinámica de gases, aerodinámica, entre otras, como las debidas a flujos naturales como meteorología, oceanografía o hidrología.

En esta oportunidad, el área de estudio más relevante será la aerodinámica, que se ocupa del flujo de gases, en especial del aire, sobre cuerpos sólidos como aviones, cohetes, automóviles o estructuras fijas a altas o bajas velocidades.

2.1.1. Flujo laminar y turbulento

En la práctica, se reconocen 2 tipos de flujos según el movimiento de sus partículas, laminar y turbulento, aunque también existe un flujo de transición entre ambos. El movimiento bien ordenado donde se supone que las capas de fluido se deslizan una sobre otra se llama flujo laminar, y es característico de fluidos viscosos y de bajas velocidades. Por otro lado, el movimiento intensamente desordenado de un fluido se llama turbulento, siendo común en flujos a altas velocidades o fluctuantes y de baja viscosidad. Por último, en la zona de transición, en que se tiene alternadamente ambos flujos, antes de que se vuelva completamente turbulento.

Para determinar el tipo de flujo al interior de una tubería o ducto se emplea el número adimensional de Reynolds, Re , el cual con una magnitud inferior aproximada de 2300 se considera laminar y sobre 4000 turbulento.

El flujo de aire a altas velocidades generalmente será turbulento, por ello el desafío del trabajo de investigación plasmado en este documento, será lograr un flujo de aire a velocidades subsónicas y de régimen laminar en la cámara de pruebas del túnel de viento.



Figura 2.1: Fotografía de flujo laminar, de transición y turbulento. (1)

2.1.2. Flujo interno y externo

Tanto el flujo laminar como el turbulento pueden ser internos o externos, dependiendo si está o no confinado por paredes que lo contengan. El flujo interno es aquel que se obliga a fluir por un canal confinado, mientras que el externo fluye libremente por una superficie abierta. Cabe destacar, que el flujo por ductos o tubos, se considerará interno únicamente si queda por completo limitado por las paredes de éstos, pues de estar lleno sólo parcialmente quedarán superficies libres y corresponderá a un flujo de tipo externo. Esto se conoce como canal abierto.

Los efectos viscosos producidos en estos tipos de flujos toman especial relevancia. En flujos externos, quedarán limitados a la capa límite cercana a las paredes del canal y regiones de la estela aguas abajo. Para flujos internos, la influencia de la viscosidad, domina todo el campo de flujo y las regiones fluidas sometidas a los efectos viscosos crecerán y se encontrarán hasta ocupar todo el flujo. Las capas límites viscosas crecen aguas abajo, frenando el flujo axial en la pared y acelerando el núcleo central para mantener el requisito de continuidad.

El flujo de un gas a través de ductos se usa comúnmente en sistemas de calefacción, enfriamiento y en redes de distribución de fluido. Para esto, se fuerza a fluir el gas mediante un ventilador a través de una sección del flujo. Es importante tomar especial atención a la fricción, que se relaciona directamente con la caída de presión y las pérdidas de carga durante el flujo a través del ducto. Luego, esta diferencia de presión se usa para determinar la potencia generada por el dispositivo impulsor. Un sistema de tuberías típico incluye secciones de diferentes diámetros, unidas entre sí mediante varias uniones. En este sentido, el túnel de viento objeto de estudio es similar, pues se trata de un ducto con secciones variables, en tamaño y forma, por donde se impulsa aire mediante un ventilador.

2.1.3. Capa límite

Capa límite es una región alrededor de un cuerpo o pared, que debido al alto gradiente de velocidad ocasionado por el hecho de que el fluido “se pega” a la frontera, genera esfuerzos cortantes internos significativos en el fluido, pues después existe un desplazamiento entre las diferentes capas, que conforme están a más distancia de la superficie, tienen una velocidad mayor hasta un punto en el que la velocidad de la capa de fluido correspondiente es el de la corriente libre. Este fenómeno existirá aún con una pequeña viscosidad, sin embargo, en caso de tratarse de un fluido de alta viscosidad, deberán considerarse los efectos viscosos en una mayor parte del campo de flujo y no sólo en la capa límite.

La figura 2.2, ilustra el desarrollo de la capa límite en una superficie plana, considerando diferentes regímenes de flujo. Se puede apreciar, que el tamaño de la capa límite está

directamente relacionado con el tipo de flujo. Se tendrá un menor espesor de la capa límite cuando el flujo es laminar respecto del flujo turbulento. Es por este motivo, que para conseguir una zona de flujo laminar en la cámara de pruebas del túnel de viento, se debe velar por reducir el crecimiento de la capa límite.

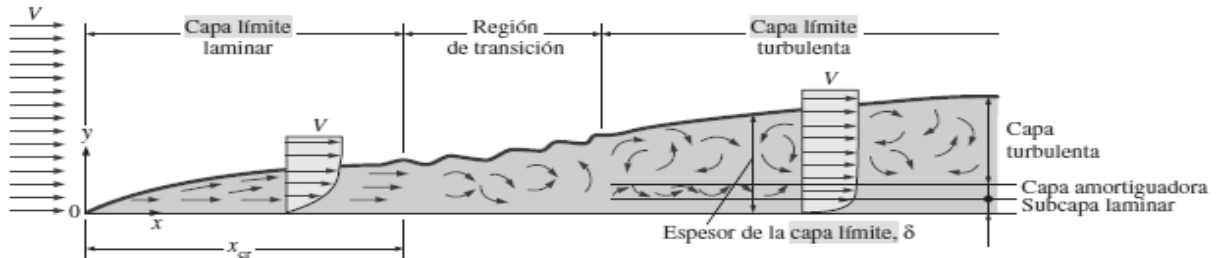


Figura 2.2: Desarrollo de capa límite en superficie plana para diferentes flujos. (2)

Al considerarse flujo interno también se debe tener en cuenta el comportamiento en la capa límite. En la entrada de un ducto o tubería generalmente es muy delgada y puede considerarse como una región no viscosa, exceptuando la frontera, sin embargo, a lo largo de este aumentará de espesor. En muchos casos, la capa límite ocupa con gran rapidez toda la sección transversal de flujo, lo que conlleva a considerarlo como completamente viscoso. Así, el crecimiento de la capa límite es un criterio importante.

Los flujos en ductos en los que se mueve aire en distancias comparativamente cortas, como en los ductos de aire acondicionado y en túneles de viento, por lo general pueden considerarse como flujos no viscosos excepto en la importante región de la capa límite. (Shames, 1995, p.315)

En la figura 2.3, se aprecia el crecimiento de la capa límite al interior de una tubería o ducto.

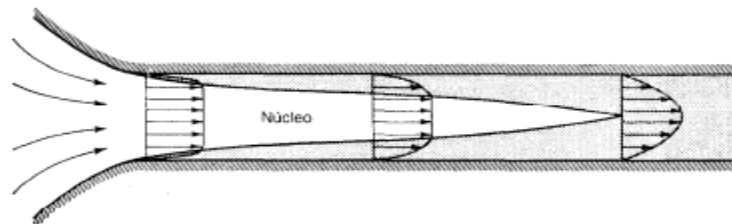


Figura 2.3: Crecimiento de la capa límite en tubería. (3)

2.2. TÚNEL DE VIENTO

Un túnel de viento o túnel aerodinámico es una máquina que puede simular el movimiento del aire alrededor de un cuerpo, ya sea un automóvil, aeronave, edificación o cualquier otro objeto

sólido del que se requiera determinar su comportamiento frente a cargas inducidas por el viento. El flujo de aire será rectilíneo y uniforme a una velocidad determinada en la cámara de ensayos. Estas pruebas, se realizan generalmente con modelos a escala, aunque también existen versiones que permiten ensayar cuerpos de tamaño real, como lo es el caso del túnel de viento de tamaño real de Langley (LFST, por sus siglas en inglés) de la NASA, que es lo suficientemente grande como para probar vehículos de tamaño real.

Con el túnel de viento, se pueden controlar las condiciones que afectan las fuerzas y el movimiento del prototipo. Luego, realizando mediciones cuidadosas de las mismas en el modelo probado, el ingeniero puede determinar la magnitud de las fuerzas en el producto real de tamaño completo.

Una variedad considerable de túneles de viento se ha diseñado y construido para realizar una amplia gama de pruebas aerodinámicas. Estos túneles están equipados con sistemas de montaje e instrumentación que pueden ser fácilmente adaptados para muchos tipos de pruebas.

Así, un túnel de viento se convierte en una herramienta de gran utilidad en la investigación de la mecánica de los fluidos en distintas áreas de investigación, como aeronáutica, energías renovables, medio ambiente, indumentaria deportiva, obras civiles, entre otras. Destacando entre sus principales ventajas la optimización de diseños y funcionamiento de prototipos, así como también en menores costos económicos y de tiempo, permitiendo realizar repetidos ensayos, sin los costes de fabricación de modelos a escala real.

2.2.1. Túnel de viento subsónico

Los túneles de viento se clasifican según la velocidad del flujo de aire en su interior como subsónicos, transónicos, supersónicos e hipersónicos. Las velocidades que los caracterizan se encuentran en unidades de Número de Mach, correspondiendo para el caso en estudio (subsónico), niveles operacionales a velocidades por debajo de dicho número, con velocidades en la cámara de prueba hasta 400 km/h, es decir, inferiores a 0,3 M.

Es importante señalar, que en estudios de aerodinámica, valores inferiores a 0,3 M consideran flujo incompresible, lo que simplifica notoriamente los cálculos matemáticos involucrados.

En este tipo de túneles, el aire se mueve con un sistema de propulsión dotado de un ventilador axial grande, que se encarga de aumentar la presión dinámica y con ello evitar las pérdidas de fluido viscoso.

Los otros modelos, contemplan 0,3 a 0,75 M para el caso de túneles transónicos, de 1,2 a 5 M para los supersónicos y de 5 hasta 15 M para flujo hipersónico.

2.2.2. Túnel de viento de circuito abierto

Según la configuración del circuito y la circulación de aire por su interior, se clasifican en túneles abiertos y cerrados.

Los primeros, objeto de este estudio, son los más simples y fáciles de construir. En ellos, el flujo de aire ingresa directamente desde el exterior hacia la cámara de pruebas, para luego ser expulsado nuevamente al exterior.

Se caracterizan por ser más susceptibles a fluctuaciones de temperatura y variaciones en el flujo de aire. Esto debido a que se encuentran abiertos hacia el medio exterior y dependerán en gran medida de las condiciones del entorno en que se encuentren.

En los túneles de viento de circuito abierto, es posible ubicar el ventilador tanto en la entrada como salida del flujo de aire, el que por medio de la impulsión o succión de aire forzará su circulación respectivamente. En la figura 2.4 se muestra un túnel de viento de circuito abierto, con el ventilador ubicado en la salida del flujo de aire.

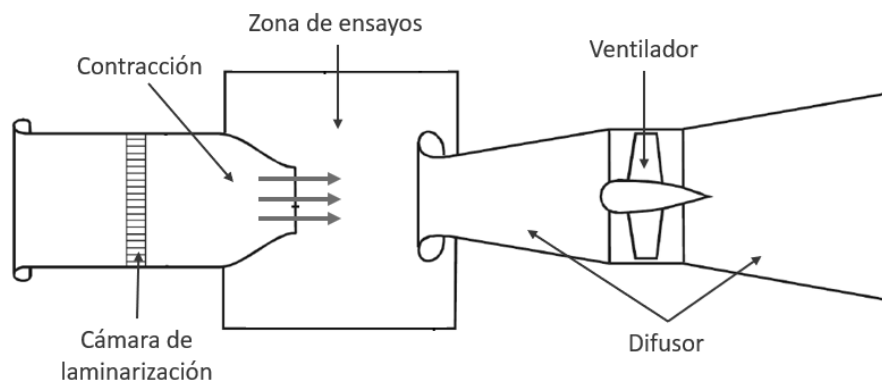


Figura 2.4: Túnel de viento de circuito abierto de succión. (15)

Por otro lado, los túneles de circuito cerrado, como el mostrado en la figura 2.5 serán aquellos que completan un flujo cerrado del aire, conectando directamente la salida del difusor con la entrada al túnel por la zona de admisión. Para ello, se configuran como un sistema usualmente largo y dificultoso de construir.

En la Fórmula 1 se emplea el túnel de viento cerrado, cuyo principal inconveniente es la mayor inversión inicial. Sin embargo, los costes de operación son menores y la calidad del estudio es mucho mayor, ya que se puede controlar más fácilmente el flujo de aire.

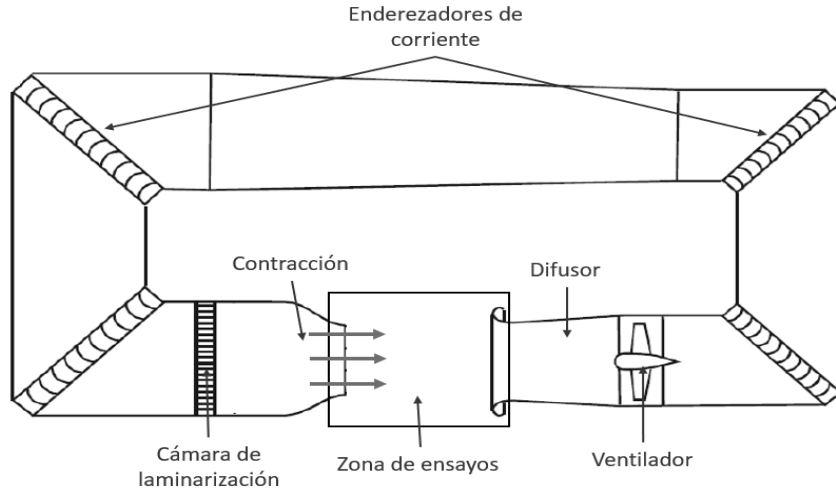


Figura 2.5: Túnel de viento de circuito cerrado. (15)

2.2.3. Componentes de un túnel de viento

Cada componente del túnel de viento subsónico de circuito abierto realiza una función importante en el flujo de aire y en la posibilidad de generar un régimen laminar en la zona de pruebas

En la figura 2.6 se aprecia un esquema de los componentes que conforman el túnel y a continuación se describen brevemente.

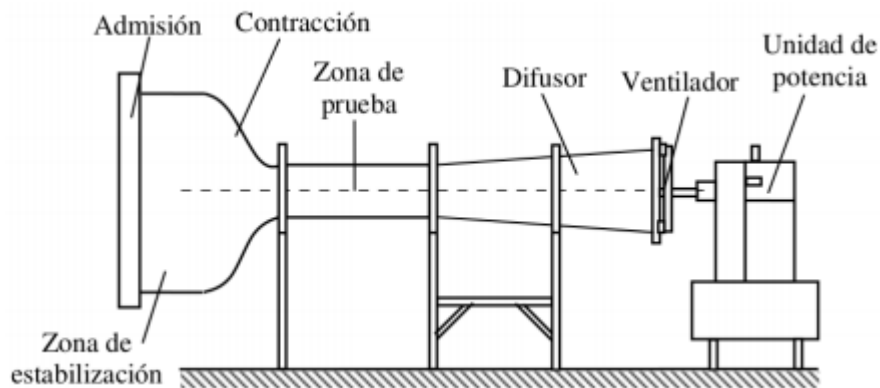


Figura 2.6: Componentes túnel de viento de circuito abierto de succión. (10)

- **Zona de admisión:** corresponde a la entrada al conducto principal del túnel y su función es evitar la desestabilización de las corrientes de aire y la formación y propagación de las turbulencias que se deben a cambios abruptos de la velocidad del viento.

- **Zona de estabilización o cámara de ajustes:** esta zona permite que el flujo pueda pasar a la zona de contracción con un flujo uniforme y de baja turbulencia. Para ello se confecciona como un ducto de sección transversal constante y en ella se disponen rejillas estabilizadoras. El fluido se hace pasar por estos dispositivos, cuyo objetivo es lograr una turbulencia isótropa, es decir, con fluctuación media de corriente igual en todas direcciones.

Se distinguen 2 tipos principalmente:

- **Panal de abejas:** panel mallado que cumple la función de direccionar el flujo hacia la zona de contracción. El fluido pasa a través de estos elementos, adoptando una orientación de filamentos paralelos.
- **Pantallas de turbulencia:** son dispositivos encargados de dar uniformidad al perfil de velocidades, aunque dicho beneficio conlleva una considerable caída de presión. En este proceso, además, inducen pequeñas turbulencias al flujo.

Para mejorar la eficiencia en la acción de estos elementos, se disponen consecutivamente panel de abeja y pantallas de turbulencia, permitiendo corregir deficiencias que pudiesen presentar por si solos.

- **Zona o cono de contracción:** corresponde a una zona donde se disminuye el área de paso del túnel y su función es acelerar el flujo y disminuir las variaciones de velocidad. En esta zona, el fluido se acelera hasta alcanzar la velocidad de diseño en la zona de prueba.

Dicha reducción gradual de la sección, permite generar un incremento proporcional y continuo de la velocidad antes de llegar a la zona de pruebas, reduciendo, además, el grosor de la capa límite y evitando la formación de vórtices.

- **Sección o cámara de pruebas:** esta es la zona donde se instala el modelo de estudio y en donde la velocidad del flujo alcanza su régimen de prueba, siendo las líneas de corriente uniformes y paralelas, es decir, flujo laminar.

Esta zona, debe permitir el acceso a su interior para poder colocar y manipular correctamente el modelo a ensayar, además de dar lugar a la instalación de dispositivos de medición y control. Por esto, es que generalmente se construyen con una forma rectangular, que facilite los trabajos en su interior y fijación de elementos.

- **Difusor:** tiene por función principal el disminuir la velocidad de salida del flujo, cumpliendo una tarea inversa a la del cono de contracción, gracias a un incremento del

área de paso. Con esto, se aumenta paulatinamente la presión y se disminuye la velocidad del flujo, lo cual hace disminuir las pérdidas por fricción.

- **Ventilador y unidad de potencia:** finalmente, en la salida del difusor, se dispone de un mecanismo capaz de forzar la circulación del aire por el interior del túnel, que usualmente será un ventilador, accionado por su respectiva unidad de potencia (motor).

Los ventiladores empleados usualmente para esta aplicación, serán ventiladores axiales o centrífugos. El primero proporciona un impulso energético al aire en espiral, con igual dirección de entrada y salida, caracterizándose por la forma, inclinación y número de álabes. El segundo, considera la trayectoria del fluido en la dirección del eje de su rodete a la entrada y perpendicular a éste en la salida.

Como se mencionó anteriormente, el componente de mayor importancia y núcleo de un túnel de viento será la sección de pruebas, pues es aquí donde se desea regular el flujo de aire que servirá para los distintos ensayos que se realicen en esta zona.

Por otro lado, las zonas más críticas serán el cono de contracción y el difusor, encargados de dar uniformidad al flujo de aire en la cámara de pruebas. Por un lado la contracción, que debe realizarse con las menores pérdidas energéticas posibles, ya que mientras menor sea ésta, mayor será la recuperación de presión en el difusor.

2.2.4. Procedimiento de diseño de un túnel de viento

Para concretar el diseño de un túnel de viento de circuito abierto, se debe calcular las dimensiones de cada uno de sus componentes, tomando como punto de inicio dos parámetros bases: el área de la sección transversal del modelo y la velocidad al interior de la sección de pruebas.

En seguida, se determinan las dimensiones de la cámara de pruebas, difusor, cono de contracción, cámara estabilizadora y ventilador. Sin embargo, dicho proceso es iterativo y dependerá, además, de los requerimientos específicos del túnel, dependiendo del cliente o necesidades del modelo a estudiar, que variarán los parámetros fijados de base de cálculo.

Además de esto, es recomendable simular computacionalmente el túnel según las dimensiones obtenidas del proceso de cálculo, permitiendo determinar y visualizar el comportamiento del fluido y los niveles de turbulencia.

Este procedimiento por computadora es fundamental para completar el diseño del túnel de viento, pues para definir la cantidad precisa de pantallas de panal y de mallas, además del diseño del panal, es necesario conocer el comportamiento del fluido al interior del túnel. Y así, disponerlas según corresponda para uniformarlo.

2.3. ANÁLISIS DIMENSIONAL Y SIMILITUD

En la vida real, en múltiples casos de ingeniería, las ecuaciones no se conocen o son muy difíciles de resolver, siendo la experimentación el único método de obtener información confiable. Muchos de dichos experimentos contemplan la utilización de ensayos a modelos a escala en lugar de un prototipo real. Esto permite ahorrar tiempo y dinero, ya que la construcción del prototipo final y la repetitividad de pruebas puede ser costosa. Podría ocurrir que para probar un automóvil en un choque se tenga que destruir por completo, siendo más económico el probar una maqueta que bajo condiciones controladas simule el modelo de tamaño real.

En la figura 2.7, se muestra el modelo de un submarino probado en el túnel de viento Langley de la Nasa, el cual representa el comportamiento del prototipo de tamaño real y su desempeño bajo el agua, a partir de un modelo a escala reducido inmerso en un flujo de aire.

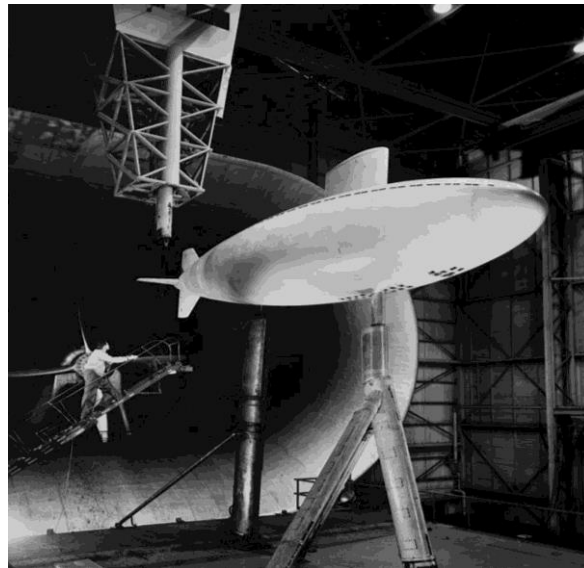


Figura 2.7: Prueba de modelo de submarino en túnel de viento Langley (1)

Es por esto, que para validar las pruebas en el túnel de viento, el análisis dimensional y los principios de similitud son fundamentales, ya que no basta con probar un modelo de iguales características geométricas, sino que las condiciones de operación en el tiempo y las fuerzas involucradas a las que estará sometido el modelo deben ser representativas del prototipo real.

2.3.1. Principio de Similitud

Existen tres condiciones necesarias para similitud completa entre un modelo y un prototipo, y que permitan escalar los resultados de uno a otro. Pueden ser en escalas menor que, igual a, o mayor que uno. Estas condiciones son la similitud geométrica, cinemática y dinámica.

- **Similitud Geométrica:** El modelo se puede escalar por algún factor constante, pero debe tener la misma forma que el prototipo real. Se puede considerar como la equivalencia en escala de longitud.
- **Similitud Cinemática:** Esta condición, establece que la velocidad en cualquier punto, el flujo del modelo debe ser proporcional a la velocidad en el punto correspondientes en el flujo del prototipo, es decir, la velocidad del flujo debe escalar por algún factor constante en magnitud, dirección y sentido relativo. Se puede considerar como una equivalencia en escala de tiempo.
- **Similitud Dinámica:** Ésta, se logra cuando todas las fuerzas en el flujo del modelo se escalan por un factor constante a fuerzas correspondientes en el flujo del prototipo real. Esta es la condición de similitud más restrictiva, considerándose como una equivalencia en escala de fuerza.

La similitud cinemática es una condición necesaria y requisito para la similitud dinámica, pero no es suficiente por si sola. De esta forma se podría tener para un flujo de modelo y prototipo, similitud tanto geométrica como cinemática, pero no necesariamente habrá similitud dinámica. “En un campo de flujo general, la similitud completa entre un modelo y un prototipo se logra sólo cuando existen similitudes geométrica, cinemática y dinámica” (Cengel y Cimbala, 2006, p.278).

2.3.2. Análisis Dimensional

El análisis dimensional es una herramienta que permite escalar resultados entre modelos de distintas escalas. El caso más usual es la experimentación con modelos a escala geométrica representativa de un prototipo de tamaño real.

Cabe destacar que este tipo de análisis no es exclusivo de la mecánica de fluidos, sino que su utilidad es aplicable a todas las disciplinas, especialmente cuando se debe diseñar y experimentar.

Sus principales propósitos según Cengel y Cimbala (2006) son:

- Generar parámetros adimensionales que ayuden en el diseño de experimentos (físicos y/o numéricos) y en el reporte de los resultados experimentales.
- Obtener leyes de escalamiento de modo que se pueda predecir el desempeño del prototipo a partir del desempeño del modelo.
- Predecir (a veces) las tendencias en la relación entre parámetros.

Para denotar parámetros adimensionales, se usa la letra griega mayúscula pi (Π). Un problema general de análisis dimensional consta de una Π llamada Π dependiente, cuya notación será Π_1 , siendo generalmente dicho parámetro, función de otras variables Π , llamadas Π independientes. Esta relación funcional se escribe:

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_k) \quad (1)$$

Donde:

k : número total de Π , [-]

En un modelo a escala que se pone a prueba para simular un flujo de un prototipo, para garantizar similitud completa entre ambos, cada Π independiente del modelo (subíndice n) debe ser idéntico al correspondiente Π independiente del prototipo (subíndice m). En estas condiciones, se garantiza que la Π dependiente del modelo ($\Pi_{1,n}$) se iguale con la Π dependiente del prototipo ($\Pi_{1,m}$). Matemáticamente se representa como:

$$\begin{aligned} \text{Si} \quad & \Pi_{2,n} = \Pi_{2,m}, \Pi_{3,n} = \Pi_{3,m}, \dots, \Pi_{k,n} = \Pi_{k,m} \\ \text{Entonces} \quad & \Pi_{1,n} = \Pi_{1,m} \end{aligned} \quad (2)$$

“Para garantizar similitud completa, el modelo y el prototipo deben ser geoméricamente similares, y todos los grupos independientes deben coincidir entre modelo y prototipo” (Cengel y Cimbala, 2006, p.278).

2.3.3. Método de Repetición de Variables y Teorema Pi de Buckingham

Existen varios métodos que permiten generar parámetros adimensionales (las Π). El más empleado es el Método de Repetición de Variables, popularizado por Edgar Buckingham y desarrollado por Dimitri Riabouchinsky en 1991. Éste, consta de un procedimiento de 6 pasos para obtener dichos parámetros. Según Cengel y Cimbala son:

- **Paso 1:** Haga una lista con los parámetros del problema y cuente su número total n (esto incluye variables dependiente e independientes). Aquí se debe cerciorar de que las variables independientes realmente lo sean y que no se puedan expresar en términos de otras.
- **Paso 2:** Haga una lista con las dimensiones primarias para cada uno de los n parámetros.
- **Paso 3:** Suponga la reducción j . Como primera suposición, haga j igual al número de dimensiones primarias representadas en el problema. El número esperado de Π (k) es igual a n menos j , de acuerdo al Teorema Pi de Buckingham:

$$k = n - j \tag{3}$$

Si en este paso, o durante algún paso subyacente, el análisis no funciona, verifique que haya incluido suficientes parámetros en el paso 1. De otro modo, regrese y reduzca j por *uno* e intente nuevamente.

- **Paso 4:** Elija los j parámetros repetidos que usará para construir cada Π . Dado que los parámetros repetitivos tienen el potencial para aparecer en cada Π , asegúrese de elegirlos “atinadamente”.
- **Paso 5:** Genere las Π una a la vez mediante el agrupamiento de los parámetros repetitivos con uno de los parámetros restantes, y fuerce el producto a ser adimensional, manipulando según sea necesario.
- **Paso 6:** Verifique que todas las Π de hecho sean adimensionales. Escriba la relación de funcionalidad en la forma de la ecuación 1.

2.4. SIMULACIONES COMPUTACIONALES

Existen dos métodos fundamentales para diseñar y analizar sistemas de ingeniería relacionados con el flujo de fluidos: experimentación y cálculo. El primero conlleva, por lo general, la construcción de modelos que son probados en túneles de viento u otras instalaciones, mientras que el segundo implica resolver ecuaciones diferenciales, ya sea de manera analítica o computacional. Sin embargo, hay ecuaciones que no tienen solución puramente analítica.

