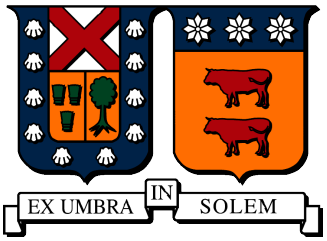
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO - CHILE



DISEÑO Y SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN TÚNEL DE VIENTO SUBSÓNICO COMPACTO PARA FLUJOS ATMOSFÉRICOS

Diego Cristóbal Larraín Covarrubias

Memoria de Titulación para optar al título de:
Ingeniero Civil Mecánico, Mención Energía

PROFESOR GUÍA	PH.D. ALEX FLORES MARADIAGA
PROFESOR CORREFERENTE	PH.D. CARLOS ROSALES HUERTA

ENERO 2020

Resumen

En el presente trabajo se detalla el procedimiento seguido para el diseño de un Túnel de Viento subsónico de circuito cerrado con cámaras de prueba Aerodinámica y de Capa Límite Atmosférica para el Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Técnica Federico Santa María. El diseño final está pensado en una versión prototipo a escala con la finalidad de reducir las pérdidas de carga, separaciones de flujo, costos de inversión y operación, complejidad constructiva y mantener dimensiones apropiadas para el laboratorio. El trabajo abarca desde recomendaciones, ecuaciones semi-empíricas y estándares hasta simulación computacional a través de ANSYS Fluent. El resultado fue un Túnel de Viento con capacidad de generar un flujo perpendicular de 29,1$[m/s]$ en una cámara de pruebas aerodinámica de dimensiones 375x375x750$[mm]$ y un flujo perpendicular de 7,4$[m/s]$ en la cámara de pruebas de capa límite atmosférica en una cámara de pruebas de 750x750x3.430$[mm]$, el cual se puede ajustar a un perfil escalado de capa límite atmosférica a través del uso de espiras y elementos de rugosidad. El costo estimado de equipos y materiales es de 2 millones de pesos. Este Túnel de Viento permitirá a docentes y estudiantes de la universidad hacer ensayos de modelos aeronáuticos y estructuras que enfrenten perfiles atmosféricos.

Abstract

The present report details the proceeding for the design of a Subsonic Closed-Loop Wind Tunnel with an Aerodynamic test section and an Atmospheric Boundary Layer test section for the Renewable Energies Laboratory of Universidad Técnica Federico Santa María. The final design is meant for a scaled prototype version with the purpose of reducing pressure losses, flow separation, investment and operational costs, construction complexity and mainteining proper dimensions for the laboratory. The work encompasses recommendations, semi-empiric equations, standards to numerical simulation using ANSYS Fluent. The result was a Wind Tunnel capable of generating perpendicular flow of 29.1$[m/s]$ in the 375x375x750$[mm]$ aerodynamic test section and a perpendicular flow of 7.4$[m/s]$ in the 750x750x3,430$[mm]$ atmospheric boundary layer test section, which can be adapted to a scaled atmosferic boundary layer using spires and roughness elements. The estimated cost of equipment and materials is 2 million chilean pesos. This Wind Tunel will allow scholars and students of the university to perform tests with aerodynamic models and structures facing atmospheric profiles.

Nomenclatura y Definiciones

- ABLWT: Túnel de Viento de Capa Límite Atmosférica, ABLWT por sus siglas en inglés.
- CC: Casa Central
- CFD: Dinámica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics)
- C.P.: Cámara de Pruebas
- CSJ: Campus San Joaquin
- CV: Campus Vitacura
- HVAC: Siglas en inglés para Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (Heat, Ventilation and Air Conditioning)
- LER: Laboratorio de Energías Renovables - Sede José Miguel Carrera.
- TV: Túnel de viento
- USM: Universidad Técnica Federico Santa María

Índice de Contenidos

1. Introducción **1**
1.1. Declaración del problema 1
1.1.1. Túneles de Viento Disponibles en la Universidad 2
1.2. Generalidades 2
1.3. Metodología 5