La ecuación de Navier-Stokes es la base de la mecánica de fluidos. Puede parecer suficientemente inocua, pero es una ecuación diferencial parcial de segundo orden, no-lineal e inestable. Si fuera posible resolver esta ecuación para flujos de cualquier geometría, este libro tendría la mitad de grueso. Por desgracia, las soluciones analíticas no se obtienen excepto para campos de flujo muy simples. (...) De hecho, muchos investigadores han dedicado sus estudios para intentar resolver la ecuación de Navier-Stokes. (Cengel, Cimbala, 2006, p.430)

De aquí es que la utilización de métodos numéricos para resolver flujos reales en geometrías complejas se ha hecho imprescindible. Si bien el método de elementos finitos (FEM) es cada vez más utilizado por investigadores en diversas áreas y en la última década “ha tenido importantes avances para poder resolver con éxito los desafíos de la mecánica de fluidos, todavía para problemas complejos (...), el método de volúmenes finitos es en la práctica la única solución” (Osses, 2016).

En este sentido, los programas de dinámica de fluidos computacional (CFD) se basan en la utilización de volúmenes finitos para realizar una amplia variedad de simulaciones, incluidas las de mecánica de fluidos. “Puede usarse CFD para resolver el conjunto completo de ecuaciones de movimiento (continuidad más Navier-Stokes) a lo largo de todo el campo de flujo” (Cengel, Cimbala, 2006, p.512).

2.4.1. Ecuaciones de movimiento

Una ecuación de movimiento es la formulación matemática que define la evolución temporal de un sistema físico en el espacio. Esta ecuación relaciona la derivada temporal de una o varias variables que caracterizan el estado físico del sistema, con otras magnitudes físicas que provocan los cambios en este.

Para el flujo laminar estacionario de un fluido viscoso, newtoniano, incompresible y sin efectos de superficie libre, las ecuaciones de movimiento son la ecuación de continuidad y las ecuaciones de Navier-Stokes.

2.4.1.1. Ecuación de continuidad

En mecánica de fluidos, representa una ecuación de conservación de masa. Se expresa en su forma reducida como:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \tag{4}$$

Donde:

\vec{v} : vector velocidad, [m/s]

$\vec{\nabla}$: operador vectorial que se usa para expresar los gradientes de una función escalar de manera compacta en forma vectorial.

O en su forma extendida como:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

2.4.1.2. Ecuaciones de Navier-Stokes

Se trata de un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido. Estas ecuaciones se obtienen aplicando los principios de conservación de la mecánica y la termodinámica a un volumen fluido. Se expresa como:

$$(\vec{v} \cdot \vec{\nabla})\vec{v} = -\frac{1}{\rho}\vec{\nabla}P' + \mu\nabla^2\vec{v} \quad (6)$$

Donde:

ρ : densidad del fluido, [kg/m³]

P : presión del fluido, [Pa]

μ : viscosidad dinámica, [Pa·s]

En su forma extendida, se escribe:

a) Cantidad de movimiento en x

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P'}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

b) Cantidad de movimiento en y

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P'}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (8)$$

c) Cantidad de movimiento en z

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P'}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (9)$$

2.4.2. Método de volúmenes finitos

El método de volúmenes finitos (Finite Volume Method – FVM en su sigla en inglés) fue introducido en la década de 1970 por McDonald, MacCormack, y Paullay e históricamente ha sido método preferido por los científicos e ingenieros que trabajan con la mecánica de fluidos.

El método de los volúmenes de control finitos permite discretizar y resolver numéricamente ecuaciones diferenciales. Es un método alternativo a los de diferencias finitas y elementos finitos. Una importante propiedad de éste, es que los principios de conservación de masa, momentum y energía, los cuales son la base de la modelación matemática para la mecánica de medios continuos, por definición, son respetadas por las ecuaciones discretas deducidas por el método de volúmenes finitos.

Para comprender de mejor manera este concepto se considerará una malla de discretización del espacio fluido. En torno a cada punto de esta malla se construye un volumen de control que no se traslapa con los de los puntos vecinos. De esta forma el volumen total de fluido resulta ser igual a la suma de los volúmenes de control considerados. En la figura 2.8 se muestra dicha descomposición.

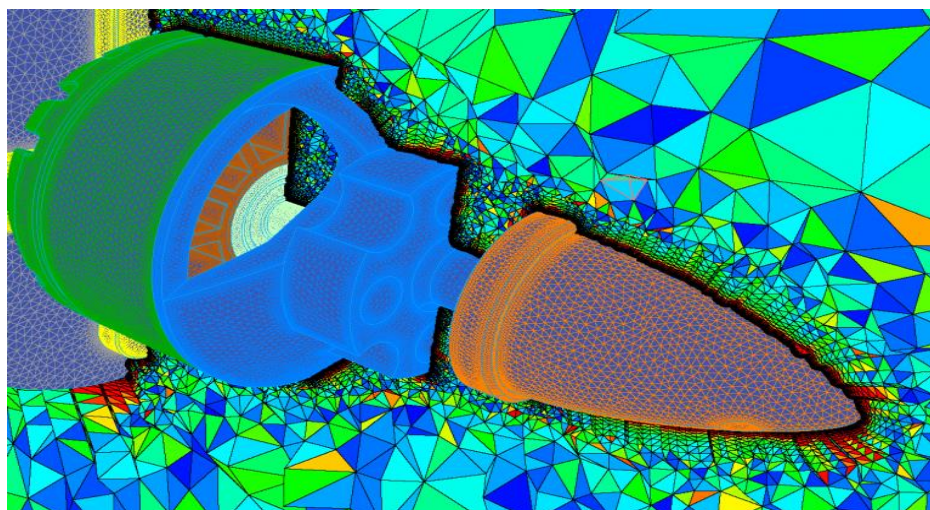


Figura 2.8: Discretización de dominio por MVF. (17)

Después de haber definido los volúmenes de control, las ecuaciones de conservación son descritas en su forma integral para cada volumen. En este proceso el teorema de la divergencia de Gauss es usado para convertir integrales de volumen sobre operadores de divergencia y gradiente a integrales de superficie. Es así, como la ecuación diferencial a resolver se integra sobre cada volumen de control, lo cual entrega como resultado una versión discretizada de dicha ecuación. Para realizar la integración se requiere especificar perfiles de variación de la variable dependiente entre los puntos de la malla, de modo de poder evaluar las integrales resultantes.

“La principal propiedad del sistema de ecuaciones discretizadas resultante, es que la solución obtenida satisface en forma exacta las ecuaciones de conservación consideradas, independientemente del tamaño de la malla” (Niño, 2002, p.1).

2.4.3. Dinámica de fluidos computacional (CFD)

La dinámica de fluidos computacionales (Computational Fluid Dynamics – CFD en su sigla en inglés) corresponde al campo de estudio dedicado a solucionar ecuaciones del flujo de fluidos con computadora.

En la actualidad, los ingenieros se apoyan de esta herramienta para complementar los resultados del análisis experimental. Por ejemplo, los ingenieros podrían obtener propiedades globales, como sustentación, fuerza de arrastre, caída de presión o potencia experimentalmente, pero emplean la CFD para obtener detalles acerca del campo de flujo, como los esfuerzos de corte, velocidad, perfiles de presión y líneas de corriente. De esta forma, comúnmente se utilizan procedimientos experimentales para comparar y validar datos obtenidos por simulaciones CFD, logrando abreviar los ciclos de diseño con estudios que reducen considerablemente la cantidad de pruebas empíricas.

Como se mencionó anteriormente, el método computacional busca resolver las ecuaciones de movimiento, y para realizar dicho proceso numérico se deben seguir los siguientes pasos:

- a) Se elige un dominio computacional y se genera una malla. Puede considerarse a cada celda como un pequeño volumen de control en el que se resuelven las versiones separadas de las ecuaciones de conservación y transporte.
- b) Se definen las condiciones de borde o frontera en cada lado o cara del dominio computacional para flujos en 2D y 3D respectivamente.
- c) Se especifica el tipo de fluido (agua, aire, aceite, etc.), junto con las propiedades de dicho fluido (temperatura, densidad, viscosidad, etc.).
- d) Se seleccionan los parámetros numéricos y los algoritmos de solución.
- e) Los valores de primera aproximación para las variables de campo de flujo se especifican para cada celda. Éstas son condiciones iniciales, que podrían ser correctas o no, y son necesarias para comenzar el proceso iterativo que, a su vez, los irá ajustando.
- f) Al comenzar con los valores de primera aproximación, las formas discretizadas de las ecuaciones 1 y 3 se resuelven por iteración, por lo general en el centro de cada celda.
- g) Cuando converge la solución, las variables de campo de flujo como velocidad y presión se trazan y analizan de manera gráfica. El usuario, también pueden definir y analizar otros parámetros que se formen mediante combinaciones algebraicas de variables de campo de flujo.

- h) Las propiedades globales del campo de fluido, como la caída de presión, y las propiedades integrales, como las fuerzas (de sustentación y de arrastre) y las torques que actúan sobre un cuerpo, se calculan a partir de la solución que se obtiene por convergencia.

2.4.4. Ansys FLUENT

Fluent es un paquete computacional de la dinámica de fluidos (CFD) usado ampliamente en aplicaciones de modelos de flujos. El primer paso en el análisis de un modelo contempla un procesamiento previo, que considera principalmente la construcción o dibujo de la geometría a analizar en 2 o 3 dimensiones, pudiendo realizarse directamente en complementos de Ansys o importando un modelo CAD desde otra plataforma, tal como Autodesk Inventor o Solidworks. En seguida se define una malla basada en volúmenes finitos y se siguen los pasos descritos en el punto anterior. Una vez que se prepara el modelo numérico, este software CFD realiza los cálculos necesarios y produce resultados, que se podrán consultar según los requerimientos del usuario. Por último, se desarrolla un procesamiento posterior, que comprende la organización e interpretación de los datos e imágenes entregados por el programa.

Existen paquetes desarrollados para aplicaciones específicas, como el enfriamiento de componentes electrónicos, sistemas de ventilación y mezclado, además de la versión estándar, configurable según los requerimientos del usuario.

FLUENT es una herramienta poderosa para el estudio de flujos dinámicos, siendo capaz de manejar flujos subsónicos o supersónicos, flujos estacionarios o transitorios, flujos laminares o turbulentos, flujos newtonianos o no newtonianos, flujos de una sola fase o fases múltiples, flujo a través de medios porosos, transferencia de calor, vibraciones inducidas por los flujos y reacciones químicas, incluso combustión.

En base a lo anterior, la construcción de un túnel aerodinámico con flujos de aire subsónicos y laminares en la zona de pruebas, podrá ser simulado completamente en el software Ansys FLUENT, cumpliendo los requerimientos de los ensayos a realizar, necesarias para la validación del diseño.

2.4.4.1. Turbulencia

Cuando el flujo ingresa al dominio en una entrada, salida o límite de campo lejano, Ansys FLUENT requiere la especificación de las cantidades de turbulencia transportadas.

En aquellos casos en que es importante representar con precisión una capa límite o un flujo turbulento completamente desarrollado en la entrada, lo ideal sería establecer las cantidades de turbulencia creando perfil detallado del flujo. En algunas situaciones, es apropiado especificar un valor uniforme de la cantidad de turbulencia en el límite donde ocurre el flujo de entrada.

En la mayoría de los flujos turbulentos, se generan niveles más altos de turbulencia dentro de las capas de corte que los que ingresan al dominio en los límites del flujo, lo que hace que el resultado del cálculo sea relativamente insensible a los valores del límite del flujo de entrada. Sin embargo, se debe tener cuidado para asegurarse de que los valores límite no sean tan alejados como para contaminar su solución o impedir la convergencia.

Se puede especificar las cantidades de turbulencia en términos de cantidades convenientes, como intensidad de turbulencia, relación de viscosidad turbulenta, diámetro hidráulico y escala de longitud de turbulencia.

2.4.4.1.1. Intensidad de turbulencia

Una intensidad de turbulencia del 1% o menos generalmente se considera baja y las intensidades de turbulencia superiores al 10% se consideran altas. Idealmente, se tendrá una buena estimación de la intensidad de la turbulencia en el límite de entrada a partir de datos medidos externos.

Para los flujos internos, la intensidad de la turbulencia en las entradas depende totalmente del historial del flujo aguas arriba. Si el flujo de aguas arriba está poco desarrollado y sin perturbaciones, se puede utilizar una intensidad de turbulencia baja. Si el flujo está completamente desarrollado, la intensidad de la turbulencia puede ser tan alta como un pequeño porcentaje. La intensidad de la turbulencia en el núcleo de un flujo al interior de una tubería completamente desarrollado se puede estimar a partir de la siguiente fórmula derivada de una correlación empírica para los flujos de tubería:

$$I = \frac{u'}{u_{avg}} = 0,16(Re_{D_H})^{-1/8} \quad (10)$$

Donde:

- I : Intensidad de turbulencia, [%]
- u' : Razón de la raíz cuadrada de la fluctuación de velocidad, [m/s]
- u_{avg} : Velocidad media del flujo, [m/s]
- Re_{D_H} : Número de Reynolds en diámetro hidráulico, [-]

2.4.4.1.2. Relación de viscosidad turbulenta

La relación de viscosidad turbulenta, μ_t/μ , es directamente proporcional al número de Reynolds turbulento ($Re_t \equiv k^2/(\epsilon\nu)$). Re_t es grande en capas límite de alto número de Reynolds, capas de corte y flujos en ductos completamente desarrollados, del orden de 100 a 1000. Sin embargo, en los límites de flujo libre de la mayoría de flujos externos, la relación de viscosidad turbulenta es bastante pequeña. Normalmente, los parámetros de turbulencia se establecen de modo que $1 < \mu_t/\mu < 10$. Para flujos internos, los valores de hasta 100 son sensibles a dicha relación.

2.4.4.1.3. Diámetro hidráulico

En hidráulica, es comúnmente utilizado el término diámetro hidráulico, D_H , que representa el diámetro de una sección de canal o tubo no circular, permitiendo estudiar el comportamiento del flujo de la misma forma que sí lo fuera.

$$D_H = \frac{4A}{P} \quad (11)$$

Donde:

- A : Área, [m²]
- P : Perímetro, [m]

Algunas de las fórmulas para obtener los diámetros hidráulicos de las secciones más comúnmente utilizadas.

- a) Sección circular

$$D_H = D \quad (12)$$

- b) Sección rectangular

$$D_H = \frac{2HW}{H + W} \quad (13)$$

- c) Sección cuadrada

$$D_H = L \quad (14)$$

Donde:

- D : Diámetro de sección circular, [m]
- H : Alto sección rectangular, [m]
- W : Ancho sección rectangular, [m]
- L : Lado sección cuadrada, [m]

2.4.4.1.4. Escala de longitud de turbulencia

La escala de longitud de turbulencia, l , es una magnitud física relacionada con el tamaño de los grandes remolinos que contienen flujos turbulentos.

En los flujos de conductos completamente desarrollados, l está restringido por el tamaño del conducto, ya que los remolinos no pueden ser más grandes que éste. Una relación aproximada entre la escala de longitud turbulenta y el tamaño físico del conducto es $l = 0,07L$, donde L es la dimensión más relevante del conducto. Este factor se basa en el valor máximo de la longitud de mezcla en un flujo de tubería turbulento completamente desarrollado, donde L es el diámetro hidráulico de la tubería en un canal de sección no circular.

CAPÍTULO 3. DATOS INICIALES

3.1. DATOS INICIALES DE DISEÑO

Como fue mencionado al inicio de este documento, la validación que se realiza del túnel de viento mediante simulaciones computacionales, toma como punto de partida los resultados obtenidos en una memoria de titulación anterior, que aborda el diseño analítico del mismo dispositivo.

Dicho trabajo es obra de Javier Iturriaga Valenzuela, con la guía del profesor y doctor en ingeniería Jorge Hinojosa Rehbein. Fue realizado en el año 2017 y lleva el nombre de: “Diseño de un túnel de viento subsónico de circuito abierto para fines académicos a partir de un motor existente en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Talca”.

El diseño propuesto, luego de un proceso iterativo llegó a los siguientes resultados:

3.1.1. Condiciones iniciales en la cámara de pruebas o parámetros base

Tabla 3.1: Condiciones iniciales de la cámara de prueba. (6)

Condiciones Iniciales Cámara de Pruebas		
Propiedades	Valor	Unidad
Velocidad de diseño del flujo	47	m/s
Área frontal del modelo de ensayo	220	cm ²

3.1.2. Condiciones iniciales del flujo de entrada


Tabla 3.2: Condiciones iniciales del flujo de entrada. (6)

Condiciones Iniciales Cámara de Pruebas		
Propiedades	Valor	Unidad
Presión Atmosférica	101,325	kPa
Temperatura Atmosférica	20°	C
Densidad	1,225	kg/m ³
Constante del aire	287	J/kg-K
Índice adiabático del aire	1,005	J/kg-K
Calor específico	1,4	-
Viscosidad cinemática	0,0000146	m ² /s


3.1.3. Ventilador

El ventilador considerado para el diseño se encuentra disponible en el comercio, siendo éste de la marca SODECA, modelo HPX/SEC-100-4T-15 IE3. En la figura 3.1, se presenta el dispositivo señalado.

HPX



Tubular axial fans with external motors



Belt-driven tubular axial fans with casing aperture up to 180°.

Fan:

- Tubular casing with rotating cap, in sheet steel.
- Cast aluminium impellers.
- Sealed transmission unit (IP66) with double retention system.
- Airflow direction from motor to impeller.
- Maximum temperature of air to be carried: -25°C +120°C.

Motor:

- IE3 efficiency motors for powers equal to or higher than 0.75kW except single-phase, 2-speed and 8-pole.
- Class F motors with ball bearings and IP55 protection.

- Single-phase 230V-50Hz and three-phase 230/400V-50Hz (up to 4kW) and 400/690V-50Hz (powers higher than 4kW).

Finish:

- Anti-corrosive finish of polyester resin polymerised at 190°C, previously degreased with phosphate-free nanotechnological treatment.

On request:

- Airflow direction from impeller to motor.
- 100% reversible impellers.
- Special windings for different voltages.
- Category 2 ATEX certification (HPX/ATEX series version).

Order code

HPX — 35 — 2T — 0.75

↓

HPX: Tubular mobile axial fans

↓

Impeller diameter in cm

↓

Number of motor poles
2=2900 r/min. 50 Hz
4=1400 r/min. 50 Hz

↓

T= Three-phase

↓

Motor power (HP)

Technical characteristics

Model	Speed (r/min)	Max. admissible current (A)			Installed power (kW)	Blade inclination angle (°)	Maximum flow rate (m³/h)	Sound pressure level dB(A)	Approx. weight (kg)
		230V	400V	690V					
HPX/SEC-100-4T-7.5 IE3	1465	10.3	5.97	5.50	10	46850	92	164	
HPX/SEC-100-4T-10 IE3	1465	13.9	8.06	7.50	14	54900	93	173	
HPX/SEC-100-4T-15 IE3	1470	21.4	12.4	11.00	20	63200	94	218	
HPX/SEC-100-4T-20 IE3	1465	28.7	16.6	15.00	26	73200	95	220	

Figura 3.1: Ventilador axial modelo HPX. (13)

La particularidad de este modelo, es que puede ser usado en aplicaciones con alta temperatura y humedad, aventajándolo sobre otros modelos, al otorgarle la atribución de realizar mayor variedad de pruebas y bajo las condiciones climáticas del momento.

3.1.4. Dimensiones de componentes

Las dimensiones de los componentes, fueron determinadas por un proceso iterativo de 3 etapas, por lo que los valores que se presentarán, corresponden a los de la última iteración (valores finales).

En la tabla 3.3, se entregan los datos finales del diseño analítico, que servirán de punto de partida para la etapa de modelado en 2 y 3 dimensiones, y posteriores simulaciones en software CFD.

Tabla 3.3. Valores finales de diseño analítico y dimensionamiento. (6)

Dimensiones Túnel de viento subsónico de circuito abierto			
Sección	Parámetros	Valor	
Cámara de pruebas	Bloqueo de Flujo (adimensional)	0,075	
	Base cuadrada (m)	0,55	
	Longitud (m)	1,36	
	Pérdida (Pa)	35,406	
Difusor	Base cuadrada entrada (m)	0,55	
	Diámetro circular salida (m)	1	
	Longitud (m)	3,67	
	Ángulo equivalente (m)	2,5	
	Relación de áreas REAL	2,49917355	
	Pérdida (Pa)	122,548	
Cono de contracción	Base entrada (m)	1,56	
	Base salida (m)	0,55	
	Longitud (m)	1,5	
	Relación de áreas REAL	8,04495867	
	Pérdida (Pa)	0,212	
Cámara de estabilización	Panal	Diámetro celda (mm)	9
		Espesor (mm)	1
		Diámetro hidráulico (mm)	9,451
		Longitud (mm)	56,704
		Relación longitud - diámetro	6
	Malla	Diámetro alambre (mm) dw	0,3
		Separación (mm) Wm	0,97
		Porosidad	0,8
		Solidez	0,2
		Pérdida (Pa)	10,923
Longitud (m)	0,724		

Capítulo 3. Datos Iniciales

Ventilador	Pérdida total secciones	169,089
	Velocidad salida túnel	18,806
	Presión a vencer (Pa)	385,714
Longitud total túnel (m)		7,254

Es importante destacar, que ante la ausencia de datos sobre las pantallas de panal y malla, se consideró arbitrariamente una de cada una, a fin de acercar los cálculos a las pérdidas de presión ocurridas en la sección de estabilización.

Adicionalmente, se entregan parámetros importantes del diseño, como lo son: la presión a vencer (385,714 Pa), el caudal (51192 m³/min) y la curva de construcción del cono de contracción, que se muestra en la gráfica 3.1.

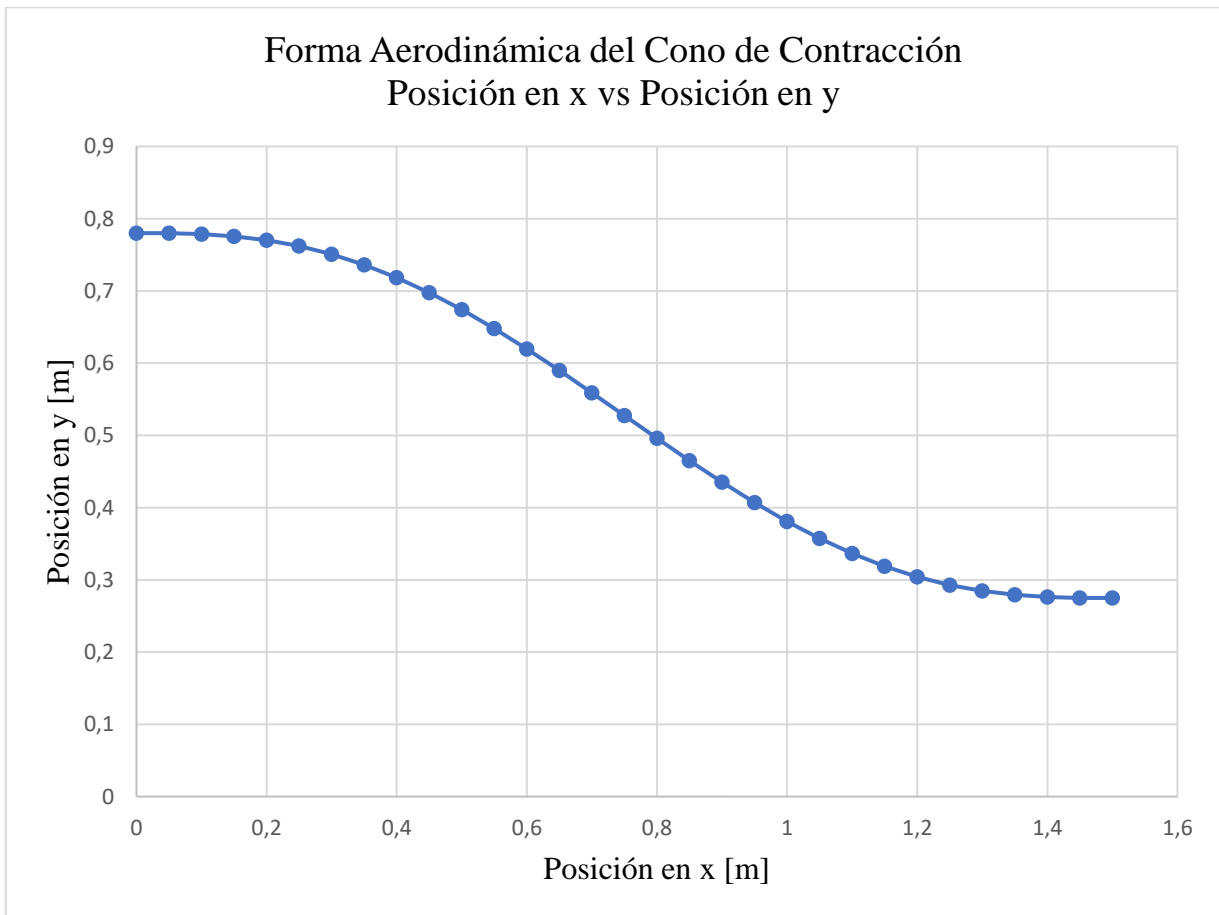


Figura 3.2: Gráfica de curva cono de contracción.
Elaboración Propia.

3.1.5. Geometría del diseño analítico

Se presenta gráficamente en la figura 3.2 y figura 3,3, el modelo diseñado en un dibujo en 2 y 3 dimensiones respectivamente, realizado en el software Autodesk Inventor.

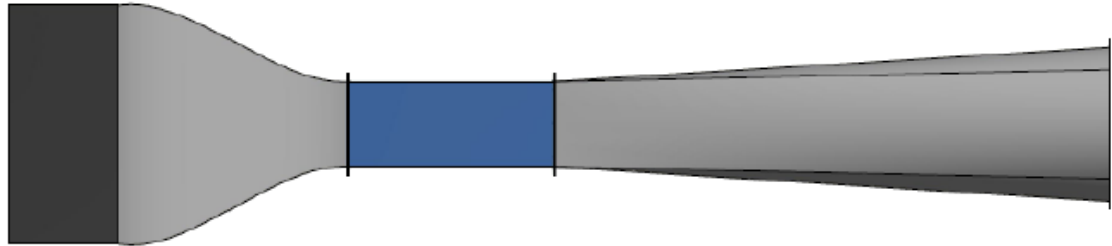


Figura 3.3: Modelo en 2D del resultado del diseño analítico. (6)

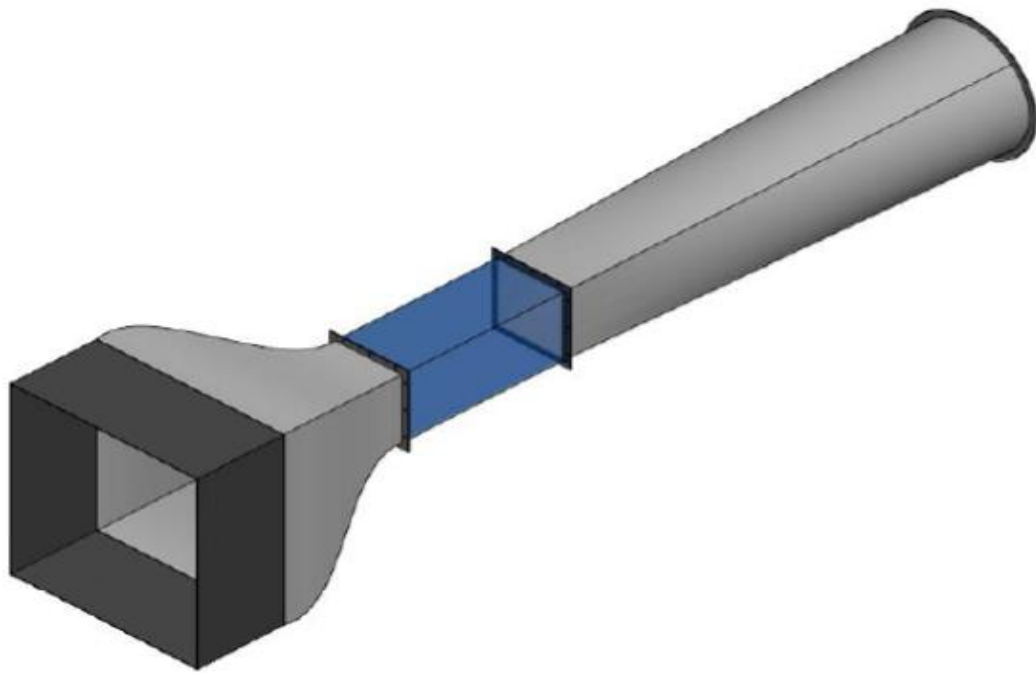


Figura 3.4: Modelo en 3D del resultado del diseño analítico. (6)

En Anexo 5 se presenta la planimetría del modelo teórico, realizada por Javier Iturriaga. Ésta, como se verá más adelante, no presentará modificaciones, y por ello, se entrega como complemento de este trabajo de validación.

CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN 2D

4.1. GEOMETRÍA

Para poder realizar las simulaciones computacionales, en primer lugar, se debe contar con una geometría adecuada del modelo en estudio. En este caso será una simplificación en 2 dimensiones del túnel de viento mostrado en el capítulo 3. El diseño se realizó enteramente en el complemento de dibujo de Ansys, Design Modeler, importando un documento de texto con los puntos de coordenadas espaciales que posteriormente se unirán para dar forma a la geometría deseada. Esta geometría se muestra en la figura 4.1.

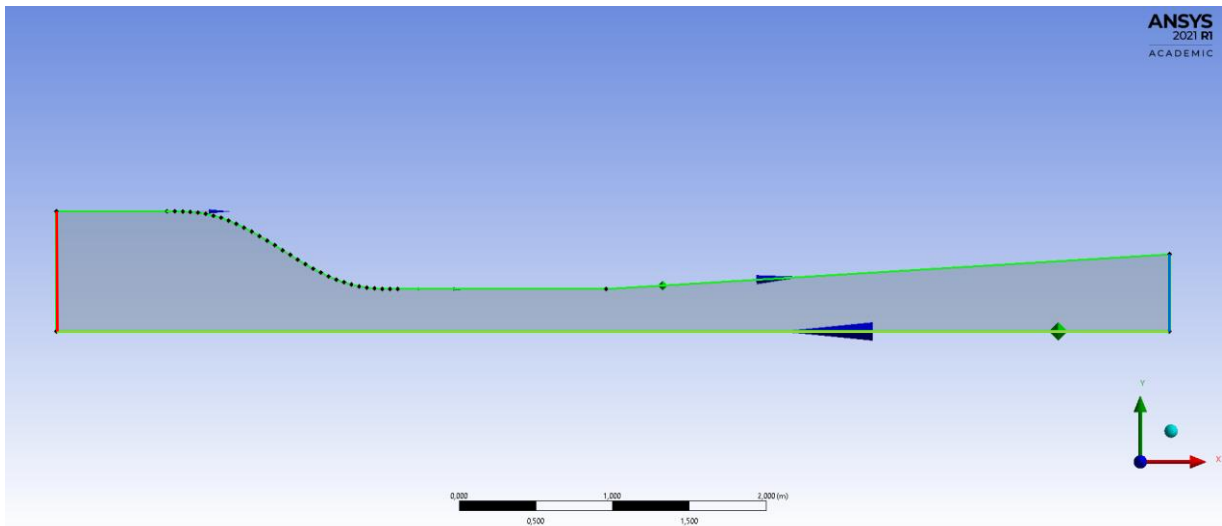


Figura 4.1: Geometría del túnel de viento en 2 dimensiones.
Elaboración Propia.

La geometría fue modelada a partir de un único cuerpo, uniendo de izquierda a derecha la cámara de estabilización, cono de contracción, cámara de pruebas y difusor. También en este sentido circulará el aire.

En esta etapa, además, se definieron las zonas relevantes que servirán para establecer las condiciones de borde del modelo. Se muestran en color rojo, azul, amarillo y verde, la entrada del aire, salida de aire, paredes del túnel y una línea de simetría respectivamente. La superficie gris representa el fluido.

Es importante destacar la utilización de simetrías al momento de modelar la geometría. Esto permite ahorrar recursos computacionales al considerar en los cálculos sólo una mitad del túnel y no tener que evaluar las ecuaciones innecesariamente en ambos lados, sabiendo que las condiciones de flujo se reflejarán a partir de dicho eje de simetría.

4.2. MALLA

La definición de la malla permitirá discretizar la geometría en múltiples elementos más pequeños, sobre los cuales se integrarán las ecuaciones de movimiento. Para tal propósito, en el complemento Meshing de Ansys, se divide la geometría en 33.775 elementos en forma de cuadriláteros con 35.152 nodos.

Se cuidó formar una malla ordenada con líneas paralelas de 25 elementos por lado que crezcan en tamaño a razón de 100:1, desde la línea de simetría hacia las paredes del túnel en donde se desea estudiar el crecimiento de la capa límite. Esta disposición, además de especializar el estudio del comportamiento del flujo en los alrededores cercanos a las paredes del túnel, facilita la interacción entre elementos, lo que finalmente se traduce en resultados más precisos.

En la figura 4.2, se muestra gráficamente la malla del modelo en 2 dimensiones.

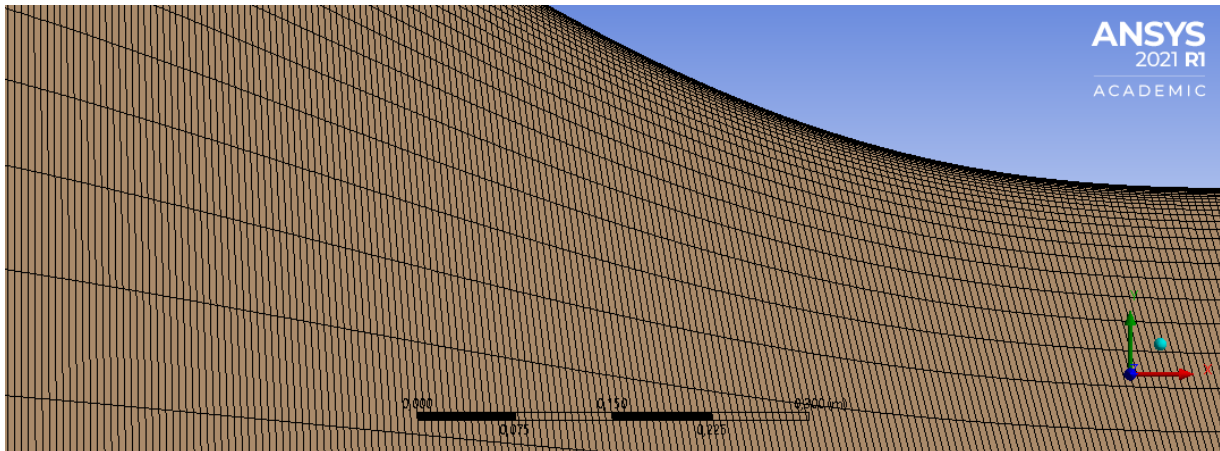


Figura 4.2: Malla del túnel de viento en 2D.
Elaboración Propia.

4.3. CONDICIONES DE BORDE

Desde este punto en adelante, se desarrolla la simulación y su parametrización en Ansys FLUENT.

En primer lugar, se debe tener claro conocimiento de la acción del ventilador, encargado de succionar aire desde el exterior del túnel, pasarlo por él y finalmente expulsarlo hacia el exterior. Este fenómeno de succión se traduce en una diferencia de presiones entre la entrada y salida del aire, lo que en consecuencia genera el movimiento de la masa de aire. De esta misma forma se simula el flujo en FLUENT. Se establece en la entrada una condición de presión atmosférica (101.325 Pa) a 20°C, mientras que en la salida se considera la diferencia de presión generada

Capítulo 4. Simulación 2D

por el ventilador. Este valor es parte de los datos entregados en el capítulo 3, con una presión a vencer por el ventilador de 385,714 Pa. Cabe destacar que para obtener dicho valor fueron consideradas 2 pantallas en la cámara de estabilización que no es posible simular en un estudio 2D, por lo que las pérdidas ocasionadas por dichos elementos son despreciadas, obteniéndose una diferencia de presiones de 374,791 Pa. Con este valor, se establece en la salida una presión de 100.950,209 Pa a la misma temperatura de entrada.

En seguida, se debe considerar el modelo de turbulencia empleado para la simulación, que establece la cantidad de turbulencia transportada en la entrada y salida del túnel. FLUENT ofrece 3 métodos de definición de parámetros en términos de cantidades convenientes, que contemplan intensidad de turbulencia junto con relación de viscosidad turbulenta, diámetro hidráulico o escala de longitud de turbulencia. Por simplicidad se escoge combinar intensidad de turbulencia y diámetro hidráulico.

A partir de la ecuación 11, se determina la intensidad de turbulencia en la entrada y salida del túnel, la que con valores de Número de Reynolds iguales a 624.213,699 y 1.288.082,192 respectivamente, resulta en 3,02% en la entrada y 2,76% en la salida de túnel. Estos cálculos se pueden revisar en Anexo 1. El diámetro hidráulico en ambos casos, con una entrada cuadrada y salida circular, se corresponderán con L y D, es decir, valores de 1,56 m y 1 m respectivamente.

En la Figura 4.3 se muestra la parametrización descrita para entrada y salida de aire en el túnel, con las condiciones de borde inlet-pressure y outlet-pressure.

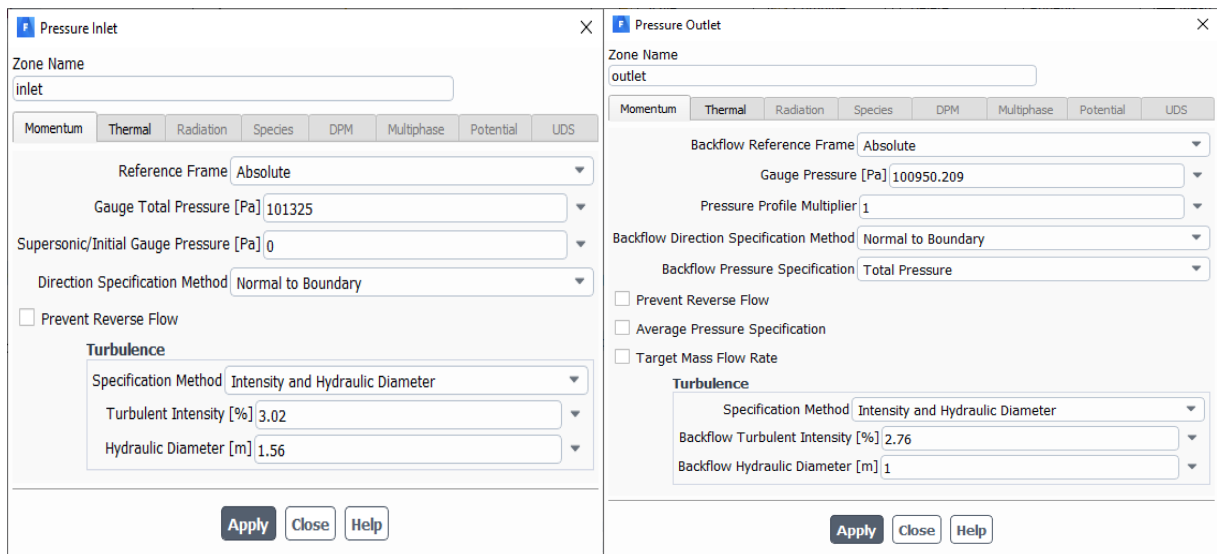


Figura 4.3: Condiciones de borde en entrada y salida del túnel de viento en 2D.

Elaboración Propia.

Además, para este estudio es considerada la aceleración de gravedad, con un valor de $9,81 \text{ m/s}^2$, se establece que todo el dominio la geometría será fluido, se aplica una condición de no deslizamiento en la pared del túnel y se designa la condición de simetría en el otro extremo.

Una vez definidas estas condiciones de borde se procede a inicializar el cálculo y simular el modelo de forma transiente.

4.4. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN 2D

El resultado de la simulación del túnel en 2 dimensiones muestra un flujo sumamente ordenado y laminar en la zona de pruebas. Esto se observa a primera vista con las líneas de corriente presentadas en la figura 4.4, que muestra el movimiento del aire a través del túnel y permitiría detectar zonas de flujo turbulento de forma gráfica en caso de existir.

Estas líneas, si bien se ven concentradas en el borde superior del túnel y más separadas a medida que se alejan, esto obedece únicamente al refinamiento de la malla en dicha zona y no a un aumento de las velocidades del flujo. De la misma forma, las líneas se contraen en la zona central de la geometría, correspondiente a la cámara de pruebas, lo que se produce solamente por una disminución de la sección.

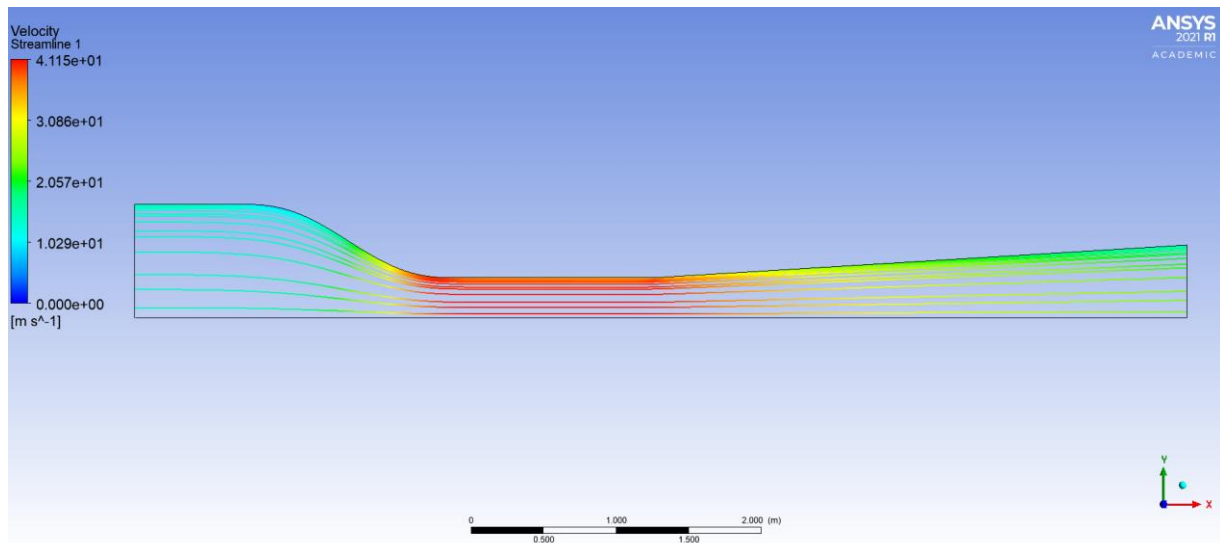


Figura 4.4: Líneas de corriente de la geometría en 2D.
Elaboración Propia.

Los diferentes colores corresponden a diferencias en la velocidad del flujo, siendo la zona roja en donde se genera la mayor velocidad y las zonas azules las de menores velocidades. Esto se aprecia en la figura 4.5, en que se presentan 25 contornos de velocidades resultantes de la simulación computacional.

Capítulo 4. Simulación 2D

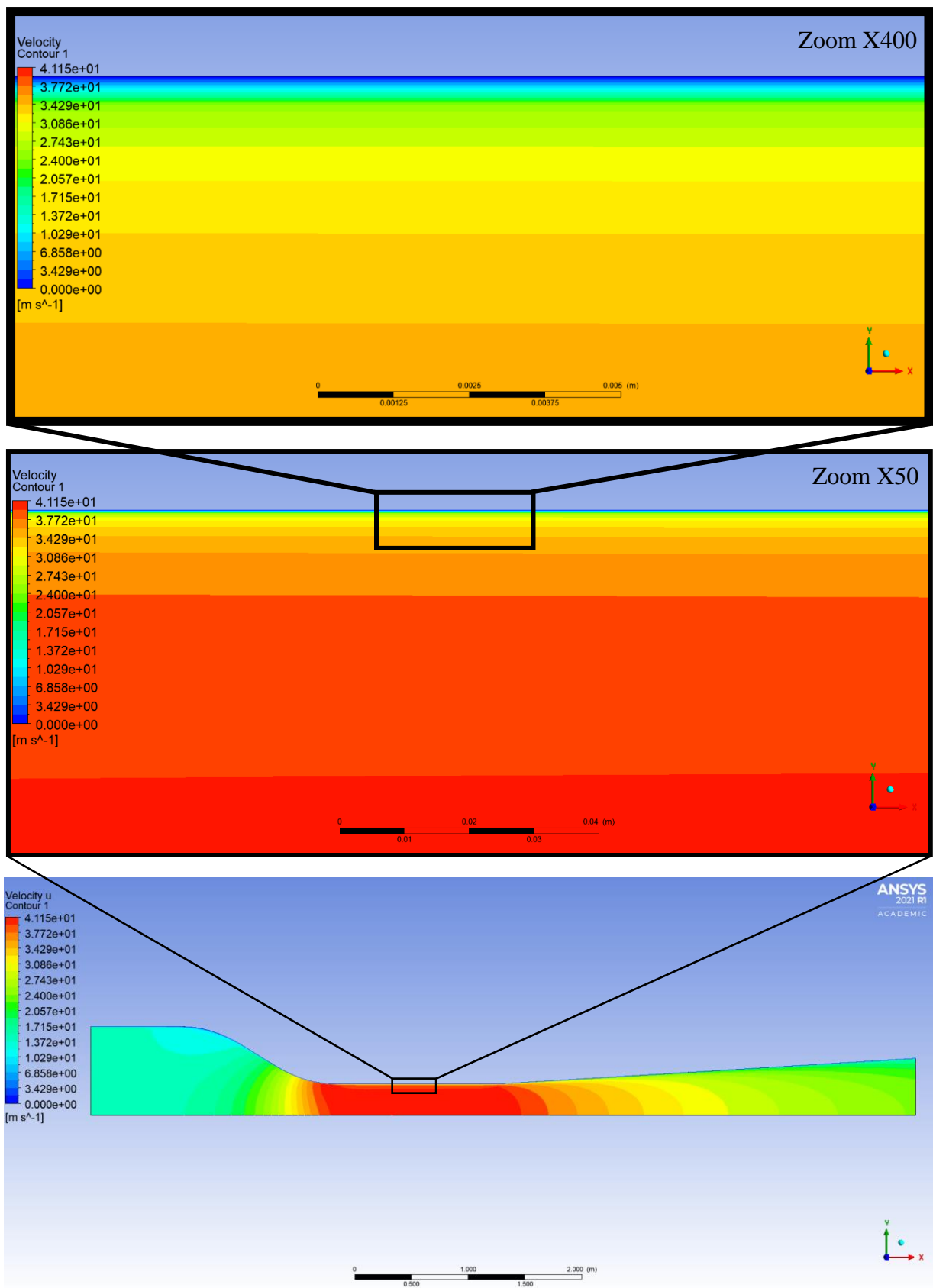


Figura 4.5: Contornos de velocidad de la geometría en 2D.
Elaboración Propia.

Capítulo 4. Simulación 2D

La mayor velocidad llega a 41,15 m/s en el centro de la cámara de pruebas, mientras que la menor apreciable a simple vista se produce cercano a la pared en la entrada al cono de contracción. Sin embargo, esta disminución de la velocidad en las cercanías a la pared se produce a lo largo de toda la geometría, incluso en la cámara de pruebas. Esto se muestra en un doble zoom X50 y X400 realizado sobre la pared del túnel en el centro de la cámara de pruebas, donde se visualizan capas de colores que demuestran el aumento progresivo de velocidad a medida que se aleja el flujo hacia el eje de simetría.

Para estudiar correctamente el crecimiento de la capa límite a lo largo del túnel, en la figura 4.6, se trazan 11 líneas auxiliares perpendiculares al flujo de aire, destacadas en color amarillo y dispuestas en la entrada, salida y centro de cada una de las 4 secciones que componen la geometría en 2 dimensiones, exceptuando la cámara de pruebas, donde, para precisar el análisis, se trazan 5 líneas equidistantes (E, F, G, H e I).

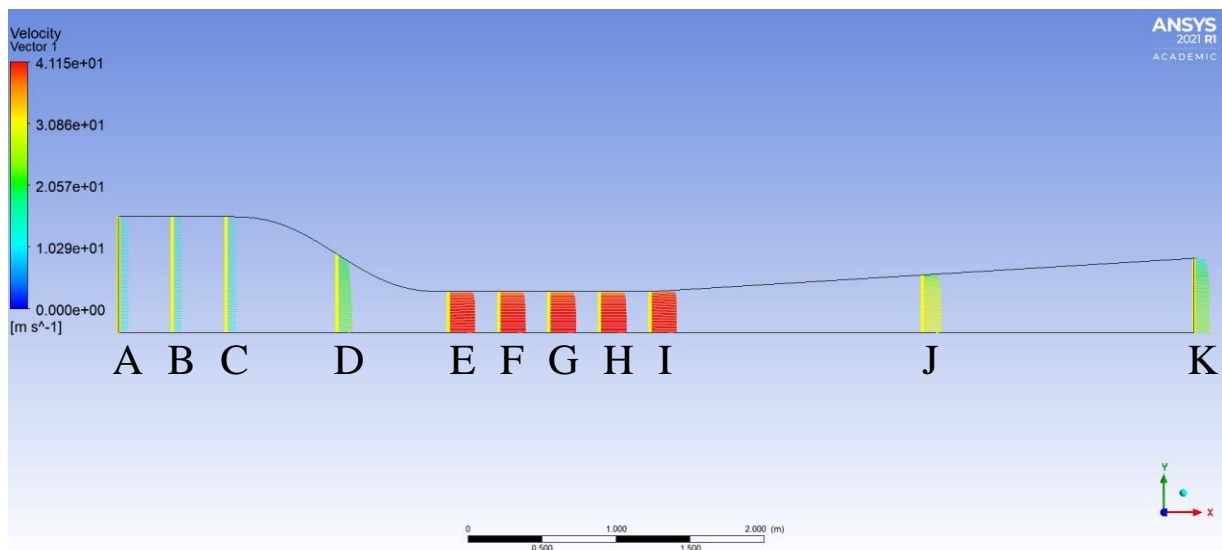


Figura 4.6: Vectores de velocidad sobre líneas auxiliares de la geometría en 2D.
Elaboración Propia.

Sobre cada línea se trazan vectores de velocidad, los que se construyen en concordancia de color y tamaño respecto de la magnitud de dicho parámetro en cada sector. Así mismo es posible apreciar vectores más cortos en las cercanías a la pared del túnel y de mayor longitud en el borde inferior de simetría, dibujando la forma característica de la capa límite hasta llegar a un flujo desarrollado. Para comparar de mejor manera este fenómeno en la cámara de pruebas, se extraen valores de posición vertical y velocidad en 50 puntos sobre cada línea que permiten construir el gráfico de la figura 4.7 y 4.8. Los valores extraídos de Ansys FLUENT, resultado de la simulación, que se emplean para la confección de éstos se presentan en Anexo 2.

A partir de estos mismos valores se calcula el tamaño de la capa límite, considerando un flujo desarrollado al 95% de la velocidad máxima alcanzada por el fluido en cada sección de

medición. Como se aprecia en la gráfica “Velocidad en u vs Posición en y”, el comportamiento del centro de la cámara de pruebas no está sometido a variaciones considerables, apreciándose leves diferencias de velocidad en la dirección del eje x hacia la entrada y salida de ésta, donde se produce la interacción con el cono de contracción y el difusor respectivamente. El flujo se considerará desarrollado en estos puntos (E e I) a partir de 11 mm despegados desde la pared del túnel, mientras que en el centro (F, G y H) será a partir de 33,67 mm. Visto de otra forma, al observar la gráfica, el flujo será desarrollado por sobre los 0,24 m en el eje vertical.

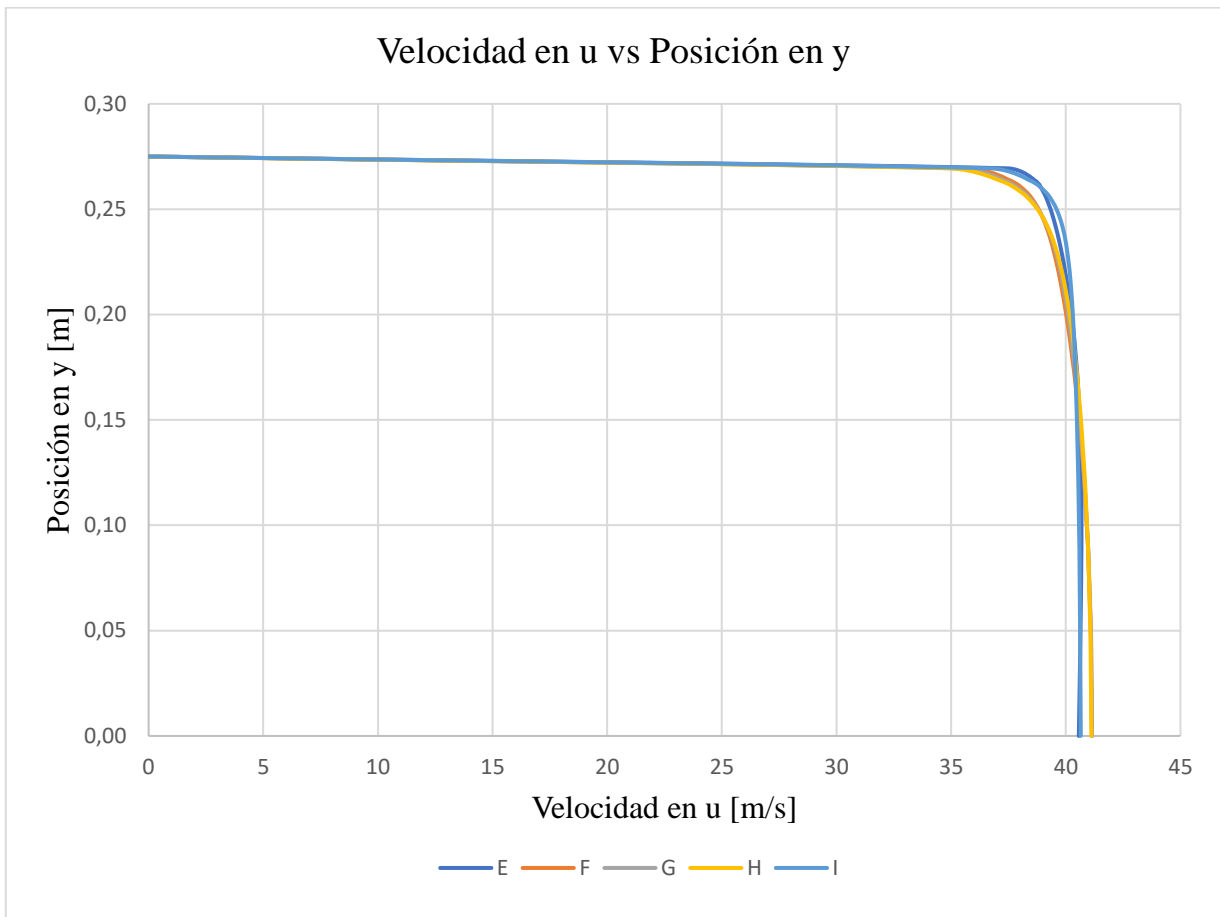


Figura 4.7: Gráfica Velocidad en u vs Posición en y de la geometría en 2D.
Elaboración Propia.

Cabe destacar, que si bien se aprecia más desarrollado el flujo en E e I, las velocidades alcanzadas en estas zonas son inferiores a las obtenidas en el interior de la cámara de pruebas, donde se incrementa el flujo entre 0,46 y 0,58 m/s aproximadamente.