2. Estado del Arte **6**
2.1. Orígenes 6
2.2. Diferentes tipos y aplicaciones 6
2.2.1. Velocidad de Flujo 6
2.2.2. Tipo de Circuito 7
2.3. Análisis de los Túneles de Viento Existentes en la Universidad 8
2.4. Usos 9
2.5. Climatic Wind Tunnel - Universidad de Ontario - Canada 12
2.6. Low Subsonic Wind Tunnel - Universidad Federal de Uberlandia - Brazil . . 13
2.7. Laboratorio de Estructuras y materiales de Alta Tecnología LeMAT - Universidad Autónoma de México. 14
2.8. GVPM Politecnico di Milano Wind Tunnel - Italia 16
2.9. Boundary Layer Wind Tunnel 2 - University of Western Ontario 18
2.10. Túnel de Viento - Instituto Tecnológico y de Energías Renovables - Islas Canarias 19
2.11. Design Methodology for a Quick and Low-Cost Wind Tunnel 20
2.12. Túnel de Viento Atmosférico - Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) - Universidad de la República - Uruguay 21
2.13. Low-Speed Wind Tunnel Testing - J. B. Barlow, W. H. Rae, A. Pope . . . 23
2.14. 8x4 Atmospheric Boundary Layer Wind Tunnel - Universidad de Cranfield - Inglaterra 24
2.15. Low Speed Wind Tunnel L-2B - The Von Karman Institute for Fluid Dynamics 25
2.16. UCDavis ABL Wind Tunnel UCD-ABLWT Universidad de California de Davis - Estados Unidos 26
2.17. A validated Design Methodology for a Closed loop Subsonic Wind Tunnel . 27
2.18. Design of an Atmospheric Boundary Layer Wind Tunnel 28
2.19. Resumen de Túneles de Viento Encontrados 28

3. Marco Teórico **29**
3.1. Números Adimensionales en Estudios de Modelos en Túneles de Viento . . 29
3.1.1. Reynolds 29
3.1.2. Mach 29
3.1.3. Euler 30
3.1.4. Froude 30
3.2. Leyes de Conservación 30
3.3. Pérdida de Carga y Recomendaciones Dimensionales 31
3.3.1. Pérdida de carga en un tubo o ducto de sección transversal constante 31
3.3.2. Pérdidas de carga puntuales 32
3.4. Secciones de un Túnel de Viento: Definición, Ecuaciones, Dimensionamiento y otras Recomendaciones 33
3.4.1. Vena de Ensayos 33

3.4.2. Difusores . . . 33
3.4.3. Cámara de Estabilización: Rejillas de Homogeneización y Pantallas . 34
3.4.4. Contracción . . . 35
3.4.5. Codos con guías de flujo . . . 36
3.4.6. Cámara de Desarrollo de Capa Límite - Fetch . . . 37
3.5. Capa Límite Atmosférica . . . 41

4. Diseño y optimización del túnel de viento 43
4.1. Diseño General . . . 43
4.2. Diseño y optimización de secciones del túnel de viento por CFD . . . 57
4.2.1. Modelo Computacional . . . 57
4.2.2. Codos . . . 57
4.2.3. Cámara de desarrollo de capa límite (Fetch) . . . 66
4.2.4. Difusor . . . 72
4.2.5. Contracción . . . 80
4.2.6. Cámara de estabilización . . . 83
4.3. Punto de equilibrio: pérdidas de carga y selección del ventilador . . . 85
4.4. Simulación Túnel Completo . . . 88
4.5. Capacidades y Limitaciones Dimensionales del Túnel de Viento . . . 99

5. Equipos de apoyo, materiales, planos y estimación de costos 99
5.1. Instrumentos y equipos de apoyo . . . 99
5.2. Materiales disponibles . . . 101
5.3. Planos . . . 101
5.4. Estimación de costos . . . 102
5.5. Recomendaciones constructivas generales . . . 104

6. Conclusiones 106

7. Trabajos a Futuro 108

8. Anexos 112
8.1. Anexo: Fetch . . . 112
8.2. Anexo: Código EES para el cálculo de las dimensiones de Espiras y Elementos de Rugosidad en la Fetch. . . . 114
8.3. Anexo: Cotizaciones Importantes . . . 117
8.4. Anexo: Planos . . . 120