En seguida se proporciona la gráfica “Velocidad en v vs Posición en y”, que muestra la magnitud de la velocidad en el movimiento vertical del flujo. En ésta, se puede apreciar que en E el flujo tiene velocidad negativa, lo que no significa que vaya en sentido contrario al movimiento del fluido, sino que se direcciona hacia el eje de simetría del túnel, con una velocidad máxima de

Capítulo 4. Simulación 2D

0,5988 m/s. Caso contrario ocurre en I, donde todo el fluido tiene velocidad positiva, con un aumento lineal desde el centro del túnel hacia la pared, alcanzando un máximo de 1,0579 m/s. Por otro lado, en los 3 puntos de medición al centro de la cámara de pruebas, se aprecia una línea prácticamente vertical sobre el eje de las ordenadas ($x = 0$), con desviaciones mínimas que se encuentran entre -0,0171 y 0,0131 m/s.

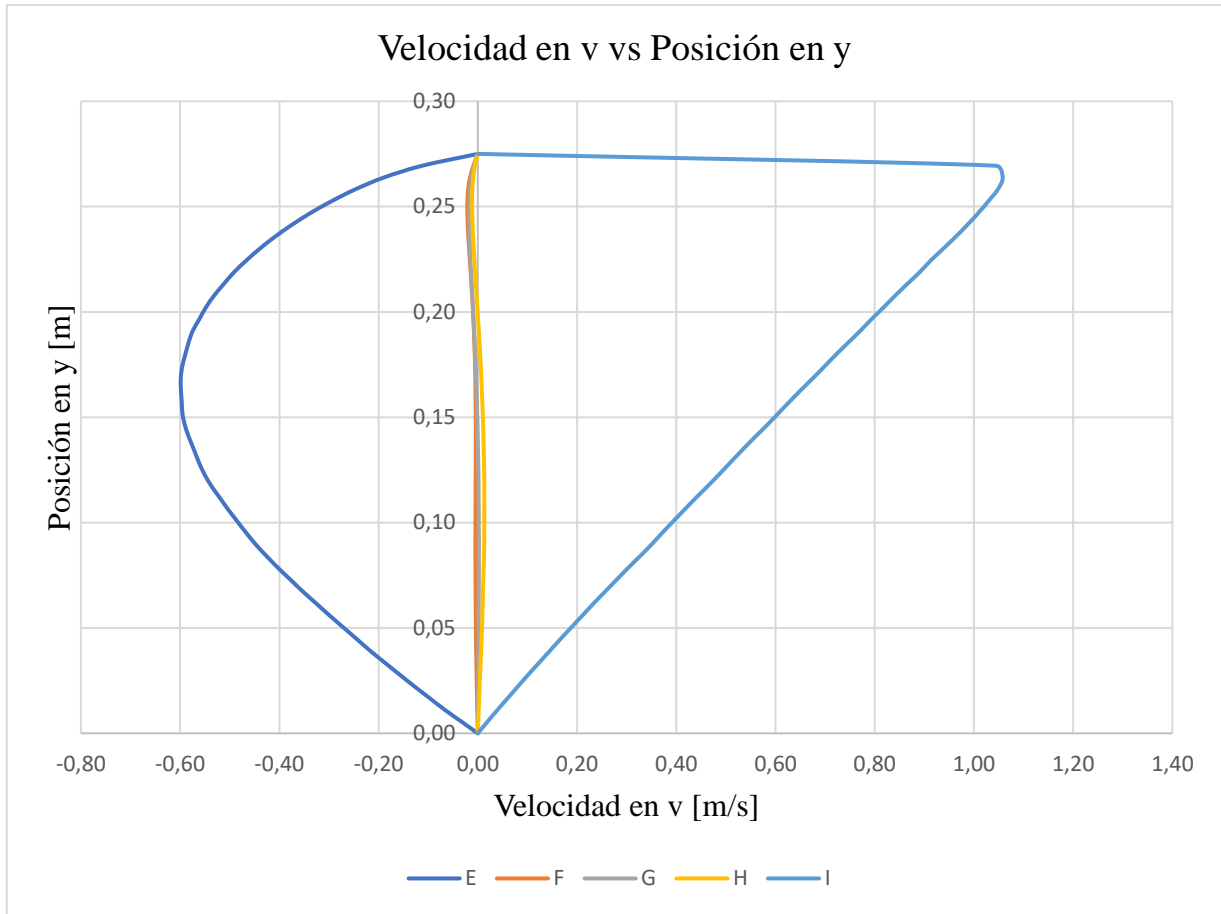


Figura 4.8: Gráfica Velocidad en v vs Posición en y de la geometría en 2D.
Elaboración Propia.

CAPÍTULO 5. SIMULACIÓN 3D

5.1 GEOMETRÍA

Para la construcción de la geometría en 3 dimensiones se recurre al software Autodesk Inventor, en el cual se modela el túnel. Para esto se considera únicamente el espacio interior, es decir, el dominio fluido que ocupará el aire y no las paredes del túnel.

La geometría se consigue mediante la solvatación entre planos. Cada plano contiene un boceto de una sección de área transversal del túnel con la forma y medidas requeridas, y se separan según las longitudes de cada sección del túnel. En la figura 5.1, se muestran dichos bocetos que auxilian la construcción del modelo.

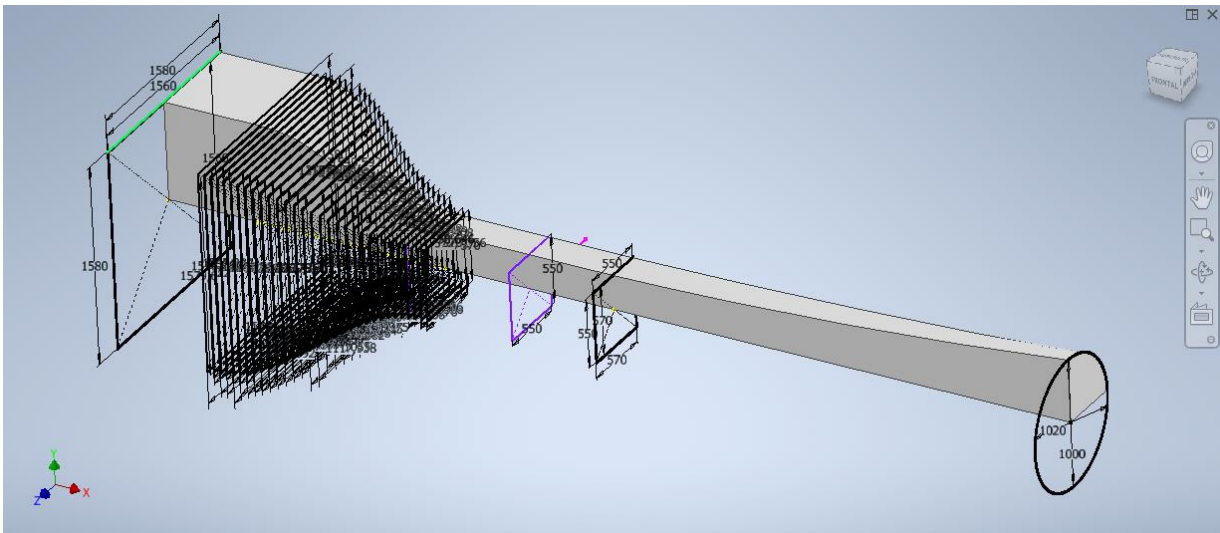


Figura 5.1: 1/4 del dominio del fluido interior del túnel en 3D y planos de diseño.
Elaboración Propia.

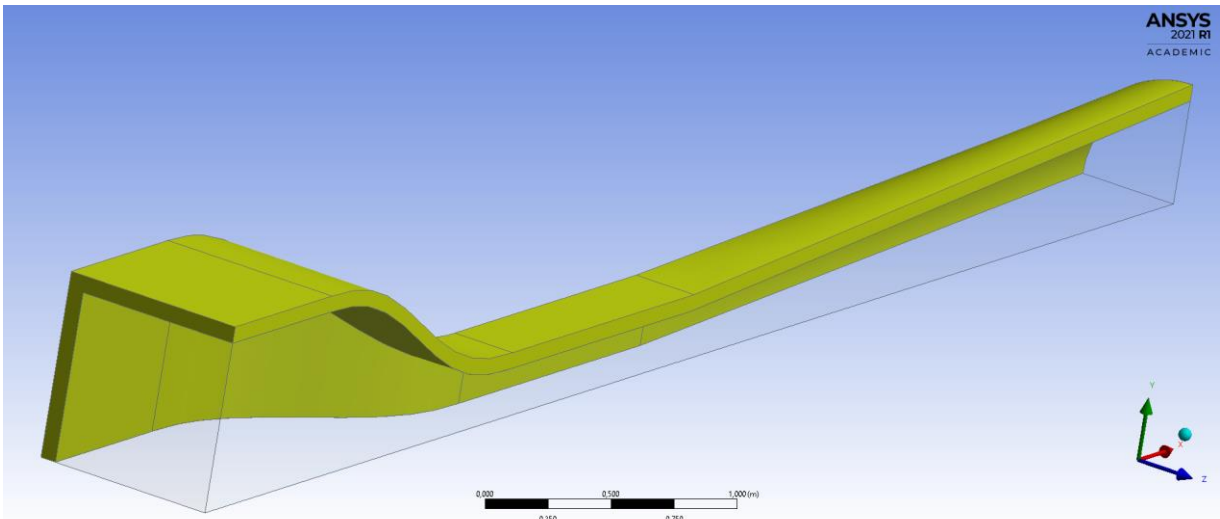
En esta ocasión, al igual que en el caso del diseño en 2 dimensiones, se recurre una región de simetría de la figura, considerando sólo un cuarto de esta, a fin de optimizar el uso de recursos computacionales. Además, como se verá más adelante, el número de elementos y nodos de la malla serán una limitante, lo que se alivia con esta consideración.

Cabe destacar que inicialmente se buscó crear esta geometría en una sola pieza, sin embargo, luego de un proceso iterativo de mallado y simulaciones sucesivas, se opta por separar la capa exterior del túnel del resto interior. Esta decisión de diseño de la geometría 3D permite ordenar la malla con un refinamiento controlado en la capa cercana a las paredes del túnel, en donde se desea estudiar el crecimiento de la capa límite.

Para esto se considera crear una capa del 25% de espesor de la cámara de pruebas desde la línea de simetría, correspondiente a 68,75 mm. Este valor se mantiene constante a lo largo del túnel en sus 4 caras laterales y fue obtenido por la experiencia de simulaciones previas. Si bien la

geometría se construye en 2 piezas, luego son ensambladas y declaradas como un solo cuerpo fluido, ya que la interacción del flujo interior del túnel no requiere de paredes entre éstas.

Posteriormente, se importa dicho modelo en Ansys y se valida en su complemento Design Modeler para proceder a mallarlo. Esto se muestra en la figura 5.2, destacando en color verde la capa más cercana a la pared del túnel.



*Figura 5.2: Capa exterior de geometría en 3D.
Elaboración Propia*

5.2. MALLA

Una vez cargada la geometría en Ansys se procede a utilizar Meshing, donde, en primer lugar, se establecen las regiones de simetría, tanto en el eje coordenado “z” como “y”, que permiten programar en el software la existencia de los otros 3 cuartos del cuerpo fluido a simular. Dichas simetrías se aprecian en la figura 5.3.

Similar al caso en 2D, se confecciona una malla que propicie un refinamiento en los bordes cercanos a las paredes del túnel, dejando los elementos de mayor tamaño cercanos al plano de simetría. Se debe cuidar, que al agregar una tercera dimensión, existirán bordes rectos que facilitarán el crecimiento de la capa límite y con ello la aparición de turbulencias. Estas zonas serán las más finas y donde se centrará gran parte de la atención del estudio.

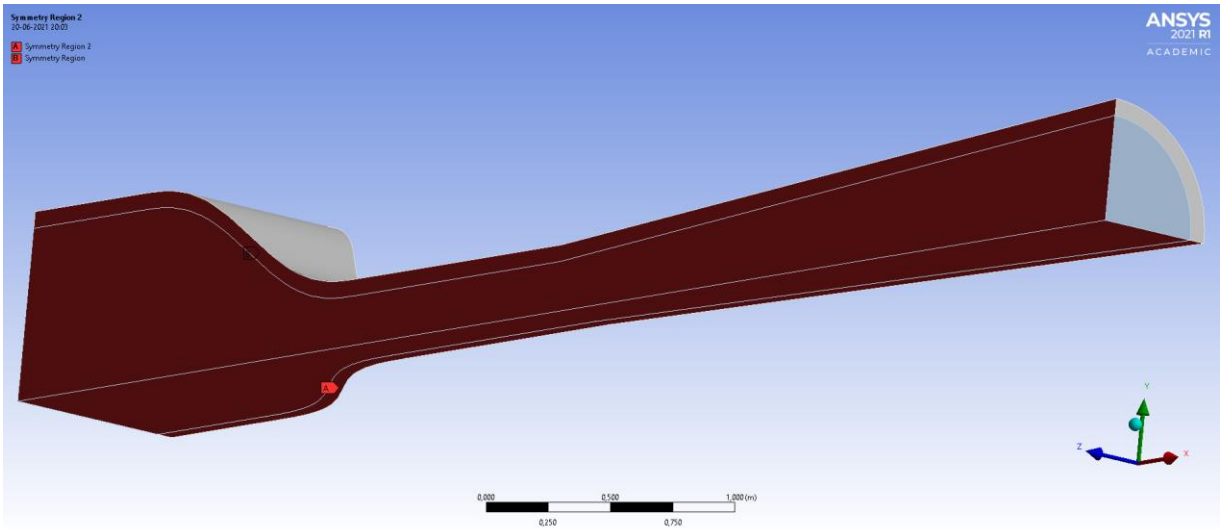


Figura 5.3: Regiones de simetría en geometría en 3D.
Elaboración Propia.

Cada parte de la geometría será mallada por separado. Para la capa exterior, presentada en la figura 5.4, se configura una malla ordenada con el comando “Method-MultiZone” basada en múltiples hexaedros que disminuyen en espesor a medida que se acercan hacia la pared del túnel, con un refinamiento a razón de 1:10 de 10 elementos. En las caras exteriores de esta pieza se emplea un “Face Sizing” que genera elementos de 16,1 mm, creciendo hasta 20 mm de ancho en la cara opuesta. Por último, con un “Face Mesching” se ordena la cara por donde ingresa el fluido.

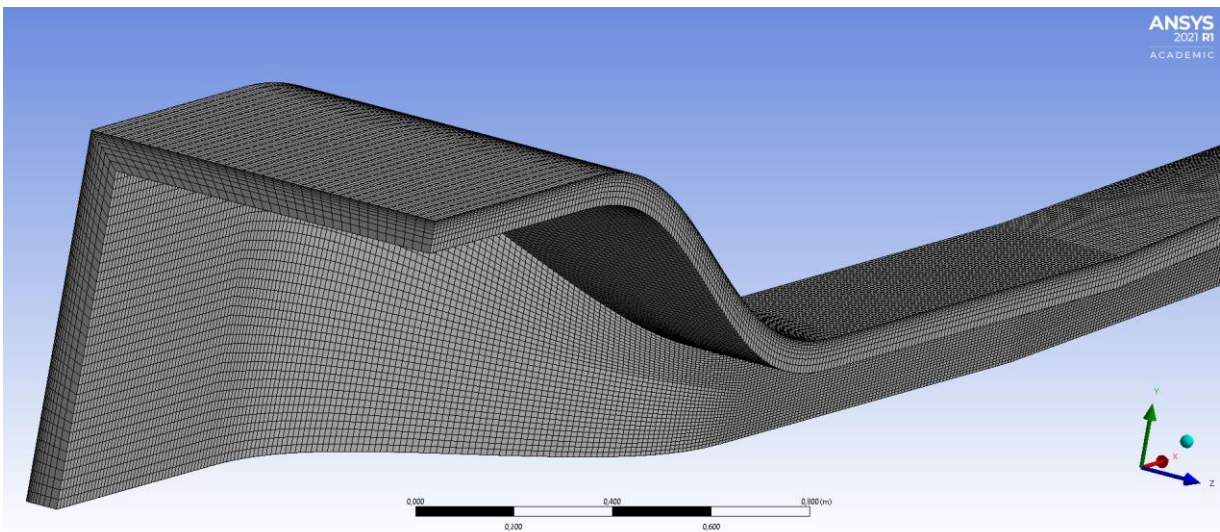


Figura 5.4: Malla en la capa exterior de la geometría en 3D.
Elaboración Propia.

La sección interior de la geometría se divide en elementos tetrahédricos que se adaptan de mejor forma a los cambios de sección del túnel, cuidando su interacción con los elementos de la capa exterior. Al igual que en ésta, se busca refinar la malla hacia las cercanías de la pared del túnel

y se define el borde central del fluido con un “Edge Sizing” que crea elementos de 50 mm de ancho. La malla completa se muestra en la figura 5.5.

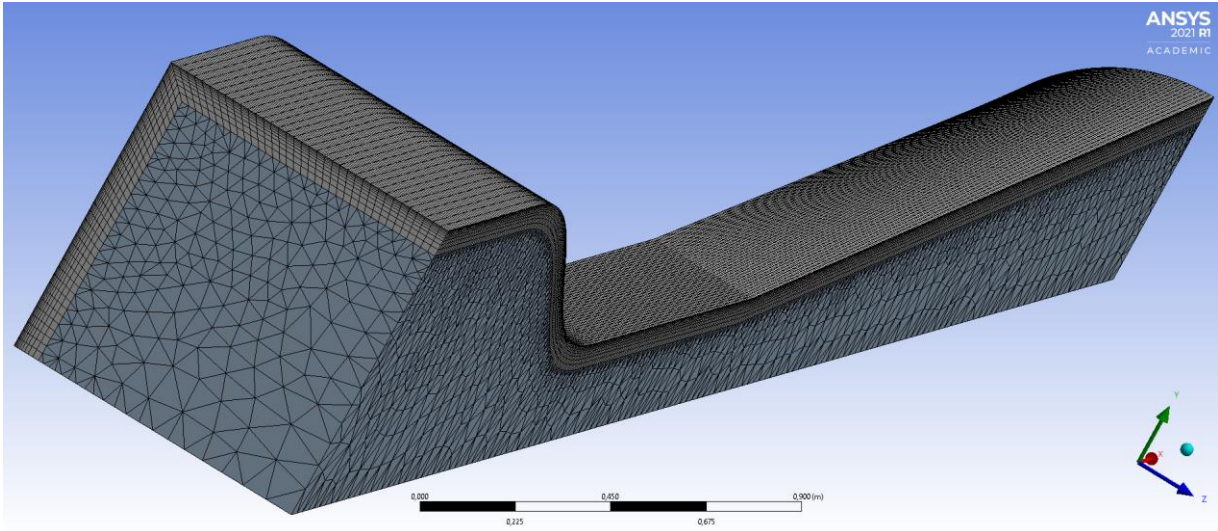


Figura 5.5: Malla en geometría completa en 3D.
Elaboración Propia.

Para la construcción de esta malla se emplean 511.613 elementos con 1.677.226 nodos, y si bien sería conveniente refinar aún más la malla, los límites de la versión académica de Ansys FLUENT no lo permiten, ofreciendo un máximo de 512.000 elementos. Por esta misma razón se justifica el tamaño de la malla en la cara exterior del túnel y demás divisiones, siendo escogido el mayor valor admisible. Así mismo, como se mencionó en el punto 5.1, se ensayaron anteriormente variadas configuraciones de malla, que decantaron en la selección de ésta como la mejor alternativa.

5.3. CONDICIONES DE BORDE

Para el estudio en 3 dimensiones, se emplean los mismos valores del caso anterior, con la parametrización de presiones, temperaturas y turbulencias en la entrada y salida del flujo de aire en el túnel según corresponda, lo que provoca en consecuencia el movimiento del fluido. La única diferencia se evidencia en la cantidad de planos de simetría y caras que representan las paredes interiores del túnel, 2 en cada caso.

5.4. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN 3D

A partir de la simulación realizada al modelo en 3 dimensiones, y al igual que en el caso anterior, se construyen las líneas de corriente en la figura 5.6, y no se aprecian grandes variaciones respecto de éste. El flujo sigue siendo ordenado, sin vórtices y laminar en la cámara de pruebas.

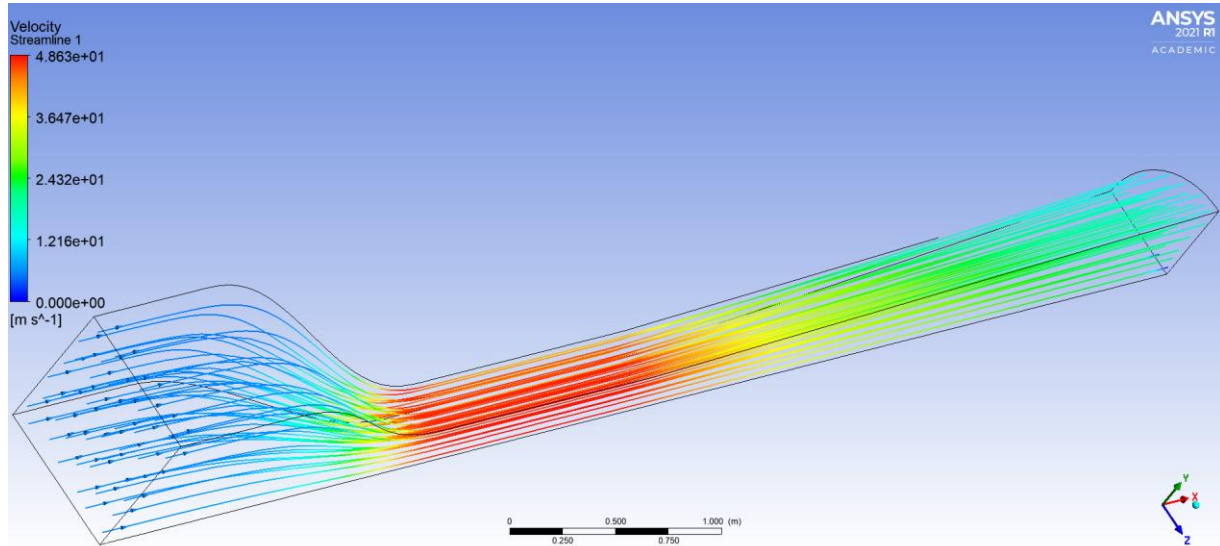


Figura 5.6: Líneas de corriente en geometría en 3D.
Elaboración Propia.

En la figura 5.7, para visualizar el comportamiento del flujo en las capas externas de la geometría 3D, se dibujan los contornos de velocidad en cada cara, resultando las paredes del túnel en azul oscuro que indica la ausencia de movimiento del fluido en dicha zona. Por otro lado, se aprecian 25 contornos de colores en los planos de simetría, que indican la magnitud de la velocidad de flujo. Al igual que en el caso en 2D, se emplea un doble zoom X50 y X400 que permite visualizar de mejor manera el cambio de velocidades en el desarrollo del flujo. La totalidad del centro de la cámara de pruebas se muestra en color rojo, con velocidad máxima que alcanza los 48,63 m/s.

En esta misma imagen se puede apreciar claramente la acción de cada uno de los 4 elementos que componen la geometría 3D, con el ingreso lento del aire en la cámara de estabilización a una velocidad de entre 4,86 y 8,11 m/s, que luego, pasando por el cono de contracción se acelerará hasta el máximo alcanzado en la cámara de pruebas, donde la velocidad no bajará de 44,58 m/s. Por último, el flujo es desacelerado por el difusor, saliendo del sistema a 20,26 m/s.

Capítulo 5. Simulación 3D

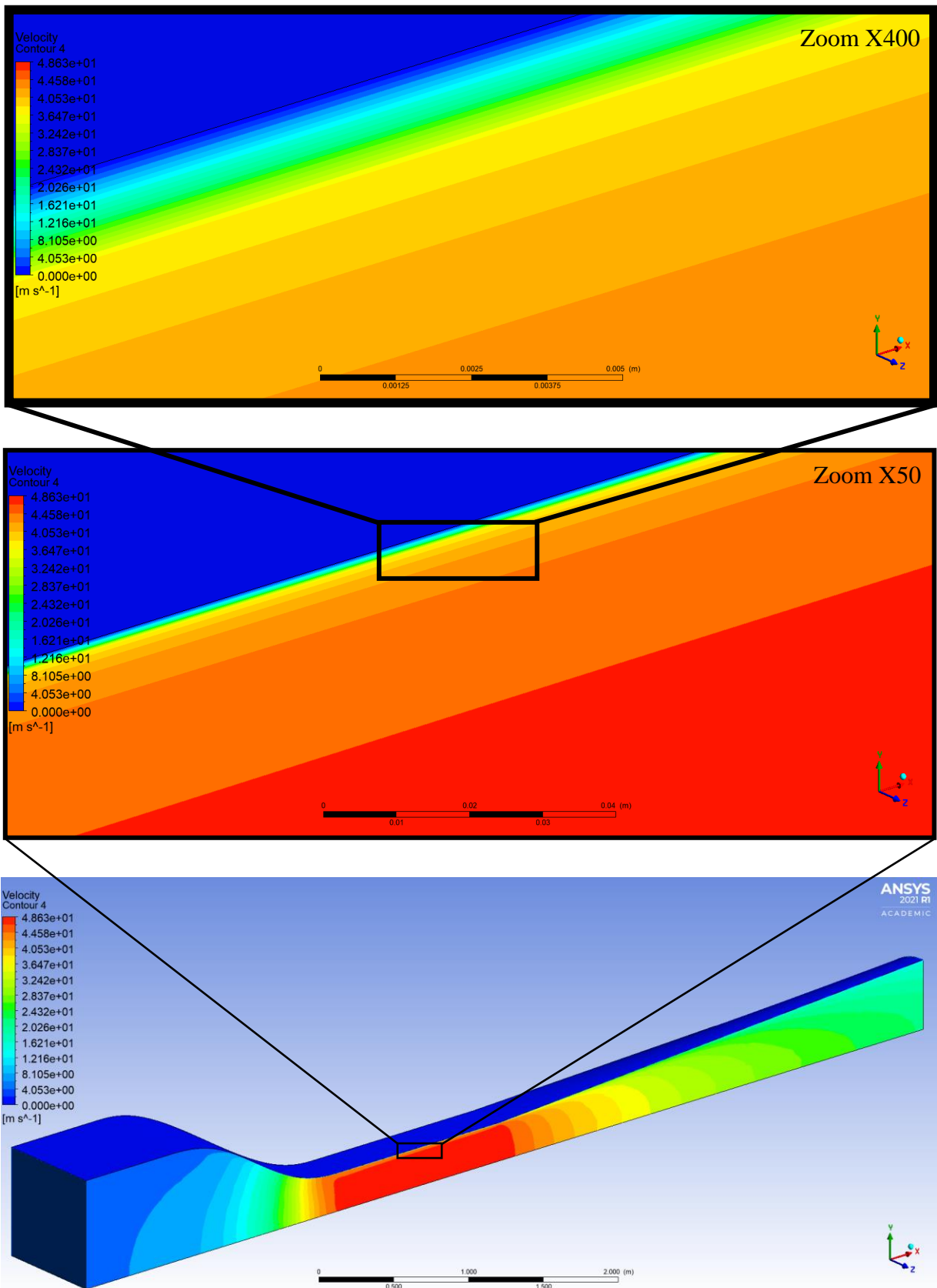


Figura 5.7: Contornos de velocidad en geometría en 3D.
Elaboración Propia.

Capítulo 5. Simulación 3D

Nuevamente se construyen líneas auxiliares a lo largo de la geometría para la toma de datos en dichos sectores, adicionando planos perpendiculares a la geometría en el mismo lugar, que se pueden ver en la figura 5.8.

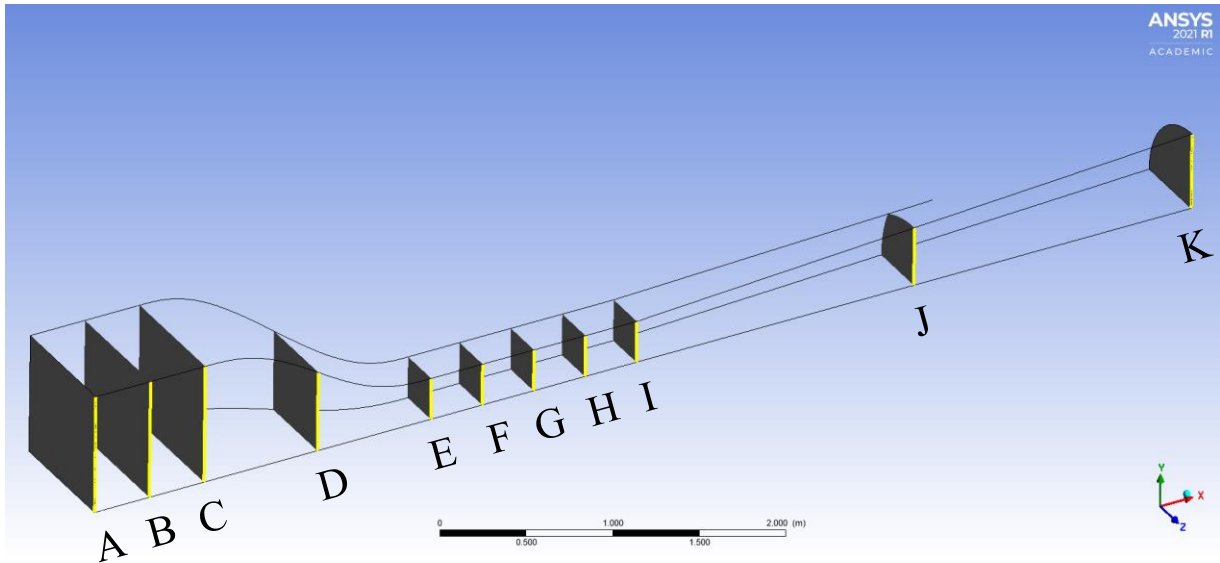


Figura 5.8: Planos y líneas auxiliares en geometría en 3D.
Elaboración Propia.

Con estos planos, se obtienen los contornos de velocidades, mostrados en la figura 5.9 y 5.10, que grafican la magnitud de la velocidad en dicha zona, permitiendo detectar zonas de crecimiento de la capa límite a lo largo del túnel.

Éstas muestras, como se verá más adelante, serán fundamentales para visualizar las diferencias entre los valores obtenidos en las simulaciones en 2 y 3 dimensiones, y a la vez, imprescindibles para la posterior propuesta de modificaciones del túnel.

Capítulo 5. Simulación 3D

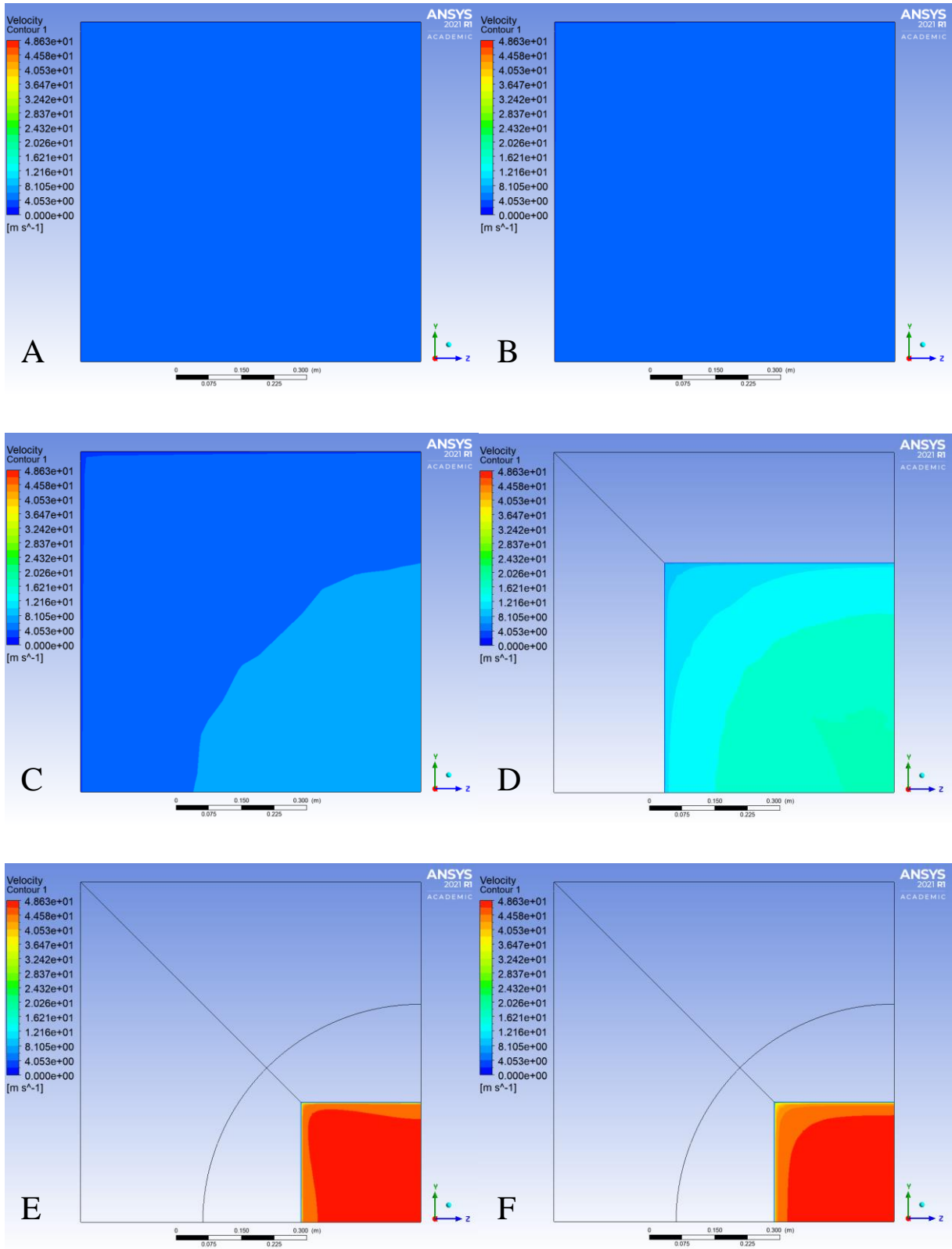


Figura 5.9: Contornos de velocidad en planos A, B, C, D, E y F de geometría en 3D.
Elaboración Propia.

Capítulo 5. Simulación 3D

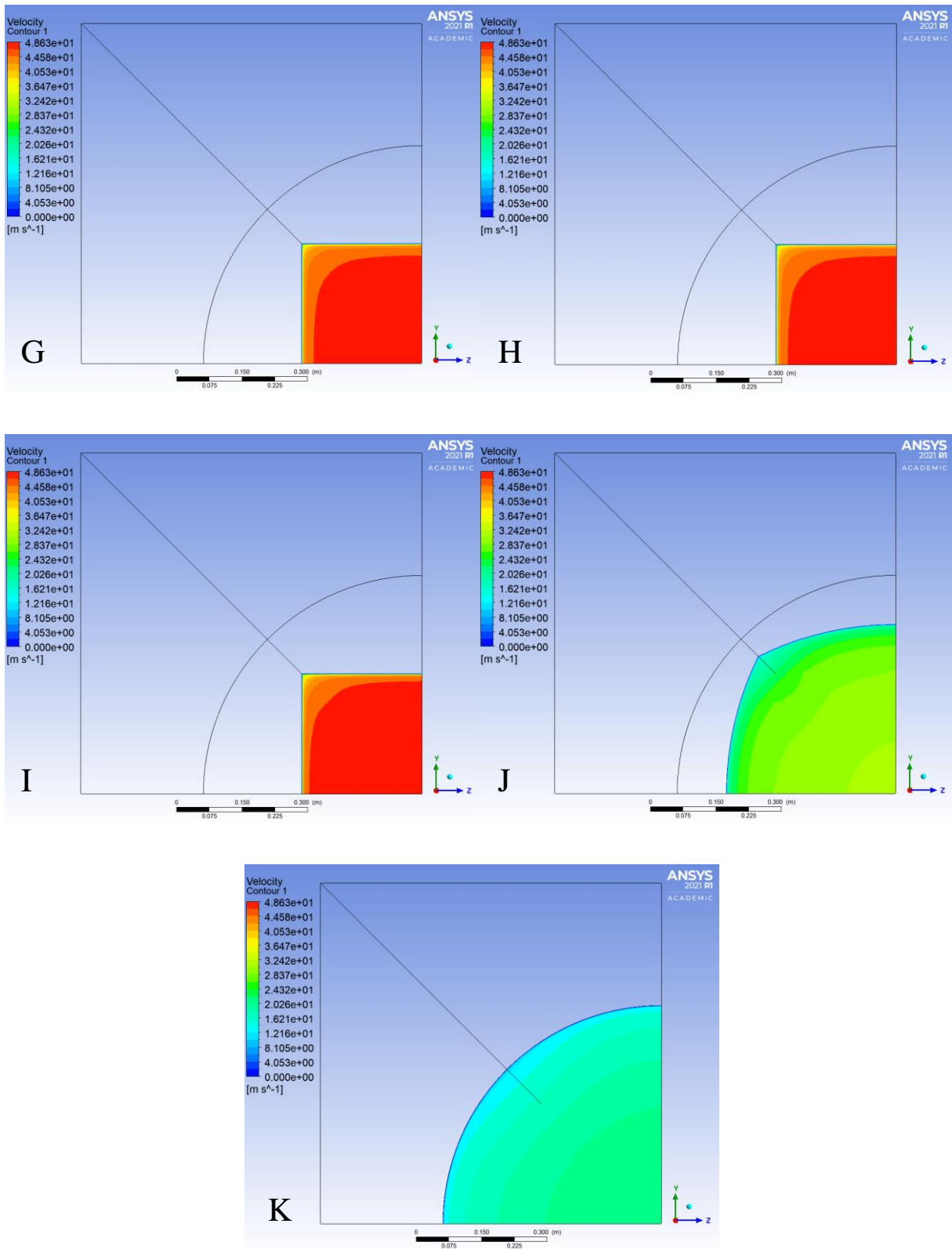


Figura 5.10: Contornos de velocidad en planos G, H, I, J y K de geometría en 3D.
Elaboración Propia.

Capítulo 5. Simulación 3D

En estas imágenes se disponen los ejes de simetría en las aristas inferior y derecha de la vista perpendicular presentada, mientras que la arista superior e izquierda corresponden a las paredes del túnel. Y es justamente en el vértice en que se encuentran ambas paredes en donde se aprecia un mayor crecimiento de la capa límite.

En este mismo sentido, se construye la gráfica de la figura 5.11, en donde se compara velocidad en u con la posición en el eje vertical, formando el perfil de velocidades en E, F, G, H e I, que permiten comparar el desarrollo del flujo en la cámara de pruebas.

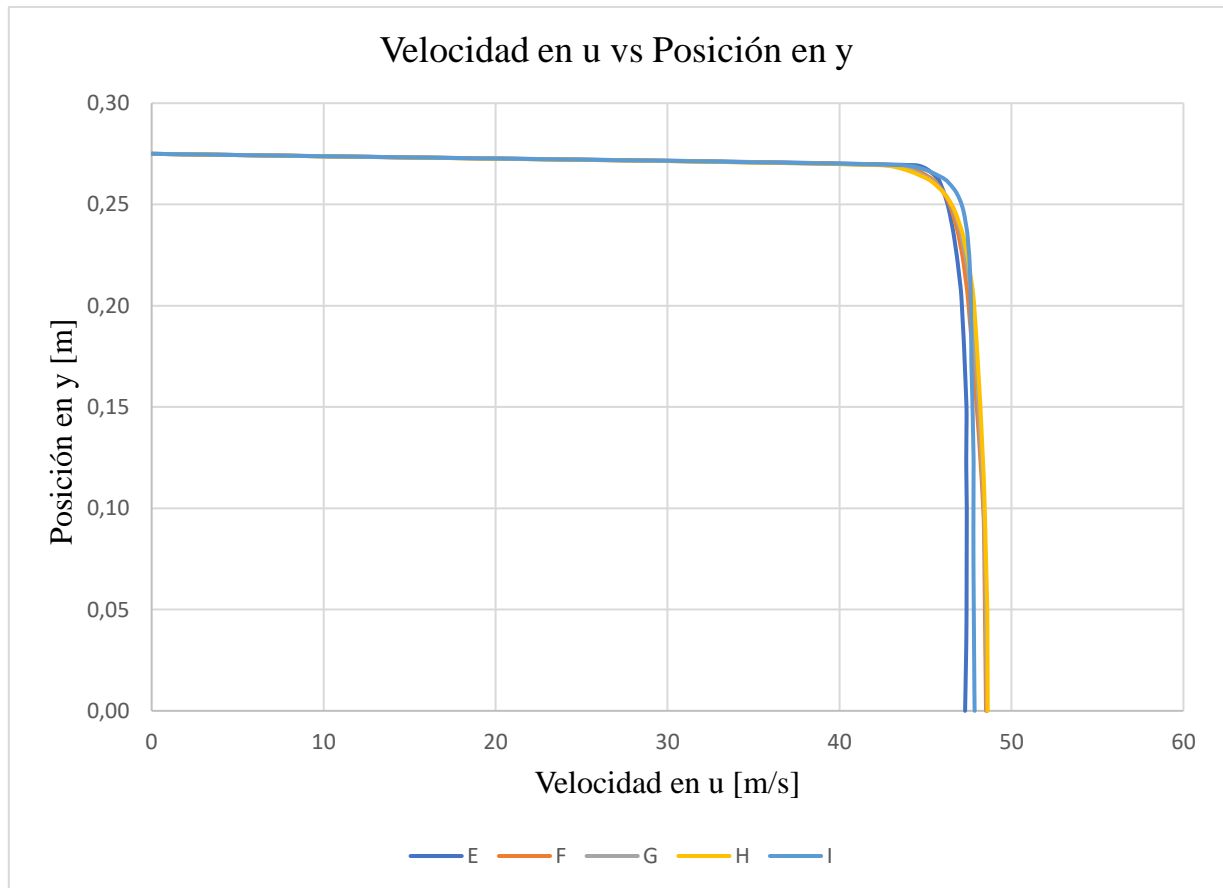


Figura 5.11: Gráfica Velocidad en u vs Posición en y de la geometría en 3D.
Elaboración Propia.

Tal como se presentó en el caso anterior, se construye la gráfica “Velocidad en v vs Posición en y ” de la figura 5.12. Ésta permite observar el movimiento del flujo verticalmente, que en esta ocasión, no muestra variaciones importantes respecto del estudio en 2D, y de igual forma, se aprecian velocidades negativas en E y positivas en I, con valores límites de -0,6068 y 1,2648 m/s. Respecto de la zona media de la cámara de pruebas, en F, G y H, no se evidencian movimientos importantes en este sentido, con un rango cuya amplitud se mantiene entre -0,0078 y 0,0162 m/s.

Capítulo 5. Simulación 3D

Los valores obtenidos de la simulación en 3 dimensiones y con los que se construyeron las gráficas de velocidad vs posición, se adjuntan en Anexo 3.

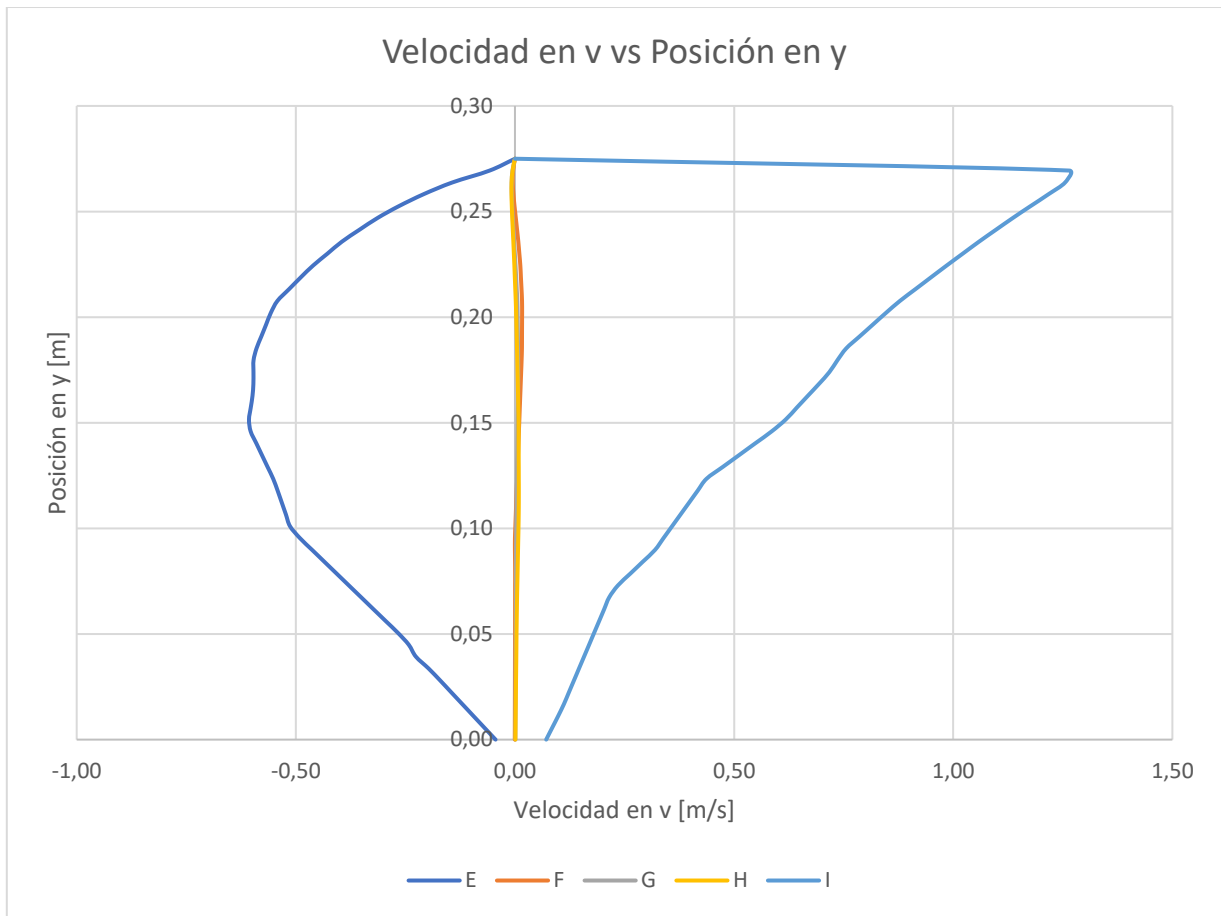


Figura 5.12: Gráfica Velocidad en v vs Posición en y de la geometría en 3D.
Elaboración Propia.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. SIMULACIÓN 2D

El diseño analítico se realiza en base a una metodología de cálculo que involucra una serie de ecuaciones, que buscan dimensionar el túnel de viento en cumplimiento con ciertas características de flujo. La más importante de ellas es lograr un movimiento uniforme y ordenado del fluido en la cámara de pruebas del modelo, es decir, flujo laminar. Esto queda comprobado a partir de la simulación en 2 dimensiones, donde no se aprecia la aparición de vórtices ni zonas de flujo turbulento a lo largo de las líneas de corriente presentadas en la figura 4.4.

Así mismo, se espera obtener zonas de flujo más lento en las cercanías a las paredes del túnel, donde, producto de la acción de roce con la misma, virtualmente se detiene el flujo en la capa más cercana. Por otro lado, la zona central del túnel debiese ser donde se desarrollen las mayores velocidades. Todo esto también queda validado a partir de la figura 4.5. la que muestra la geometría seccionada en contornos de colores que representan la velocidad del fluido en dicha zona. La cámara de pruebas se aprecia en un color rojo intenso donde se desarrolla el flujo más rápido. Este contorno es prácticamente constante en toda la sección, exceptuando las cercanías a la pared donde la diferencia de colores evidencia la existencia de la capa límite y su tamaño.

Como se presenta en la gráfica Velocidad en u vs Posición en y de la figura 4.7, el crecimiento de la capa límite tendrá una magnitud de 33,67 mm desde la pared, dejando un 88,02% (ver Anexo 4) de superficie útil en la cámara de pruebas del modelo 2D. De este mismo cuadro se puede observar diferencias en el desarrollo del flujo en el ingreso y salida de la cámara de pruebas, respecto de su centro, donde los cambios de sección provocan inestabilidades que decantan en diferencias en la magnitud de las velocidades. En dichas zonas, la concentración del flujo minimiza los efectos de capa límite, consiguiendo un flujo desarrollado sólo en el tramo central de la zona de pruebas (F - G - H), donde se mantiene prácticamente constante la velocidad en magnitud y dirección. Esto se aprecia en la figura 4.8, donde se compara la velocidad del flujo en la dirección vertical respecto de la posición de dicho vector en el eje y .

De esta última gráfica, se confirman, además, varios factores esperables en el comportamiento del fluido. Se aprecia que en la salida del flujo del cono de contracción aún se sienten los efectos de estrangulamiento del fluido hacia el centro del túnel, por lo que la velocidad se direcciona hacia este sector. En cambio, en la salida, la acción del difusor permite ampliar el volumen ocupado por el aire, provocando la aparición de la componente vertical en el movimiento del fluido que ocupara dicho espacio moviéndose hacia la pared. Para explicar dicho fenómeno se recurre a los contornos de velocidad en v , mostrados en la figura 6.1, donde las zonas azules indican el movimiento del aire hacia el eje de simetría ($-y$), mientras que los contornos en rojo muestran un movimiento del fluido hacia la pared del túnel ($+y$).

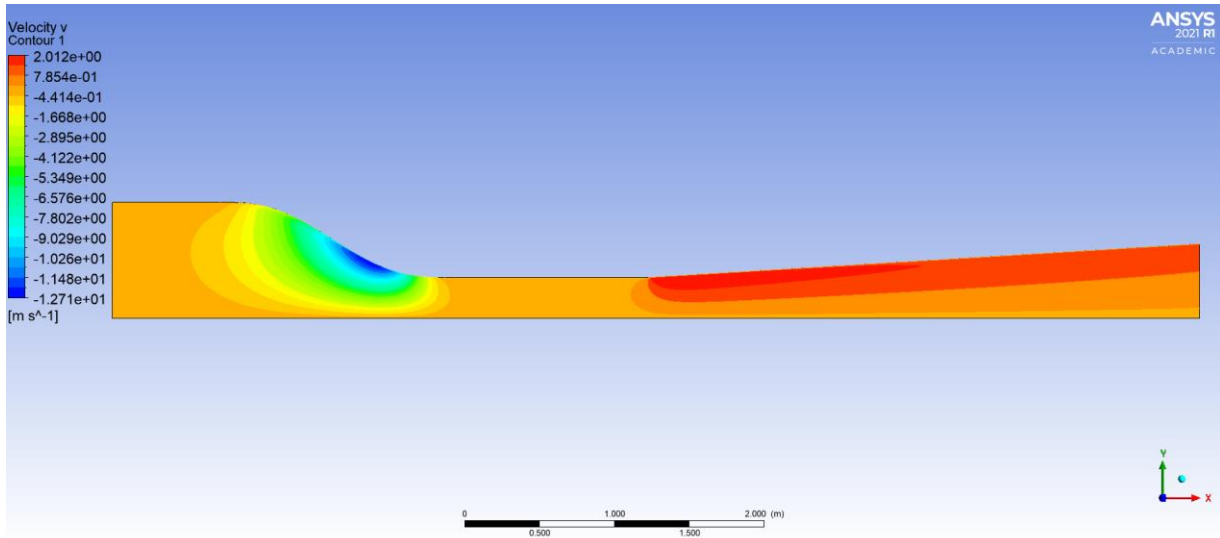


Figura 6.1: Contornos de velocidad en v en geometría en 2D.
Elaboración Propia.

Así mismo, la imagen de la figura 6.2, que muestra los contornos de presiones del modelo en 2 dimensiones, permite confirmar los resultados del crecimiento de la capa límite en las uniones de la cámara de pruebas con los elementos de contracción y expansión, con una disminución de presiones en dicha zona. Aquí, se aprecia en color azul oscuro las zonas en que ocurren las menores magnitudes de presión, coincidentes con la disminución del tamaño de la capa límite. Esta disminución en la presión se explica simplemente por el cambio de sección, siendo más brusco el cambio en la salida de la cámara de pruebas, donde ocurre un quiebre en el ángulo de la pared, con una elevación de $6,6^\circ$ en el difusor. Todo esto debe considerar que la diferencia en la cámara de pruebas no supera los 130 Pa, es decir, será solo un 0,13% menor la presión sobre la pared en la unión de secciones respecto del centro de la cámara de pruebas.

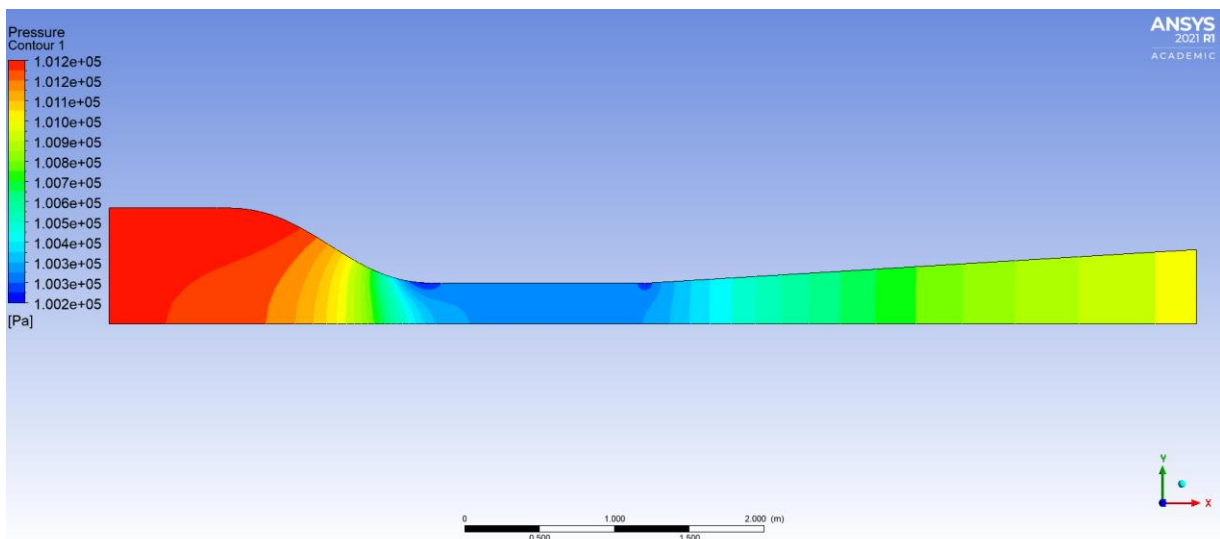


Figura 6.2: Contornos de presiones en geometría en 2D.
Elaboración Propia.

Es importante destacar, que el método de diseño analítico basó su dimensionamiento a fin de conseguir un flujo con velocidad igual a 47 m/s en la cámara de pruebas, valor que en este caso no se alcanza según la simulación realizada, con un máximo de 41,15 m/s. Esto se explica debido a la eliminación de la tercera dimensión en esta primera etapa de estudio por CFD. En este caso, FLUENT, considera infinita la extensión de la geometría en el sentido del eje z, restringiendo únicamente el movimiento del fluido al plano xy. Es decir, el flujo se acelerará sólo en este plano, despreciando el mismo efecto de la contracción en el plano xz, lo que incrementaría aún más la velocidad del aire. Por otro lado, la metodología analítica, emplea un procedimiento de cálculo basado en formulaciones que contemplan un modelo en 3 dimensiones y por ello la gran diferencia en los resultados, que asciende a 5,85 m/s.

6.2. SIMULACIÓN 3D

Una vez concluida la simulación del modelo en 3 dimensiones, el primer parámetro a observar será la velocidad máxima alcanzada por el fluido, que en este caso llega a los 48,63 m/s en la cámara de pruebas, acercándose bastante a los 47 m/s esperados del diseño analítico. En este caso, al agregar la tercera dimensión se siente el efecto de la contracción del flujo en 2 planos, superando en 7,48 m/s al resultado de la simulación en 2 dimensiones. Si bien ahora se supera en 1,63 m/s respecto del diseño analítico, se debe saber que el método de cálculo empleado para diseñar los túneles de viento incluye ecuaciones con consideraciones, simplificaciones y aproximaciones que explican esta leve variación en las velocidades. Por otro lado, este aumento aún contempla un túnel de velocidades subsónicas, debiendo ser inferior a 0,3 M, equivalente a 102 m/s.

Respecto del crecimiento de la capa límite, en las figuras 5.9 y 5.10 se aprecia su evolución a medida que el flujo avanza por el túnel. En la cámara de pruebas se puede ver estable desde el punto F en adelante, con contornos mayormente en color rojo que indican velocidad máxima en dicha zona. De la gráfica Velocidad en v vs Posición en y, junto con los valores utilizados en su construcción, se determina que la capa límite alcanza un tamaño aproximado de 22,45 mm perpendicularmente desde las paredes hacia el centro del modelo, considerando un flujo desarrollado de hasta un 95% de la velocidad máxima alcanzada en cada sector de medición. Sin embargo, este efecto se ve incrementado en el vértice en que se juntan dos paredes, creando una zona triangular en que la capa límite será aún mayor. Esto deja un volumen útil en la cámara de pruebas de aproximadamente el 79,37%, que se mantendrá constante a lo largo de toda la cámara de pruebas. En Anexo 4, se presenta el cálculo y consideraciones para obtener el valor de capa límite y volumen efectivo.

Otros resultados obtenidos presentan valores y comportamientos similares a los del análisis en 2 dimensiones, y por este motivo no se ahonda en ellos. Ejemplo de esto es el comportamiento

Capítulo 6. Análisis y discusión de resultados

de la velocidad en u y v respecto de la posición en y , de las gráficas de las figuras 5.11 y 5.12 respectivamente, donde ambas curvas presentan la misma forma y por ello su explicación en el apartado 6.1 aplica para este caso. Así mismo, los contornos de velocidades en v y presiones para el caso 3D, si bien pueden ver pequeñas variaciones en la magnitud no cambian su comportamiento, y por ello se convalidan únicamente a partir de los análisis realizados a las velocidades. Todo esto, además, justifica los valores que indican crecimiento de capa límite y flujo desarrollado a lo largo de la cámara de pruebas, obtenidos para el estudio del modelo en 3 dimensiones.

PROPUESTA DE MEJORAS

Como se ha mencionado en el punto anterior, se evidencia un crecimiento importante de la capa límite en los bordes del túnel de viento. Para solucionar esta problemática se propone agregar un borde biselado en 45° a los vértices del túnel, tal como se aprecia en el túnel de viento subsónico C2-00, propiedad de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Azcapotzalco del Instituto Técnico Nacional de México, mostrado en la figura 6.3.

Con esta variación en el diseño se espera disminuir el efecto de dicha zona en el desarrollo del flujo y aumentar la proporción de volumen útil dentro de la cámara de pruebas.

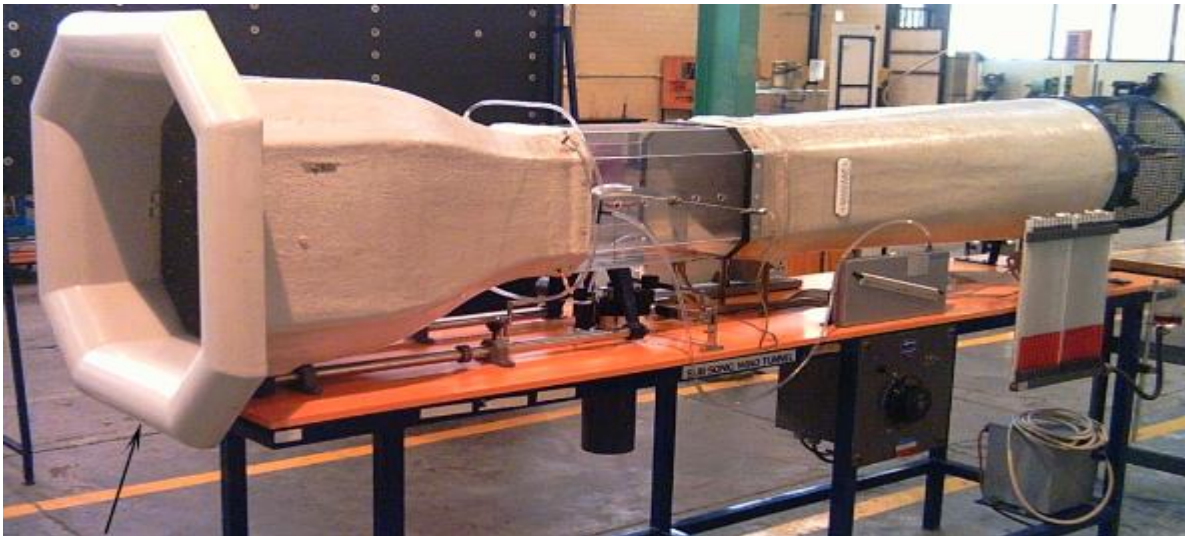


Figura 6.3: Túnel de viento subsónico C2-00 con bordes biselados. (21)

Considerando este factor de mejora, sumado a los resultados de las pruebas realizadas en las simulaciones, se sugiere la disposición del modelo de pruebas, de no más de 220 cm^2 de área frontal, en el centro de la cámara de pruebas, tanto a lo largo como ancho de esta. Esto se justifica por los datos de estabilidad en el flujo conseguidos en esta zona, pues si bien los

Capítulo 6. Análisis y discusión de resultados

extremos de este componente muestran mejores condiciones aparentes de flujo, con una capa límite levemente menor, no alcanzan la velocidad máxima lograda por el sistema. Además, al estar en contacto con zonas más abiertas, como lo son el cono de contracción y el difusor, se propiciarán con aún más facilidad zonas de inestabilidad al disponer un modelo al interior de la cámara de pruebas.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

El desarrollo de este trabajo de memoria nace de la necesidad de validación del diseño analítico de un túnel de viento subsónico de circuito abierto. Para esto es necesaria la realización de pruebas que demuestren empíricamente que su diseño es correcto, es decir, que mantenga un flujo laminar en la sección de pruebas del modelo, idealmente sin la aparición de turbulencias y con una capa límite con el menor tamaño posible. Todo esto se puede verificar con la realización de pruebas computacionales que simulen el flujo de aire tal como si se tratase de un modelo construido físicamente.

El estudio comienza con una recopilación bibliográfica y estado del arte de conocimientos que se vean involucrados en el trabajo de diseño y optimización del túnel de viento, pasando por la revisión de conceptos de mecánica de fluidos, túneles de viento, análisis adimensional y simulaciones por computadora de dinámica de fluidos. Además, son extraídos como datos iniciales los parámetros dimensionales y condiciones de flujo bajo los que se justificó el diseño teórico del túnel de viento.

Con estos datos se construyen modelos geométricos en 2 y 3 dimensiones, representativos del espacio interior del túnel de viento, considerando sus 4 componentes principales. Éstos son la cámara de estabilización, por donde ingresa el fluido, seguido por el cono de contracción, cuya función es acelerar el flujo antes de entrar a la zona de pruebas, cuidando no agregar turbulencias. Luego la cámara de pruebas, que corresponde a la unidad en donde efectivamente se realizarán los ensayos de los modelos aerodinámicos que se requiera estudiar. Por último, el difusor, que tiene como tarea el reducir la velocidad del flujo con la menor pérdida de energía posible

Las pruebas computacionales se realizan en Ansys FLUENT, software CFD que permite la simulación de flujos. Aquí se establecen las condiciones de borde del modelo a simular, considerando velocidades, presiones, temperaturas, turbulencias, entre otros factores que permiten acercar el flujo a condiciones reales de operación del sistema.

Cabe destacar que para la realización de pruebas se recurrió al uso de simetrías, considerando únicamente un medio de la geometría en 2 dimensiones y un cuarto para el caso en 3 dimensiones. Esto se realiza principalmente por limitaciones en la versión del software utilizado, ya que únicamente se contó con la versión académica de Ansys FLUENT, que permite un máximo de 512.000 elementos. Esto afecta al estudio del modelo 3D, que idealmente se hubiese refinado respecto de la configuración finalmente utilizada. El refinamiento en la malla propicia un estudio más preciso en zonas de interés, que en este caso se centra en los alrededores cercanos a las paredes del túnel, en donde se produce el crecimiento de la capa límite. El uso de

Conclusiones

simetrías, además, permite ahorrar recursos computacionales y disminuir los tiempos de cálculo, siendo innecesario evaluar el comportamiento del flujo en 2 y 4 secciones que de antemano se sabe, se comportarán igual.

Si bien inicialmente se pretendía optimizar el diseño analítico variando las dimensiones del túnel según fuese necesario, a fin de mejorar su desempeño, los resultados de la simulación mostraron un modelo que cumple satisfactoriamente con los requerimientos para los cuales fue diseñado. Se obtiene un flujo uniforme y ordenado en la cámara de pruebas, alcanzando velocidades máximas que se acercan bastante a lo esperado del diseño inicial, con diferencias que lo superan en sólo 1,63 m/s.

Es interesante destacar las diferencias en los valores obtenidos entre ambas simulaciones, pues en el primer caso se muestra una velocidad máxima en la cámara de pruebas del túnel de 41,15 m/s, mientras que la simulación en 3 dimensiones evidencia un aumento significativo en dicho parámetro, que se eleva a 48,63 m/s. Esto se debe a que la geometría en 2 dimensiones considera infinita la extensión del dibujo en la tercera dimensión, obviando la contracción del túnel en 2 planos como sí se evalúa en el segundo caso. La explicación de que el resultado de este último sea similar al dimensionamiento analítico, que se basa en una velocidad de 47 m/s en la cámara de pruebas, se debe a que el método de cálculo empleado considera ecuaciones para la resolución del diseño en 3 dimensiones. Así mismo, esto explica la diferencia entre ambos estudios, pues analíticamente se recurre a consideraciones y aproximaciones que se minimizan en el proceso iterativo realizado por los softwares de dinámica de fluidos computacional.

Otro parámetro de interés en este estudio y que sufre variaciones significativas en ambos casos será el tamaño de la capa límite. Las diferencias se traducen en una disminución del volumen efectivo que queda disponible para realizar ensayos de modelos aerodinámicos en la cámara de pruebas. Del estudio de 2 a 3 dimensiones se reduce de 88,02% a 79,37% del espacio útil, debiendo situar el modelo en el centro de la cámara de pruebas, donde se considera completamente desarrollado el flujo de aire. En este caso el factor principal que afecta los resultados será la adición de bordes rectos entre las paredes de la sección cuadrada del túnel, ya que debido a esto se producen zonas donde se concentran los efectos de roce de 2 paredes que limitan el libre desplazamiento del fluido, creciendo aún más la capa límite. Todo esto, considerando que perpendicularmente desde las paredes del túnel hacia el centro de la cámara de pruebas, en el eje de simetría, este parámetro no superará los 22,45 mm.

Para resolver esta problemática, se propone añadir bordes biselados a la cámara de pruebas del túnel de viento, lo que por principio de continuidad deberá ser aplicado a todas las secciones, desde la entrada hasta incorporarse con la salida circular del difusor. Se espera que esta nueva geometría disminuya los efectos de borde que acrecientan el tamaño de capa límite y con ello

Conclusiones

se aumente el volumen útil disponible en la cámara de pruebas para la disposición de modelos, los que deben guardar cierta distancia mínima hasta las paredes del túnel, asegurando un flujo uniforme a su alrededor que permita mediciones realistas.

Posteriormente a este estudio, se deben evaluar las condiciones de operación a las que estará sometido este túnel de viento. Un factor importante a considerar será la disposición del túnel en un espacio físico, ya sea en un ambiente amplio o limitado por el espacio. En este último caso se debe evaluar la incidencia de paredes cercanas a la entrada o salida del aire, que pueden agregar resistencia al paso de aire, modificando variables de operación del túnel como velocidades o presiones del flujo. En este mismo sentido, por conceptos de espacio, se podría evaluar la disposición del túnel en sentido vertical, con la entrada del aire orientada hacia el suelo o techo de la habitación que lo contenga. Este escenario también contempla evaluar los efectos de paredes cercanas. La principal ventaja de la inserción de este equipo en un laboratorio cerrado sería la posibilidad de controlar las condiciones ambientales del aire circundante que fluirá por el túnel, manteniendo bajo rangos controlados temperatura, presión o humedad, parámetros que fueron declarados en las condiciones iniciales del diseño.

Otra consideración importante que aún debe ser estudiada serán los materiales a utilizar en la construcción del túnel de viento, así como los mecanismos de unión entre los distintos elementos que lo componen, los que debe dar la continuidad suficiente a las paredes para que no induzca turbulencias en el flujo. Además, se debe obtener un sistema totalmente hermético que no permita fugas de aire y, por tanto, pérdidas de presión. Este diseño se remite a dimensionar el espacio físico interior del túnel de viento, obviando por el momento las demás implicancias de fabricación y montaje, así como el sistema eléctrico que alimentará el sistema y el sistema electrónico que controlará los distintos sensores y aparatos de medición dentro de la cámara de pruebas, que permitirán evaluar el comportamiento de los distintos modelos a estudiar en él.

Finalmente, una vez seleccionados los materiales y métodos de construcción, junto con el respaldo de este estudio que valida empíricamente las dimensiones del túnel de viento, se puede proceder a su confección. Ésta, a su vez, deberá ser evaluada con aparatos de medición que confirmen el éxito en la concepción del modelo, como por ejemplo, un estudio de las velocidades del flujo de aire en la cámara de pruebas por medio de un anemómetro.

REFERENCIAS

1. Cengel, Y. A., Cimbala, J. M., (2006). *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones*, Ciudad de México, México: McGraw Hill, 1ª. ed.
2. Cengel, Y. A., (2007) *Transferencia de Calor y Masa: Un Enfoque Práctico*, México DF, México: McGraw Hill, 3a. ed.
3. Shames, I. H., (1995). *Mecánica de Fluidos*, Bogotá, Colombia: McGraw Hill, 3a. ed.
4. White, F. M., (2004). *Mecánica de Fluidos*, Madrid, España: McGraw Hill, 5a. ed.
5. Fernández, P., (2009). *Aerodinámica y Mecánica de Vuelo*.
6. Iturriaga, J. E., (2017). *Diseño de un túnel de viento subsónico de circuito abierto para fines académicos a partir de un motor existente en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Talca* (Tesis de pregrado). Universidad de Talca, Curicó, Chile.
7. Almeida, O., Carnevalli, F., Ferreira, O., Guimaraes, F., (2018). *Low Subsonic Wind Tunnel – Design and Construction*. J Aerosp Technol Manag.
8. Prada y Nogueira, I., (2006). *El túnel de viento como herramienta de ensayo aerodinámico en la fórmula 1*. Anales de mecánica y electricidad, Vol.83, pp.8-15.
9. Acevedo, F., (2006). *Diseño de un Túnel de Viento para Prueba de Ventiladores y Perfiles Aerodinámicos* (Tesis de pregrado). Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.
10. Quispe, C. A., Urcuhuaranga, W. J., Chiroque, J. E., (2014). *Diseño Aerodinámico de un Túnel de Viento de Bajas Velocidades*. Revista de Investigación de Física, 17. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
11. Niño, Y., (2002). *Método de Volúmenes Finitos*. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
12. Osorio, K., (2015). *Caracterización Aerodinámica de un Vehículo Pesado* (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México DF, México.
13. SODECA, (2019). *Axial Fans and Roof-Mounted Extract Fans* (Catálogo en línea). Recuperado de: https://www.sodeca.com/upload/imgCatalogos/EN/CT07_Helicoidales_Tejado_2019_EN.pdf

Referencias

14. Fernández, M., (2019). *El Túnel de Viento en la Fórmula 1* (En línea). AerodinámicaF1. Recuperado de: <https://www.aerodinamicaf1.com/2019/11/el-tunel-de-viento-en-la-formula-1/>
15. Osses, J., (2016). *El Método de Elementos Finitos* (En línea). ESSS. Recuperado de: <https://www.esss.co/es/blog/el-metodo-de-volumenes-finitos/>
16. Facultad de Ingeniería de la Universidad de Talca, (consultado 2020). *Misión y visión*. (En línea). Recuperado de: <http://www.ingenieria.otalca.cl/Seccion/Detalles/48>
17. RAE, (2019). *Diccionario de lengua española*. Edición del Tricentenario.
18. Dunbar, B., (2008). *Túneles Aerodinámicos* (En línea). NASA. Recuperado de: <https://www.nasa.gov/centers/ames/spanish/research/lifeonearth/lifeonearth-windtunnels.html>
19. ANSYS Inc., (2013). *ANSYS Fluent User's Guide*. Canonsburg, Pennsylvania, USA.
20. ANSYS Inc., (2010). *ANSYS Meshing User's Guide*. Canonsburg, Pennsylvania, USA.
21. Moreno, U., (2008). *Rehabilitación del Túnel de Viento Subsónico C2-00 y Determinación del Coeficiente de Resistencia de Diferentes Modelos de Prueba en el Túnel* (Tesis de pregrado). Instituto Politécnico Nacional, México DF, México.

ANEXOS

ANEXO 1

Cálculo de intensidad de turbulencia.

- Entrada del túnel

- Velocidad de entrada: se obtiene a partir de un documento Excel desarrollado por Javier Iturriaga (16) en que se parametrizan los datos del diseño teórico del túnel, y entre ellos se puede extraer el valor de la velocidad de entrada.

$$v_i = 5,842167982 \text{ m/s}$$

- Número de Reynolds:

$$Re_{DH_i} = \frac{v_i DH_i}{\nu} = \frac{5,842 * 1,56}{1,46 * 10^{-5}} = 624.213,699$$

- Intensidad de Turbulencia

$$I_i = 0,16(624.213,699)^{-1/8} = 0,0302 = 3,02\%$$

- Salida del túnel

- Velocidad de salida: se obtiene de igual forma que la velocidad de entrada.

$$v_o = 18,80621693 \text{ m/s}$$

- Número de Reynolds:

$$Re_{DH_o} = \frac{v_o DH_o}{\nu} = \frac{18,806 * 1}{1,46 * 10^{-5}} = 1.288.082,192$$

- Intensidad de Turbulencia

$$I_i = 0,16(1.288.082,192)^{-1/8} = 0,0276 = 2,76\%$$

ANEXO 2

Valores de posición en y, velocidad en u y porcentaje de desarrollo del flujo en cámara de pruebas del modelo en 2D.

N°	E			F			G		
	Velocity u [m/s]	Y [m]	%	Velocity u [m/s]	Y [m]	%	Velocity u [m/s]	Y [m]	%
1	40,5679474	0,000000000	100,0%	41,1446838	0,000000000	100,0%	41,1407127	0,000000000	100,0%
2	40,5769691	0,005612245	100,0%	41,1396828	0,005612245	100,0%	41,1353073	0,005612245	100,0%
3	40,5859909	0,011224490	100,0%	41,1346588	0,011224490	100,0%	41,1298904	0,011224490	100,0%
4	40,5946236	0,016836735	100,1%	41,1296120	0,016836735	100,0%	41,1244736	0,016836735	100,0%
5	40,6029320	0,022448979	100,1%	41,1245728	0,022448979	100,0%	41,1190567	0,022448979	99,9%
6	40,6111374	0,028061224	100,1%	41,1194916	0,028061224	99,9%	41,1136513	0,028061224	99,9%
7	40,6192818	0,033673469	100,1%	41,1144257	0,033673469	99,9%	41,1082420	0,033673469	99,9%
8	40,6271210	0,039285712	100,1%	41,1093369	0,039285712	99,9%	41,1028481	0,039285712	99,9%
9	40,6345825	0,044897959	100,2%	41,1042175	0,044897959	99,9%	41,0974503	0,044897959	99,9%
10	40,6421280	0,050510205	100,2%	41,0946999	0,050510205	99,9%	41,0877724	0,050510205	99,9%
11	40,6492844	0,056122452	100,2%	41,0777359	0,056122452	99,8%	41,0709343	0,056122452	99,8%
12	40,6557808	0,061734699	100,2%	41,0607681	0,061734699	99,8%	41,0540810	0,061734699	99,8%
13	40,6623650	0,067346945	100,2%	41,0437813	0,067346945	99,8%	41,0372391	0,067346945	99,7%
14	40,6682701	0,072959192	100,2%	41,0267410	0,072959192	99,7%	41,0204124	0,072959192	99,7%
15	40,6739197	0,078571439	100,3%	41,0097351	0,078571439	99,7%	41,0035934	0,078571439	99,7%
16	40,6786766	0,084183686	100,3%	40,9926529	0,084183686	99,6%	40,9867935	0,084183686	99,6%
17	40,6827164	0,089795932	100,3%	40,9724121	0,089795932	99,6%	40,9672432	0,089795932	99,6%
18	40,6840172	0,095408179	100,3%	40,9428482	0,095408179	99,5%	40,9396133	0,095408179	99,5%
19	40,6844292	0,101020426	100,3%	40,9132957	0,101020426	99,4%	40,9120064	0,101020426	99,4%
20	40,6845322	0,106632672	100,3%	40,8837280	0,106632672	99,4%	40,8844337	0,106632672	99,4%
21	40,6839218	0,112244919	100,3%	40,8541298	0,112244919	99,3%	40,8568649	0,112244919	99,3%
22	40,6829071	0,117857166	100,3%	40,8245316	0,117857166	99,2%	40,8293037	0,117857166	99,2%
23	40,6774368	0,123469412	100,3%	40,7901764	0,123469412	99,1%	40,7978363	0,123469412	99,2%
24	40,6663742	0,129081652	100,2%	40,7479172	0,129081652	99,0%	40,7598801	0,129081652	99,1%
25	40,6536674	0,134693891	100,2%	40,7056808	0,134693891	98,9%	40,7219429	0,134693891	99,0%
26	40,6407394	0,140306130	100,2%	40,6634407	0,140306130	98,8%	40,6840401	0,140306130	98,9%
27	40,6261711	0,145918369	100,1%	40,6212387	0,145918369	98,7%	40,6461487	0,145918369	98,8%
28	40,6058502	0,151530609	100,1%	40,5725632	0,151530609	98,6%	40,6027756	0,151530609	98,7%
29	40,5782013	0,157142848	100,0%	40,5180283	0,157142848	98,5%	40,5543938	0,157142848	98,6%
30	40,5502586	0,162755087	100,0%	40,4635620	0,162755087	98,3%	40,5060654	0,162755087	98,5%
31	40,5206680	0,168367326	99,9%	40,4091415	0,168367326	98,2%	40,4577408	0,168367326	98,3%
32	40,4842949	0,173979566	99,8%	40,3484306	0,173979566	98,1%	40,4033737	0,173979566	98,2%
33	40,4404449	0,179591805	99,7%	40,2819672	0,179591805	97,9%	40,3434029	0,179591805	98,1%
34	40,3955345	0,185204044	99,6%	40,2155533	0,185204044	97,7%	40,2834625	0,185204044	97,9%
35	40,3469887	0,190816283	99,5%	40,1464615	0,190816283	97,6%	40,2204590	0,190816283	97,8%
36	40,2866096	0,196428522	99,3%	40,0673370	0,196428522	97,4%	40,1463699	0,196428522	97,6%
37	40,2253304	0,202040762	99,2%	39,9882813	0,202040762	97,2%	40,0722847	0,202040762	97,4%
38	40,1564522	0,207653001	99,0%	39,9019585	0,207653001	97,0%	39,9892197	0,207653001	97,2%
39	40,0792236	0,213265240	98,8%	39,8079872	0,213265240	96,8%	39,8967133	0,213265240	97,0%
40	39,9977264	0,218877479	98,6%	39,7095184	0,218877479	96,5%	39,7982826	0,218877479	96,7%
41	39,9051056	0,224489719	98,4%	39,5963898	0,224489719	96,2%	39,6807518	0,224489719	96,5%
42	39,8056183	0,230101958	98,1%	39,4733047	0,230101958	95,9%	39,5499535	0,230101958	96,1%
43	39,6950226	0,235714197	97,8%	39,3338394	0,235714197	95,6%	39,3973465	0,235714197	95,8%
44	39,5688210	0,241326436	97,5%	39,1624565	0,241326436	95,2%	39,2028656	0,241326436	95,3%
45	39,4241409	0,246938676	97,2%	38,9530602	0,246938676	94,7%	38,9593544	0,246938676	94,7%
46	39,2500000	0,252550930	96,8%	38,6757545	0,252550930	94,0%	38,6306114	0,252550930	93,9%
47	39,0229034	0,258163184	96,2%	38,2748337	0,258163184	93,0%	38,1525688	0,258163184	92,7%
48	38,6347313	0,263775438	95,2%	37,5393410	0,263775438	91,2%	37,2932014	0,263775438	90,6%

Anexos

49	37,4679337	0,269387692	92,4%	35,7353210	0,269387692	86,9%	35,3065186	0,269387692	85,8%
50	0,0000000	0,274999946	0,0%	0,0000000	0,274999946	0,0%	0,0000000	0,274999946	0,0%

N°	H			I		
	Velocity u [m/s]	Y [m]	%	Velocity u [m/s]	Y [m]	%
1	41,1158752	0,000000000	100,0%	40,6539116	0,000000000	100,0%
2	41,1112366	0,005612245	100,0%	40,6505356	0,005612245	100,0%
3	41,1066055	0,011224490	100,0%	40,6472015	0,011224490	100,0%
4	41,1019974	0,016836735	100,0%	40,6438560	0,016836735	100,0%
5	41,0974083	0,022448979	100,0%	40,6404343	0,022448979	100,0%
6	41,0928154	0,028061224	99,9%	40,6370277	0,028061224	100,0%
7	41,0882645	0,033673469	99,9%	40,6336823	0,033673469	100,0%
8	41,0837288	0,039285712	99,9%	40,6303177	0,039285712	99,9%
9	41,0791855	0,044897959	99,9%	40,6269112	0,044897959	99,9%
10	41,0710106	0,050510205	99,9%	40,6231003	0,050510205	99,9%
11	41,0567245	0,056122452	99,9%	40,6186562	0,056122452	99,9%
12	41,0424423	0,061734699	99,8%	40,6142082	0,061734699	99,9%
13	41,0282288	0,067346945	99,8%	40,6099396	0,067346945	99,9%
14	41,0140533	0,072959192	99,8%	40,6056442	0,072959192	99,9%
15	40,9998741	0,078571439	99,7%	40,6012306	0,078571439	99,9%
16	40,9857941	0,084183686	99,7%	40,5969620	0,084183686	99,9%
17	40,9692268	0,089795932	99,6%	40,5916519	0,089795932	99,8%
18	40,9453201	0,095408179	99,6%	40,5832748	0,095408179	99,8%
19	40,9214783	0,101020426	99,5%	40,5750732	0,101020426	99,8%
20	40,8976440	0,106632672	99,5%	40,5667000	0,106632672	99,8%
21	40,8738670	0,112244919	99,4%	40,5583916	0,112244919	99,8%
22	40,8501244	0,117857166	99,4%	40,5501976	0,117857166	99,7%
23	40,8226547	0,123469412	99,3%	40,5406342	0,123469412	99,7%
24	40,7890663	0,129081652	99,2%	40,5289955	0,129081652	99,7%
25	40,7554855	0,134693891	99,1%	40,5171814	0,134693891	99,7%
26	40,7219810	0,140306130	99,0%	40,5053902	0,140306130	99,6%
27	40,6884766	0,145918369	99,0%	40,4937592	0,145918369	99,6%
28	40,6492767	0,151530609	98,9%	40,4800797	0,151530609	99,6%
29	40,6049271	0,157142848	98,8%	40,4648056	0,157142848	99,5%
30	40,5605965	0,162755087	98,6%	40,4493256	0,162755087	99,5%
31	40,5163116	0,168367326	98,5%	40,4338722	0,168367326	99,5%
32	40,4653397	0,173979566	98,4%	40,4158211	0,173979566	99,4%
33	40,4082565	0,179591805	98,3%	40,3954430	0,179591805	99,4%
34	40,3511887	0,185204044	98,1%	40,3752975	0,185204044	99,3%
35	40,2906494	0,190816283	98,0%	40,3532715	0,190816283	99,3%
36	40,2173653	0,196428522	97,8%	40,3252029	0,196428522	99,2%
37	40,1440964	0,202040762	97,6%	40,2973251	0,202040762	99,1%
38	40,0603256	0,207653001	97,4%	40,2639275	0,207653001	99,0%
39	39,9655418	0,213265240	97,2%	40,2253304	0,213265240	98,9%
40	39,8637848	0,218877479	97,0%	40,1823730	0,218877479	98,8%
41	39,7395935	0,224489719	96,7%	40,1256371	0,224489719	98,7%
42	39,5999260	0,230101958	96,3%	40,0595436	0,230101958	98,5%
43	39,4348450	0,235714197	95,9%	39,9776573	0,235714197	98,3%
44	39,2211266	0,241326436	95,4%	39,8631668	0,241326436	98,1%
45	38,9509468	0,246938676	94,7%	39,7082825	0,246938676	97,7%
46	38,5833130	0,252550930	93,8%	39,4772949	0,252550930	97,1%
47	38,0465736	0,258163184	92,5%	39,1141243	0,258163184	96,2%
48	37,0865707	0,263775438	90,2%	38,4079895	0,263775438	94,5%
49	34,9330254	0,269387692	85,0%	36,7145996	0,269387692	90,3%
50	0,0000000	0,274999946	0,0%	0,0000000	0,274999946	0,0%

Anexos

Valores de velocidad en v y posición en y en cámara de pruebas del modelo en 2D.

N°	E		F		G	
	Velocity v [m/s]	Y [m]	Velocity v [m/s]	Y [m]	Velocity v [m/s]	Y [m]
1	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
2	-0,0335201472	0,005612245	-0,00056308904	0,005612245	0,00018929169	0,005612245
3	-0,0670013130	0,011224490	-0,00105934951	0,011224490	0,00037822453	0,011224490
4	-0,0979122892	0,016836735	-0,00153508736	0,016836735	0,00056733686	0,016836735
5	-0,1288180800	0,022448979	-0,00202765735	0,022448979	0,00075513066	0,022448979
6	-0,1587529480	0,028061224	-0,00245269807	0,028061224	0,00094242120	0,028061224
7	-0,1882480830	0,033673469	-0,00287872693	0,033673469	0,00112929370	0,033673469
8	-0,2176612320	0,039285712	-0,00326856831	0,039285712	0,00131438591	0,039285712
9	-0,2447261960	0,044897959	-0,00361723173	0,044897959	0,00149943226	0,044897959
10	-0,2724029420	0,050510205	-0,00391959772	0,050510205	0,00164866925	0,050510205
11	-0,2997587320	0,056122452	-0,00409402139	0,056122452	0,00173590495	0,056122452
12	-0,3262711170	0,061734699	-0,00427664071	0,061734699	0,00182361447	0,061734699
13	-0,3530087770	0,067346945	-0,00444151601	0,067346945	0,00190859672	0,067346945
14	-0,3779440520	0,072959192	-0,00456946716	0,072959192	0,00199140003	0,072959192
15	-0,4029787780	0,078571439	-0,00470405631	0,078571439	0,00207431824	0,078571439
16	-0,4260962010	0,084183686	-0,00478983764	0,084183686	0,00215324736	0,084183686
17	-0,4483733180	0,089795932	-0,00483189244	0,089795932	0,00217736978	0,089795932
18	-0,4677110310	0,095408179	-0,00474859821	0,095408179	0,00203928351	0,095408179
19	-0,4863240120	0,101020426	-0,00466236146	0,101020426	0,00189883448	0,101020426
20	-0,5044655200	0,106632672	-0,00457279058	0,106632672	0,00175856636	0,106632672
21	-0,5215173360	0,112244919	-0,00446398929	0,112244919	0,00161387003	0,112244919
22	-0,5384315850	0,117857166	-0,00435941759	0,117857166	0,00146877358	0,117857166
23	-0,5521697400	0,123469412	-0,00427041389	0,123469412	0,00120987021	0,123469412
24	-0,5630694630	0,129081652	-0,00421665935	0,129081652	0,00076230511	0,129081652
25	-0,5723363160	0,134693891	-0,00416340493	0,134693891	0,00031390641	0,134693891
26	-0,5819981690	0,140306130	-0,00411436940	0,140306130	-0,00013757992	0,140306130
27	-0,5900227430	0,145918369	-0,00407579262	0,145918369	-0,00058898365	0,145918369
28	-0,5952463750	0,151530609	-0,00418346608	0,151530609	-0,00121301424	0,151530609
29	-0,5967583060	0,157142848	-0,00442924909	0,157142848	-0,00198971992	0,157142848
30	-0,5983717440	0,162755087	-0,00468761614	0,162755087	-0,00276773563	0,162755087
31	-0,5988225340	0,168367326	-0,00495953811	0,168367326	-0,00354590593	0,168367326
32	-0,5958851580	0,173979566	-0,00545383291	0,173979566	-0,00446398742	0,173979566
33	-0,5898447630	0,179591805	-0,00615558727	0,179591805	-0,00551016163	0,179591805
34	-0,5833146570	0,185204044	-0,00686924811	0,185204044	-0,00655546039	0,185204044
35	-0,5750432010	0,190816283	-0,00769228907	0,190816283	-0,00763454381	0,190816283
36	-0,5616492030	0,196428522	-0,00885592122	0,196428522	-0,00883317273	0,196428522
37	-0,5484137540	0,202040762	-0,01002977880	0,202040762	-0,01003022860	0,202040762
38	-0,5318815710	0,207653001	-0,01136782210	0,207653001	-0,01123780570	0,207653001
39	-0,5119954350	0,213265240	-0,01287253480	0,213265240	-0,01245390340	0,213265240
40	-0,4912693200	0,218877479	-0,01441052930	0,218877479	-0,01363912410	0,218877479
41	-0,4662397800	0,224489719	-0,01603756290	0,224489719	-0,01473359580	0,224489719
42	-0,4390645030	0,230101958	-0,01762099560	0,230101958	-0,01572896170	0,230101958
43	-0,4087618290	0,235714197	-0,01912241620	0,235714197	-0,01656565630	0,235714197
44	-0,3747624750	0,241326436	-0,02027978190	0,241326436	-0,01707684620	0,241326436
45	-0,3372557160	0,246938676	-0,02096639570	0,246938676	-0,01721143160	0,246938676
46	-0,2948212330	0,252550930	-0,02082923610	0,252550930	-0,01677031820	0,252550930
47	-0,2470583020	0,258163184	-0,01940425860	0,258163184	-0,01552851130	0,258163184
48	-0,1895531860	0,263775438	-0,01567021760	0,263775438	-0,01284291410	0,263775438
49	-0,1120915930	0,269387692	-0,00886710826	0,269387692	-0,00788723398	0,269387692
50	0,0000000000	0,274999946	0,0000000000	0,274999946	0,0000000000	0,274999946

Anexos

Nº	E		F	
	Velocity v [m/s]	Y [m]	Velocity v [m/s]	Y [m]
1	0,0000000000	0,000000000	0,0000000000	0,000000000
2	0,00089252758	0,005612245	0,01984709870	0,005612245
3	0,00178505515	0,011224490	0,04005035010	0,011224490
4	0,00271281414	0,016836735	0,06082548950	0,016836735
5	0,00367275416	0,022448979	0,08157791940	0,022448979
6	0,00463293586	0,028061224	0,10250028200	0,028061224
7	0,00563108269	0,033673469	0,12419344500	0,033673469
8	0,00666189287	0,039285712	0,14572319400	0,039285712
9	0,00769270025	0,044897959	0,16717648500	0,044897959
10	0,00857031904	0,050510205	0,18945187300	0,050510205
11	0,00918766111	0,056122452	0,21163106000	0,056122452
12	0,00980500877	0,061734699	0,23381018600	0,061734699
13	0,01045395060	0,067346945	0,25695645800	0,067346945
14	0,01111390630	0,072959192	0,28013178700	0,072959192
15	0,01177951880	0,078571439	0,30328398900	0,078571439
16	0,01248886440	0,084183686	0,32743012900	0,084183686
17	0,01301811820	0,089795932	0,35096859900	0,089795932
18	0,01301277240	0,095408179	0,37280735400	0,095408179
19	0,01301926560	0,101020426	0,39565151900	0,101020426
20	0,01303198650	0,106632672	0,41847869800	0,106632672
21	0,01305186560	0,112244919	0,44172924800	0,112244919
22	0,01307543180	0,117857166	0,46569597700	0,117857166
23	0,01289151700	0,123469412	0,48875927900	0,123469412
24	0,01237005180	0,129081652	0,51125001900	0,129081652
25	0,01185078450	0,134693891	0,53413188500	0,134693891
26	0,01132598980	0,140306130	0,55728077900	0,140306130
27	0,01079914910	0,145918369	0,58151042500	0,145918369
28	0,01004363600	0,151530609	0,60438197900	0,151530609
29	0,00908482447	0,157142848	0,62731242200	0,157142848
30	0,00812173076	0,162755087	0,65059083700	0,162755087
31	0,00714402273	0,168367326	0,67473936100	0,168367326
32	0,00600920059	0,173979566	0,69824624100	0,173979566
33	0,00471798563	0,179591805	0,72128748900	0,179591805
34	0,00342714204	0,185204044	0,74560535000	0,185204044
35	0,00208162586	0,190816283	0,77011466000	0,190816283
36	0,00060584478	0,196428522	0,79306089900	0,196428522
37	-0,00088989717	0,202040762	0,81741792000	0,202040762
38	-0,00240106997	0,207653001	0,84094184600	0,207653001
39	-0,00392162800	0,213265240	0,86563062700	0,213265240
40	-0,00544611178	0,218877479	0,89072179800	0,218877479
41	-0,00690394174	0,224489719	0,91333520400	0,224489719
42	-0,00828883611	0,230101958	0,93861866000	0,230101958
43	-0,00954581611	0,235714197	0,96347260500	0,235714197
44	-0,01054774130	0,241326436	0,98678463700	0,241326436
45	-0,01126740690	0,246938676	1,00887728000	0,246938676
46	-0,01152568400	0,252550930	1,02912939000	0,252550930
47	-0,01109534690	0,258163184	1,04824102000	0,258163184
48	-0,00940914080	0,263775438	1,05789495000	0,263775438
49	-0,00576227857	0,269387692	1,04425812000	0,269387692
50	0,00000000000	0,274999946	0,00000000000	0,274999946

ANEXO 3

Valores de posición en y, velocidad y porcentaje de desarrollo del flujo en cámara de pruebas del modelo en 3D.

N°	E			F			G		
	Velocity u [m/s]	Y [m]	%	Velocity u [m/s]	Y [m]	%	Velocity u [m/s]	Y [m]	%
1	47,3031769	0	100,0%	48,5206718	0	100,0%	48,5791321	0	100,0%
2	47,3149452	0,00561225	100,0%	48,5134087	0,005612245	100,0%	48,5703354	0,005612245	100,0%
3	47,3267059	0,01122449	100,0%	48,5061455	0,01122449	100,0%	48,5615273	0,01122449	100,0%
4	47,3384781	0,01683674	100,1%	48,4988861	0,016836735	100,0%	48,5527344	0,016836735	99,9%
5	47,3502426	0,02244898	100,1%	48,4916229	0,022448979	99,9%	48,5439301	0,022448979	99,9%
6	47,3620148	0,02806122	100,1%	48,4843597	0,028061224	99,9%	48,5351295	0,028061224	99,9%
7	47,3723793	0,03367347	100,1%	48,4770966	0,033673469	99,9%	48,5263329	0,033673469	99,9%
8	47,3786812	0,03928571	100,2%	48,4698334	0,039285712	99,9%	48,5175323	0,039285712	99,9%
9	47,3850975	0,04489796	100,2%	48,4625702	0,044897959	99,9%	48,5087357	0,044897959	99,9%
10	47,3878403	0,05051021	100,2%	48,4553146	0,050510205	99,9%	48,499939	0,050510205	99,8%
11	47,3894768	0,05612245	100,2%	48,4480515	0,056122452	99,9%	48,4911346	0,056122452	99,8%
12	47,3911133	0,0617347	100,2%	48,4407921	0,061734699	99,8%	48,482338	0,061734699	99,8%
13	47,3927422	0,06734695	100,2%	48,4335289	0,067346945	99,8%	48,4737129	0,067346945	99,8%
14	47,394371	0,07295919	100,2%	48,4262695	0,072959192	99,8%	48,4651909	0,072959192	99,8%
15	47,3960037	0,07857144	100,2%	48,4190063	0,078571439	99,8%	48,4566727	0,078571439	99,7%
16	47,3976364	0,08418369	100,2%	48,4098587	0,084183686	99,8%	48,4481468	0,084183686	99,7%
17	47,3992653	0,08979593	100,2%	48,4001083	0,089795932	99,8%	48,4331665	0,089795932	99,7%
18	47,4008942	0,09540818	100,2%	48,3836288	0,095408179	99,7%	48,410717	0,095408179	99,7%
19	47,3995819	0,10102043	100,2%	48,349926	0,101020426	99,6%	48,3882675	0,101020426	99,6%
20	47,3912125	0,10663267	100,2%	48,316227	0,106632672	99,6%	48,3658066	0,106632672	99,6%
21	47,382843	0,11224492	100,2%	48,2808304	0,112244919	99,5%	48,3322601	0,112244919	99,5%
22	47,3744812	0,11785717	100,2%	48,239006	0,117857166	99,4%	48,2969513	0,117857166	99,4%
23	47,3686981	0,12346941	100,1%	48,1971741	0,123469412	99,3%	48,2616539	0,123469412	99,3%
24	47,3739395	0,12908165	100,1%	48,1553459	0,129081652	99,2%	48,2263489	0,129081652	99,3%
25	47,3791809	0,13469389	100,2%	48,1135178	0,134693891	99,2%	48,1910477	0,134693891	99,2%
26	47,3844223	0,14030613	100,2%	48,0657043	0,14030613	99,1%	48,1557541	0,14030613	99,1%
27	47,3896637	0,14591837	100,2%	48,016758	0,145918369	99,0%	48,1204491	0,145918369	99,1%
28	47,3779678	0,15153061	100,2%	47,9650116	0,151530609	98,9%	48,0851517	0,151530609	99,0%
29	47,3517685	0,15714285	100,1%	47,9132729	0,157142848	98,7%	48,0498428	0,157142848	98,9%
30	47,3255692	0,16275509	100,0%	47,8615265	0,162755087	98,6%	48,0116272	0,162755087	98,8%
31	47,2985611	0,16836733	100,0%	47,8097763	0,168367326	98,5%	47,9688835	0,168367326	98,7%
32	47,2708206	0,17397957	99,9%	47,7580338	0,173979566	98,4%	47,9257889	0,173979566	98,7%
33	47,243103	0,17959181	99,9%	47,7062874	0,179591805	98,3%	47,8825607	0,179591805	98,6%
34	47,210434	0,18520404	99,8%	47,6531677	0,185204044	98,2%	47,839325	0,185204044	98,5%
35	47,1747131	0,19081628	99,7%	47,5967598	0,190816283	98,1%	47,7928276	0,190816283	98,4%
36	47,1389847	0,19642852	99,7%	47,540554	0,196428522	98,0%	47,7454453	0,196428522	98,3%
37	47,1032639	0,20204076	99,6%	47,4843597	0,202040762	97,9%	47,6980743	0,202040762	98,2%
38	47,0574532	0,207653	99,5%	47,4208412	0,207653001	97,7%	47,6377182	0,207653001	98,1%
39	46,9813766	0,21326524	99,3%	47,3349686	0,21326524	97,6%	47,5383949	0,21326524	97,9%
40	46,905304	0,21887748	99,2%	47,2487526	0,218877479	97,4%	47,4390717	0,218877479	97,7%
41	46,8239899	0,22448972	99,0%	47,152523	0,224489719	97,2%	47,330864	0,224489719	97,4%
42	46,7271576	0,23010196	98,8%	47,024704	0,230101958	96,9%	47,196373	0,230101958	97,2%
43	46,6303291	0,2357142	98,6%	46,8968582	0,235714197	96,7%	47,0618782	0,235714197	96,9%
44	46,5053177	0,24132644	98,3%	46,7207603	0,241326436	96,3%	46,8639221	0,241326436	96,5%
45	46,3722305	0,24693868	98,0%	46,5286331	0,246938676	95,9%	46,6452713	0,246938676	96,0%
46	46,2005386	0,25255093	97,7%	46,257618	0,25255093	95,3%	46,3237457	0,25255093	95,4%
47	45,968029	0,25816318	97,2%	45,8559647	0,258163184	94,5%	45,837532	0,258163184	94,4%
48	45,5930405	0,26377544	96,4%	45,1639862	0,263775438	93,1%	44,9958229	0,263775438	92,6%

Anexos

49	44,3670082	0,26938769	93,8%	43,2546082	0,269387692	89,1%	42,7788429	0,269387692	88,1%
50	0	0,27499995	0,0%	0	0,274999946	0,0%	0	0,274999946	0,0%

N°	H			I		
	Velocity u [m/s]	Y [m]	%	Velocity u [m/s]	Y [m]	%
1	47,8556633	0	100,0%	47,8556633	0	100,0%
2	47,84935	0,005612245	100,0%	47,84935	0,005612245	100,0%
3	47,8430328	0,01122449	100,0%	47,8430328	0,01122449	100,0%
4	47,8371964	0,016836735	100,0%	47,8371964	0,016836735	100,0%
5	47,8323288	0,022448979	100,0%	47,8323288	0,022448979	100,0%
6	47,8274536	0,028061224	100,0%	47,8274536	0,028061224	99,9%
7	47,8225899	0,033673469	100,0%	47,8225899	0,033673469	99,9%
8	47,8177185	0,039285712	100,0%	47,8177185	0,039285712	99,9%
9	47,8128433	0,044897959	100,0%	47,8128433	0,044897959	99,9%
10	47,8079796	0,050510205	99,9%	47,8079796	0,050510205	99,9%
11	47,8031158	0,056122452	99,9%	47,8031158	0,056122452	99,9%
12	47,7982483	0,061734699	99,9%	47,7982483	0,061734699	99,9%
13	47,7933769	0,067346945	99,8%	47,7933769	0,067346945	99,9%
14	47,7902107	0,072959192	99,8%	47,7902107	0,072959192	99,9%
15	47,7888031	0,078571439	99,8%	47,7888031	0,078571439	99,9%
16	47,7873917	0,084183686	99,7%	47,7873917	0,084183686	99,9%
17	47,7860985	0,089795932	99,7%	47,7860985	0,089795932	99,9%
18	47,7880669	0,095408179	99,7%	47,7880669	0,095408179	99,9%
19	47,7900391	0,101020426	99,6%	47,7900391	0,101020426	99,9%
20	47,7919998	0,106632672	99,6%	47,7919998	0,106632672	99,9%
21	47,7939758	0,112244919	99,6%	47,7939758	0,112244919	99,9%
22	47,7959404	0,117857166	99,5%	47,7959404	0,117857166	99,9%
23	47,7974815	0,123469412	99,4%	47,7974815	0,123469412	99,9%
24	47,7846985	0,129081652	99,4%	47,7846985	0,129081652	99,9%
25	47,7719193	0,134693891	99,3%	47,7719193	0,134693891	99,8%
26	47,7591324	0,14030613	99,2%	47,7591324	0,14030613	99,8%
27	47,7463531	0,145918369	99,2%	47,7463531	0,145918369	99,8%
28	47,7313271	0,151530609	99,1%	47,7313271	0,151530609	99,7%
29	47,7134438	0,157142848	99,0%	47,7134438	0,157142848	99,7%
30	47,6955566	0,162755087	98,9%	47,6955566	0,162755087	99,7%
31	47,6776848	0,168367326	98,9%	47,6776848	0,168367326	99,6%
32	47,6636505	0,173979566	98,8%	47,6636505	0,173979566	99,6%
33	47,6639519	0,179591805	98,7%	47,6639519	0,179591805	99,6%
34	47,6630707	0,185204044	98,6%	47,6630707	0,185204044	99,6%
35	47,6550827	0,190816283	98,5%	47,6550827	0,190816283	99,6%
36	47,6470947	0,196428522	98,4%	47,6470947	0,196428522	99,6%
37	47,6391068	0,202040762	98,3%	47,6391068	0,202040762	99,5%
38	47,627037	0,207653001	98,2%	47,627037	0,207653001	99,5%
39	47,6027222	0,21326524	98,0%	47,6027222	0,21326524	99,5%
40	47,5784035	0,218877479	97,8%	47,5784035	0,218877479	99,4%
41	47,5459862	0,224489719	97,6%	47,5459862	0,224489719	99,4%
42	47,4896049	0,230101958	97,3%	47,4896049	0,230101958	99,2%
43	47,4332237	0,235714197	97,0%	47,4332237	0,235714197	99,1%
44	47,3275986	0,241326436	96,5%	47,3275986	0,241326436	98,9%
45	47,2038345	0,246938676	96,0%	47,2038345	0,246938676	98,6%
46	46,986908	0,25255093	95,3%	46,986908	0,25255093	98,2%
47	46,6041641	0,258163184	94,2%	46,6041641	0,258163184	97,4%
48	45,8485756	0,263775438	92,2%	45,8485756	0,263775438	95,8%
49	43,6713257	0,269387692	87,1%	43,6713257	0,269387692	91,3%
50	0	0,274999946	0,0%	0	0,274999946	0,0%

Anexos

Valores de velocidad en v y posición en y en cámara de pruebas del modelo en 3D.

N°	E		F		G	
	Velocity v [m/s]	Y [m]	Velocity v [m/s]	Y [m]	Velocity v [m/s]	Y [m]
1	-0,044313580	0,000000000	-0,000378062	0,000000000	0,000879786	0,000000000
2	-0,069631577	0,005612245	-0,000317661	0,005612245	0,000986268	0,005612245
3	-0,094949506	0,011224490	-0,000257259	0,011224490	0,001092749	0,011224490
4	-0,120267421	0,016836735	-0,000196858	0,016836735	0,001199231	0,016836735
5	-0,145585328	0,022448979	-0,000136456	0,022448979	0,001305713	0,022448979
6	-0,170903251	0,028061224	-0,000076055	0,028061224	0,001412194	0,028061224
7	-0,197143763	0,033673469	-0,000015653	0,033673469	0,001518677	0,033673469
8	-0,226058796	0,039285712	0,000044748	0,039285712	0,001625159	0,039285712
9	-0,242254168	0,044897959	0,000105150	0,044897959	0,001731642	0,044897959
10	-0,266907454	0,050510205	0,000165551	0,050510205	0,001838124	0,050510205
11	-0,294887483	0,056122452	0,000225953	0,056122452	0,001944606	0,056122452
12	-0,322867543	0,061734699	0,000286354	0,061734699	0,002051089	0,061734699
13	-0,350847602	0,067346945	0,000346756	0,067346945	0,002116335	0,067346945
14	-0,378827631	0,072959192	0,000407157	0,072959192	0,002156718	0,072959192
15	-0,406807721	0,078571439	0,000467559	0,078571439	0,002197102	0,078571439
16	-0,434787810	0,084183686	0,000527378	0,084183686	0,002237485	0,084183686
17	-0,462767959	0,089795932	-0,000039402	0,089795932	0,002392470	0,089795932
18	-0,490748107	0,095408179	0,000018607	0,095408179	0,002680342	0,095408179
19	-0,513269365	0,101020426	0,000984363	0,101020426	0,002968215	0,101020426
20	-0,522684515	0,106632672	0,001950119	0,106632672	0,003256088	0,106632672
21	-0,532099485	0,112244919	0,002921805	0,112244919	0,003645408	0,112244919
22	-0,541514397	0,117857166	0,003916031	0,117857166	0,004050702	0,117857166
23	-0,551585853	0,123469412	0,004910257	0,123469412	0,004455998	0,123469412
24	-0,564456582	0,129081652	0,005904481	0,129081652	0,004861293	0,129081652
25	-0,577327430	0,134693891	0,006898709	0,134693891	0,005266589	0,134693891
26	-0,590198278	0,140306130	0,007947019	0,140306130	0,005671886	0,140306130
27	-0,603068948	0,145918369	0,009002704	0,145918369	0,006077182	0,145918369
28	-0,606845498	0,151530609	0,010028125	0,151530609	0,006482478	0,151530609
29	-0,602832198	0,157142848	0,011053549	0,157142848	0,006887775	0,157142848
30	-0,598818958	0,162755087	0,012078974	0,162755087	0,007189650	0,162755087
31	-0,596831679	0,168367326	0,013104399	0,168367326	0,007331378	0,168367326
32	-0,596652389	0,173979566	0,014129825	0,173979566	0,007295232	0,173979566
33	-0,596472800	0,179591805	0,015155247	0,179591805	0,007187932	0,179591805
34	-0,589668274	0,185204044	0,015922595	0,185204044	0,007080633	0,185204044
35	-0,578778923	0,190816283	0,016053312	0,190816283	0,006766904	0,190816283
36	-0,567888796	0,196428522	0,016171012	0,196428522	0,006397778	0,196428522
37	-0,556998789	0,202040762	0,016288711	0,202040762	0,006028650	0,202040762
38	-0,542131901	0,207653001	0,016132860	0,207653001	0,005408861	0,207653001
39	-0,515333891	0,213265240	0,014954892	0,213265240	0,004037045	0,213265240
40	-0,488535881	0,218877479	0,013577306	0,218877479	0,002665217	0,218877479
41	-0,460264534	0,224489719	0,012269865	0,224489719	0,001246922	0,224489719
42	-0,427634716	0,230101958	0,009963372	0,230101958	-0,000308854	0,230101958
43	-0,395004869	0,235714197	0,007662966	0,235714197	-0,001864624	0,235714197
44	-0,355155528	0,241326436	0,004832475	0,241326436	-0,003395451	0,241326436
45	-0,313639253	0,246938676	0,001959700	0,246938676	-0,004900764	0,246938676
46	-0,264824390	0,252550930	-0,000942961	0,252550930	-0,006254382	0,252550930
47	-0,208799332	0,258163184	-0,003449724	0,258163184	-0,007264118	0,258163184
48	-0,142751411	0,263775438	-0,005044399	0,263775438	-0,007506951	0,263775438
49	-0,057804391	0,269387692	-0,004171299	0,269387692	-0,005645840	0,269387692
50	0,000000000	0,274999946	0,000000000	0,274999946	0,000000000	0,274999946

Anexos

Nº	E		F	
	Velocity v [m/s]	Y [m]	Velocity v [m/s]	Y [m]
1	0,00096130	0,000000000	0,071235791	0,000000000
2	0,00126361	0,005612245	0,084998131	0,005612245
3	0,00156593	0,011224490	0,098760456	0,011224490
4	0,00186825	0,016836735	0,111759320	0,016836735
5	0,00217056	0,022448979	0,123234510	0,022448979
6	0,00247288	0,028061224	0,134709686	0,028061224
7	0,00277520	0,033673469	0,146184877	0,033673469
8	0,00306599	0,039285712	0,157660052	0,039285712
9	0,00330773	0,044897959	0,169135228	0,044897959
10	0,00356488	0,050510205	0,180610433	0,050510205
11	0,00396961	0,056122452	0,192085668	0,056122452
12	0,00437435	0,061734699	0,203560889	0,061734699
13	0,00480100	0,067346945	0,215036094	0,067346945
14	0,00535366	0,072959192	0,234826311	0,072959192
15	0,00590633	0,078571439	0,263182044	0,078571439
16	0,00645899	0,084183686	0,291537762	0,084183686
17	0,00701165	0,089795932	0,319564700	0,089795932
18	0,00756431	0,095408179	0,339048773	0,095408179
19	0,00811698	0,101020426	0,358532786	0,101020426
20	0,00851808	0,106632672	0,378016800	0,106632672
21	0,00875111	0,112244919	0,397500873	0,112244919
22	0,00882523	0,117857166	0,416984856	0,117857166
23	0,00872498	0,123469412	0,436979383	0,123469412
24	0,00862472	0,129081652	0,474180639	0,129081652
25	0,00852446	0,134693891	0,511381686	0,134693891
26	0,00842421	0,140306130	0,548582494	0,140306130
27	0,00838648	0,145918369	0,585783303	0,145918369
28	0,00831015	0,151530609	0,617751360	0,151530609
29	0,00769588	0,157142848	0,643022895	0,157142848
30	0,00711122	0,162755087	0,668294430	0,162755087
31	0,00652656	0,168367326	0,693566382	0,168367326
32	0,00594190	0,173979566	0,717377782	0,173979566
33	0,00535724	0,179591805	0,735751569	0,179591805
34	0,00472592	0,185204044	0,755851507	0,185204044
35	0,00405665	0,190816283	0,786118746	0,190816283
36	0,00338739	0,196428522	0,816385925	0,196428522
37	0,00269479	0,202040762	0,846653163	0,202040762
38	0,00186829	0,207653001	0,878256202	0,207653001
39	0,00081218	0,213265240	0,913866997	0,213265240
40	-0,00031007	0,218877479	0,949477732	0,218877479
41	-0,00134153	0,224489719	0,985351801	0,224489719
42	-0,00250029	0,230101958	1,022004490	0,230101958
43	-0,00365770	0,235714197	1,058657170	0,235714197
44	-0,00490615	0,241326436	1,097106100	0,241326436
45	-0,00613089	0,246938676	1,135930660	0,246938676
46	-0,00717959	0,252550930	1,176320200	0,252550930
47	-0,00781775	0,258163184	1,217227700	0,258163184
48	-0,00763644	0,263775438	1,255374190	0,263775438
49	-0,00542814	0,269387692	1,264838100	0,269387692
50	0,00000000	0,274999946	0,000000000	0,274999946

ANEXO 4

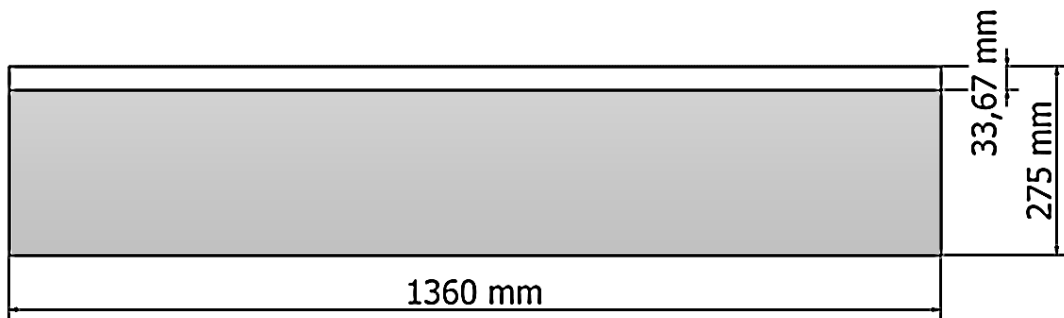
Cálculo del tamaño de capa límite y volumen útil en cámara de pruebas para simulación 2D y 3D.

- Simulación 2D

En primer lugar, se determina el tamaño de la capa límite en el centro de la cámara de pruebas. Para esto se considera la distancia de la muestra 44 (G) de la tabla Velocidad en u vs Posición en y del Anexo 2, donde se considerará desarrollado el flujo.

$$\begin{aligned} \text{Tamaño capa límite} &= 0,275 - 0,241326436 = 0,033673564 \text{ m} \\ &\approx 33,67 \text{ mm} \end{aligned}$$

En seguida se proporciona un boceto del área considerada, siendo ésta la vista en 2D de la cámara de pruebas. En ella se destaca la capa límite en la parte superior, que alcanza los 33,67 mm. El área útil se muestra en color gris.



Finalmente se determina el área total considerada en el dibujo, el área ocupada por la capa límite y el porcentaje útil disponible, es decir, donde se podrán disponer los modelos a ensayar en el túnel.

$$\text{Área total} = 1.360 * 275 = 374.000 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área capa límite} = 1.360 * 33,67 = 44.791,2 \text{ mm}^2$$

$$\% \text{ área útil} = \frac{(374.000 - 44.791,2)}{374.000} * 100 = 88,02 \%$$

- Simulación 3D

Se siguen los mismos pasos que en el caso anterior. Para este se considera la distancia de la muestra 46 (G) de la tabla Velocidad en u vs Posición en y del Anexo 3.

El tamaño de la capa límite en centro de la cámara de pruebas será:

$$\begin{aligned} \text{Tamaño capa límite centro} &= 0,275 - 0,25255093 = 0,02244907 \text{ m} \\ &\approx 22,45 \text{ mm} \end{aligned}$$

En este caso el boceto proporcionado corresponde a la vista transversal del centro de la cámara de pruebas de la geometría considerada en esta simulación. Adicionalmente al tamaño de la capa límite determinada anteriormente, se debe añadir el efecto del vértice en que se encuentran 2 paredes, donde se produce el mayor crecimiento de este parámetro. Para tomar esta muestra se traza una diagonal en el plano G de la figura 5,10, desde el centro del túnel hasta el vértice, cuyos valores se presentan en la siguiente tabla.

N°	E			N°	E		
	Velocity u [m/s]	Y [m]	%		Velocity u [m/s]	Y [m]	%
1	48,5791321	0,0000000	100,0%	51	47,7412567	0,1388889	98,1%
2	48,5743980	0,0027778	100,0%	52	47,7176666	0,1416667	98,1%
3	48,5696526	0,0055556	100,0%	53	47,6975975	0,1444445	98,1%
4	48,5649147	0,0083333	100,0%	54	47,6755219	0,1472223	98,1%
5	48,5601654	0,0111111	100,0%	55	47,6499519	0,1500001	97,9%
6	48,5554352	0,0138889	100,0%	56	47,6187897	0,1527779	97,9%
7	48,5506897	0,0166667	100,0%	57	47,5802040	0,1555556	97,9%
8	48,5459442	0,0194444	99,8%	58	47,5417175	0,1583334	97,7%
9	48,5411491	0,0222222	99,8%	59	47,5033035	0,1611112	97,7%
10	48,5360107	0,0250000	99,8%	60	47,4648933	0,1638890	97,7%
11	48,5308571	0,0277778	99,8%	61	47,4264679	0,1666668	97,5%
12	48,5257111	0,0305556	99,8%	62	47,3880463	0,1694446	97,5%
13	48,5205688	0,0333333	99,8%	63	47,3496399	0,1722223	97,3%
14	48,5154266	0,0361111	99,8%	64	47,3102455	0,1750001	97,3%
15	48,5102768	0,0388889	99,8%	65	47,2648697	0,1777779	97,3%

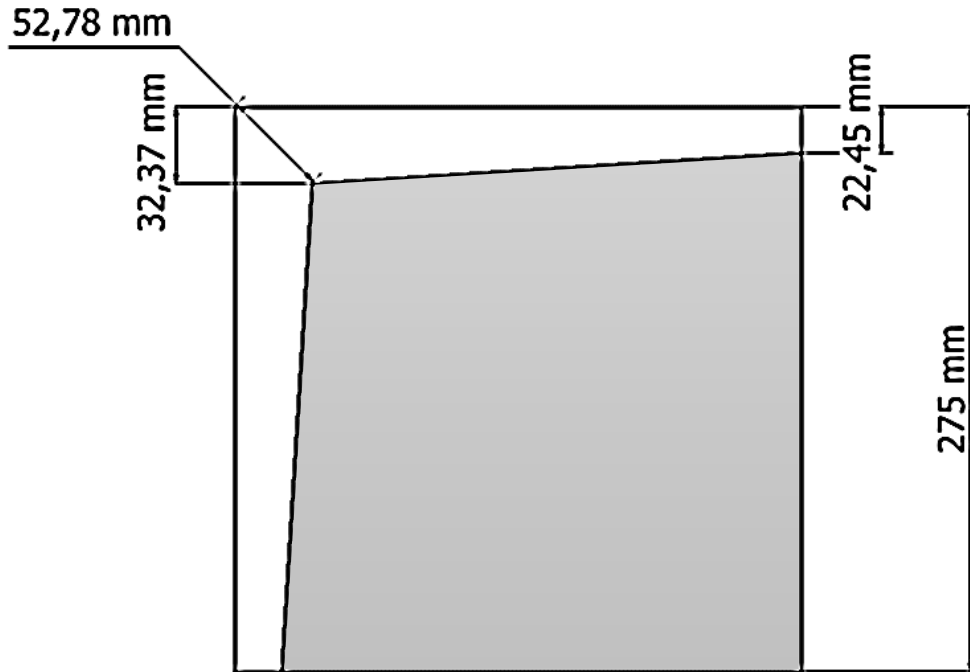
Anexos

16	48,5051384	0,0416667	99,8%	66	47,2195244	0,1805557	97,1%
17	48,4999924	0,0444444	99,8%	67	47,1741791	0,1833335	97,1%
18	48,4948425	0,0472222	99,8%	68	47,1288376	0,1861113	96,9%
19	48,4897003	0,0500000	99,8%	69	47,0749855	0,1888891	96,9%
20	48,4812889	0,0527778	99,8%	70	47,0188065	0,1916668	96,7%
21	48,4613609	0,0555556	99,8%	71	46,9663467	0,1944446	96,7%
22	48,4413757	0,0583333	99,6%	72	46,9205589	0,1972224	96,5%
23	48,4213982	0,0611111	99,6%	73	46,8428116	0,2000002	96,3%
24	48,4014206	0,0638889	99,6%	74	46,7798996	0,2027780	96,3%
25	48,3814354	0,0666667	99,6%	75	46,7419968	0,2055558	96,1%
26	48,3614464	0,0694444	99,6%	76	46,6661377	0,2083336	96,1%
27	48,3414803	0,0722222	99,4%	77	46,5692406	0,2111113	95,9%
28	48,3214912	0,0750000	99,4%	78	46,4723282	0,2138891	95,7%
29	48,3012238	0,0777778	99,4%	79	46,3754272	0,2166669	95,5%
30	48,2804337	0,0805556	99,4%	80	46,2785187	0,2194447	95,3%
31	48,2600632	0,0833333	99,4%	81	46,1816101	0,2222225	95,1%
32	48,2371559	0,0861111	99,2%	82	46,0483971	0,2250003	94,7%
33	48,2142410	0,0888889	99,2%	83	45,8991814	0,2277780	94,4%
34	48,1912956	0,0916667	99,2%	84	45,7499657	0,2305558	94,0%
35	48,1681633	0,0944444	99,2%	85	45,6007614	0,2333336	93,8%
36	48,1450310	0,0972222	99,0%	86	45,4510574	0,2361114	93,6%
37	48,1218987	0,1000000	99,0%	87	45,2123718	0,2388892	93,0%
38	48,0987663	0,1027778	99,0%	88	44,9736824	0,2416670	92,6%
39	48,0717163	0,1055556	99,0%	89	44,7349930	0,2444448	92,0%
40	48,0399704	0,1083333	98,8%	90	44,4328766	0,2472225	91,4%
41	48,0082092	0,1111111	98,8%	91	44,0250435	0,2500003	90,5%
42	47,9764595	0,1138889	98,8%	92	43,6172066	0,2527781	89,7%
43	47,9447098	0,1166667	98,6%	93	43,0343246	0,2555559	88,5%
44	47,9129486	0,1194444	98,6%	94	42,3162155	0,2583337	87,0%
45	47,8827477	0,1222222	98,6%	95	41,3894730	0,2611115	85,2%
46	47,8591728	0,1250000	98,6%	96	40,1333580	0,2638893	82,5%
47	47,8355904	0,1277778	98,4%	97	38,2920761	0,2666670	78,8%
48	47,8120041	0,1305556	98,4%	98	35,7251549	0,2694448	73,5%
49	47,7884216	0,1333334	98,4%	99	31,0274849	0,2722226	63,8%
50	47,7648392	0,1361111	98,4%	100	0,0000000	0,2750004	0,0%

A partir de ésta se determina el crecimiento de la capa límite diagonalmente desde el vértice de las paredes.

$$\begin{aligned} \text{Tamaño capa límite vértice} &= 0,275 - 0,2222225 = 0,0527775 \text{ m} \\ &\approx 52,78 \text{ mm} \end{aligned}$$

Se debe destacar que el boceto considera una sección cuadrada, simétrica respecto de la diagonal descrita anteriormente. La zona gris representa el área útil.



Finalmente se determina el área total, el área de la capa límite y el porcentaje de área útil.

$$\text{Área total} = 275 * 275 = 75.625 \text{ mm}^2$$

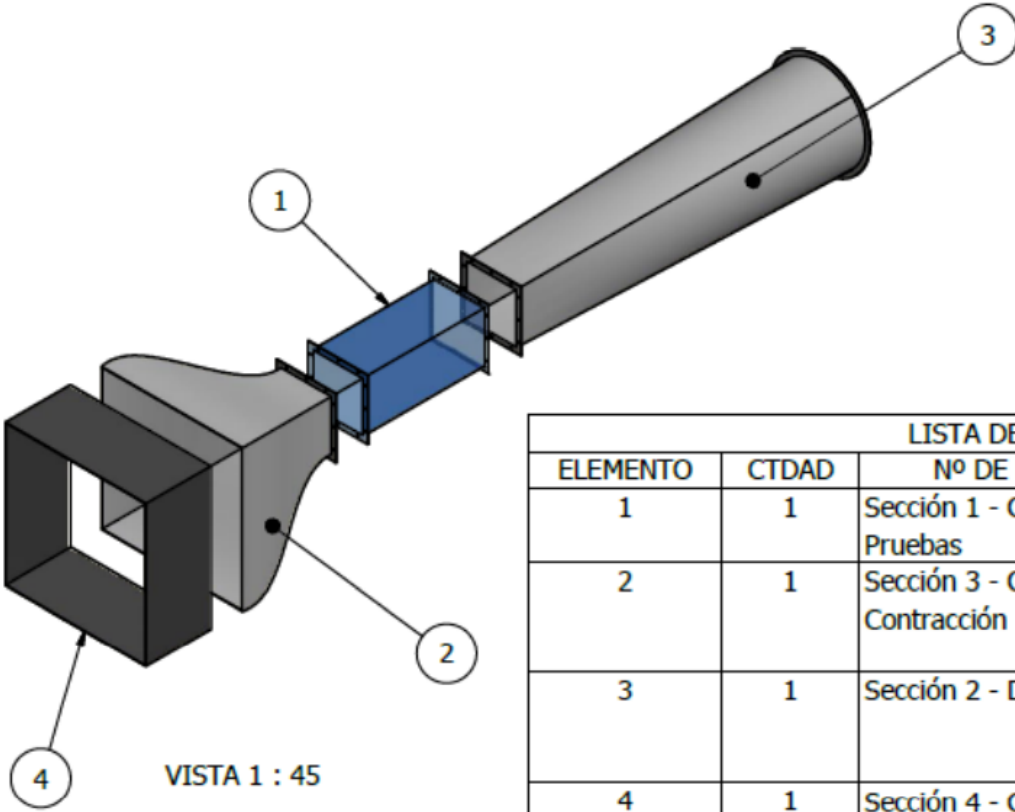
$$\begin{aligned} \text{Área capa límite} &= (37,32 * 37,32) + (275 - 37,32) * 22,45 * 2 + \\ &\quad (275 - 37,32) * \frac{(37,32 - 22,45)}{2} * 2 \\ &= 15.598,916 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\% \text{ área útil} = \frac{(75.625 - 15.598,916)}{75.625} * 100 = 79,37 \%$$

En este caso el porcentaje de área útil será equivalente al volumen efectivo en que se puedan realizar las pruebas de modelos aerodinámicos.

ANEXO 5

Planimetría: Despiece del túnel. (6)

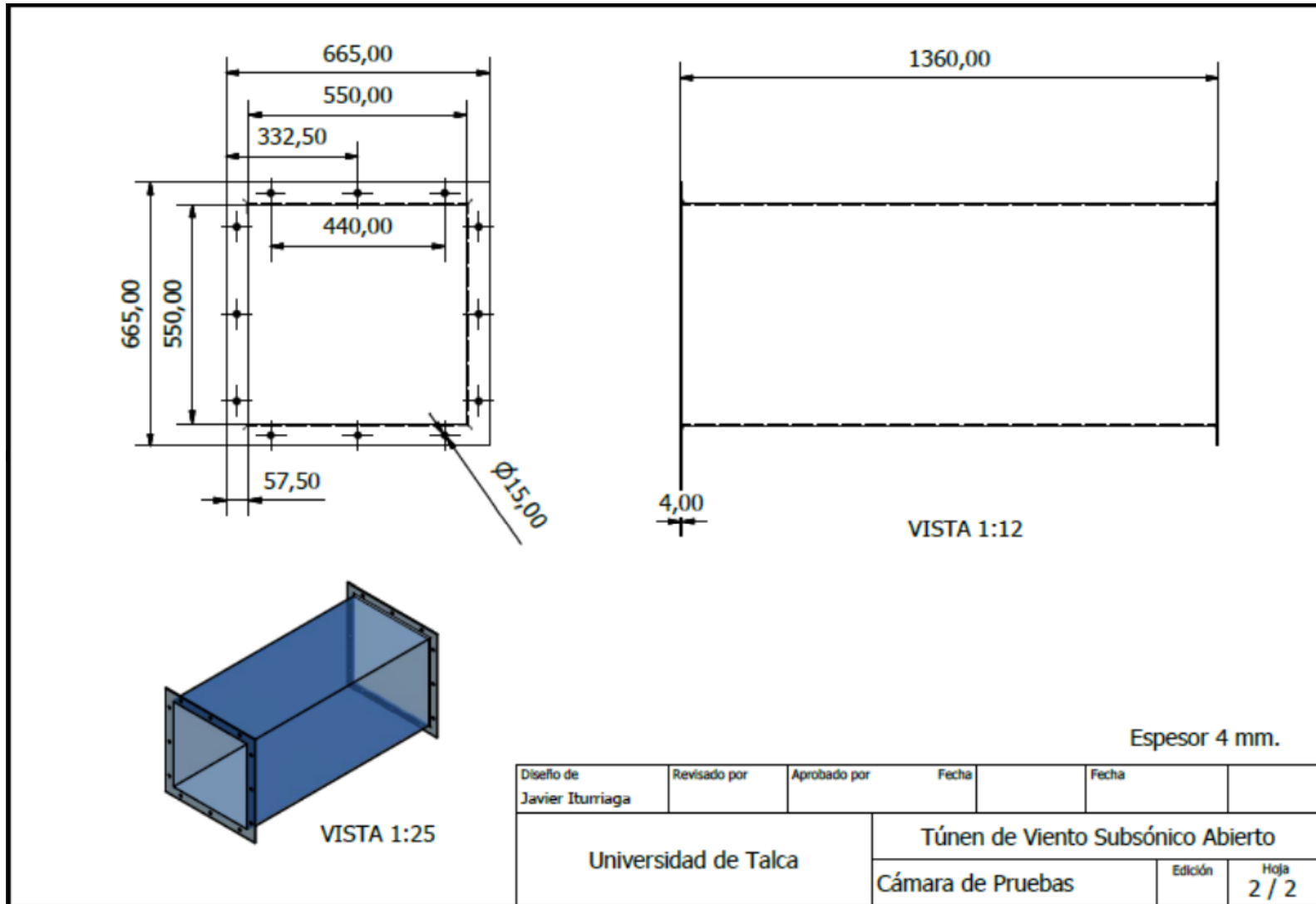


VISTA 1 : 45

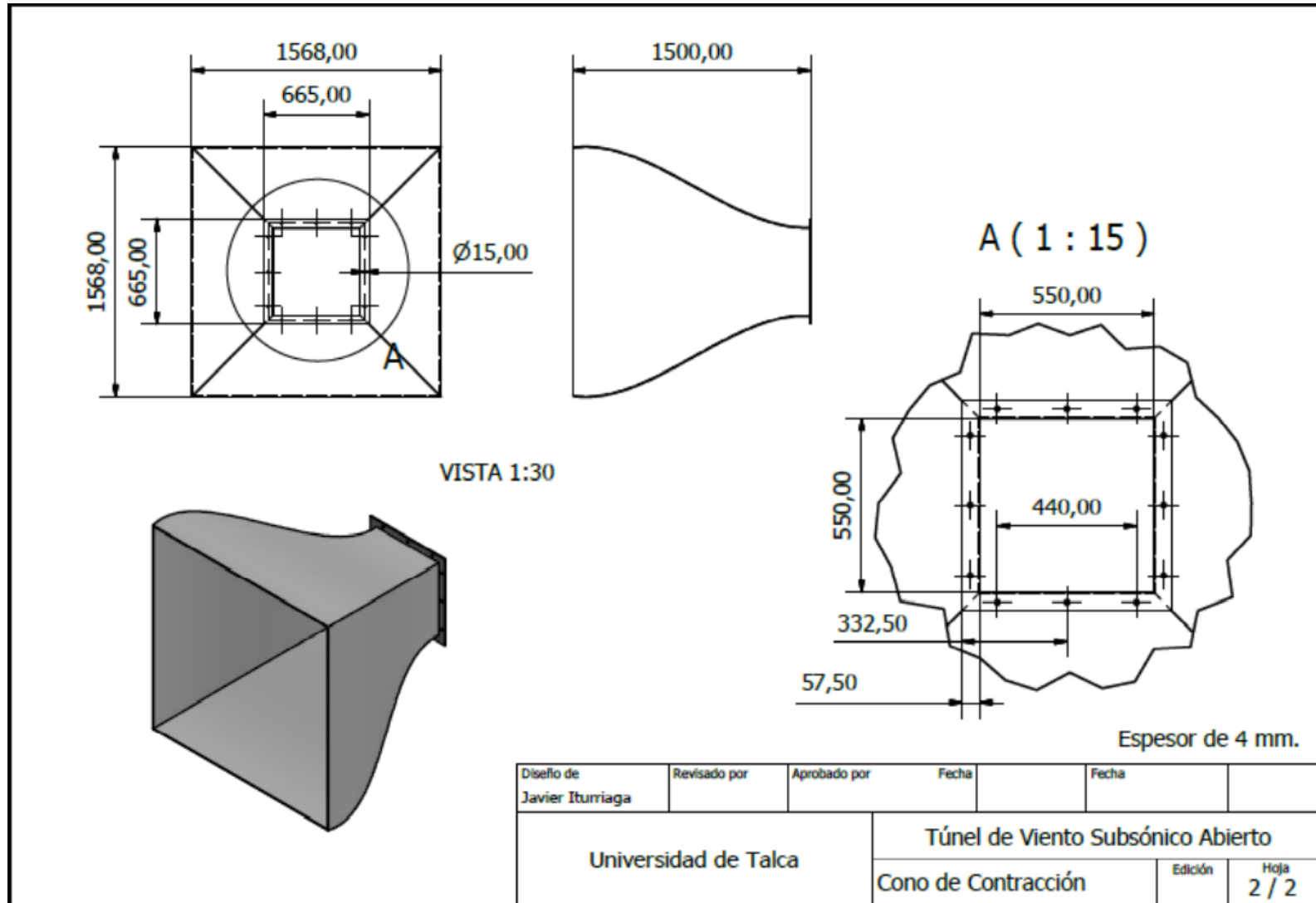
LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Sección 1 - Cámara de Pruebas	0,55x0,55x1,36 m
2	1	Sección 3 - Cono de Contracción	Entrada 1,56x1,56 m Salida 0,55x0,55 m Largo 1,5 m
3	1	Sección 2 - Difusor	Entrada Cuadrada 0,55x0,55 m Salida Circular Diám. 1 m
4	1	Sección 4 - Cámara de Estabilización	1,56x1,56 m Largo 0,724 m

Diseño de Javier Iturriaga	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha
Universidad de Talca		Túnel de Viento Subsónico Abierto		
		Despiece Túnel	Edición	Hoja 2 / 2

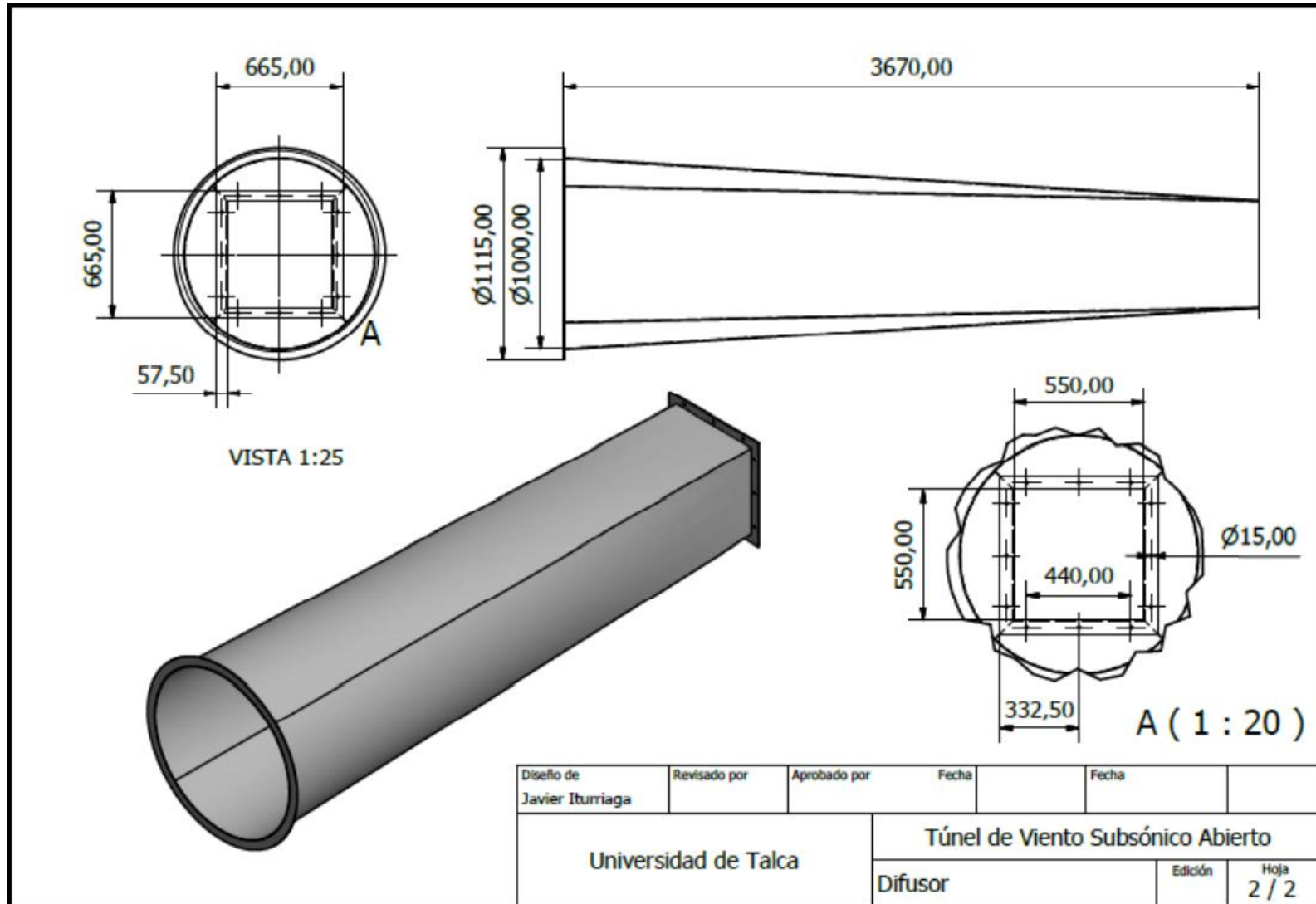
Planimetría: Cámara de pruebas. (6)



Planimetría: Cono de contracción. (6)



Planimetría: Difusor. (6)



Planimetría: Cámara de estabilización. (6)