Índice de Figuras

1. Layout del LER, medidas en milímetros. 4
2. Túnel de viento de circuito abierto.[2] 7
3. Túnel de viento de circuito cerrado.[3] 7
5. Usos de los equipos túneles de vientos y similares USM. Verde: Cumple sus capacidades. Dorado: Tiene algunos problemas para cumplir. 10
6. Climatic Wind Tunnel - University of Ontario - Canada [4] 12
7. Climatic Wind Tunnel - University of Ontario - Canada [4] 12
8. Túnel de Viento de la Universidad Federal de Uberlandia, Brazil.[5] 13
9. Túnel de Viento LemAT 14
10. Túnel de Viento LemAT, vista en plano. [6] 15
11. Túnel de Viento del Politécnico de Milano.[7] 17
12. Boundary Layer Wind Tunnel 2 - Universidad de Western Ontario, Canadá 18
13. Túnel de Viento del Instituto Tecnológico y de Energías Renovables 19
14. Ventiladores del Túnel de Viento ITER 19
15. Esquema del tipo de túnel de viento que se propone en este artículo.[21] . . 20
16. Dibujo esquemático del túnel de viento de IMFIA[10] 21
17. Foto del túnel de viento de IMFIA.[10] 22
18. Brazo robótico posicionador.[10] 22
19. Portada del libro Low-Speed Wind Tunnel Testing.[11] 23
20. Túnel de Viento de la Universidad de Cranfield, Inglaterra.[12] 24
21. Túnel de viento del Instituto von Karman para Dinámica de Fluídos.[13] . . 25
22. Túnel de viento de capa límite atmosférica de la Universidad de California de Davis.[14] 26
23. Tabla resumen de los túneles de viento encontrados. 28
24. Rugosidad en ductos 32
25. Espira tipo elíptico-cuña. Relación de dimensiones según Counihan.[24] . . . 38
26. Parametrización de dimensiones de la Fetch, sin incluir techo. 39
27. Espiras triangulares. 39
28. Disposición de elementos de rugosidad. 41
29. Perfiles de capa límite para zonas urbanas y rurales. 41
30. Versión 1 Túnel de Viento. 43
31. Versión 2 Túnel de Viento. 44
32. Versión 3 Túnel de Viento. 45
33. Versión 4 Túnel de Viento. 46
34. Versión 5 Túnel de Viento. 47
35. Representación del túnel de viento en base a los modelos simulados con el ventilador del LER instalado. 48
36. Versión 6 Túnel de Viento. 49
37. Representación del túnel de viento en base a los modelos simulados sin considerar la instalación del ventilador. 50
38. Versión 7 Túnel de Viento. 51
39. Representación del túnel de viento con codos adaptados para el ventilador cotizado. 52
40. Version 7 con dimensiones. 53
41. Túnel de Viento ensamblado, se deja el espacio para el ventilador y un ducto conector. 54
42. Modelo para simulación del túnel de viento. 55

43. Disposición del túnel de viento en el LER. 56
44. Codo sin álabes. Campos de velocidad en la figura superior y perfil de velocidad en la salida en la figura inferior. 58
45. Codo con 16 álabes. Campos de velocidad en la figura superior y perfil de velocidad en la salida en la figura inferior. 59
46. Codo contracción con 16 álabes. 60
47. Codo con radio interno diferente al radio externo y álabes con espaciamiento y radio variable. 61
48. Alabes de 500[mm] de radio, 30 [Pa] de pérdida de carga 62
49. Simulación Codo Difusor. 62
50. Simulación Codo Contracción. 63
51. Simulación 2D Codo con 11 álabes deflectores radio de 250[mm]. Campo de velocidades. 64
52. Simulación 3D del codo de 11 álabes y radio constante. 65
53. Simulación 3D del codo de expansión con álabes de diferente radio. 65
54. Simulación 3D del codo de expansión en flujo inverso con álabes de diferente radio. 66
55. Simulación con espiras elípticas para conseguir un perfil de capa límite del 30 % de la altura total de la Fetch. 67
56. Muestras del perfil vertical de velocidades a una distancia desde el borde de la espira equivalente a 6 veces el alto de ésta. 68
57. Simulación con espiras triangulares para conseguir un perfil de capa límite del 50 % de la altura total de la Fetch. 69
58. Muestras del perfil vertical de velocidades a una distancia desde el borde de la espira equivalente a 6 veces el alto de ésta. 70
59. Simulación con espiras triangulares para conseguir un perfil de capa límite del 30 % de la altura total de la Fetch. 71
60. Simulación con espiras triangulares para conseguir un perfil de capa límite del 30 % de la altura total de la Fetch. 72
61. Simulación del difusor adaptado para el ventilador del LER. Gráfica de velocidad. 73
62. Simulación del difusor adaptado para el ventilador del LER. Gráfica de líneas de flujo. 73
63. Difusor sin elementos de control de capa límite. Campos de velocidad. . . . 74
64. Simulación del difusor con 3 placas divisoras horizontales y 3 verticales. Campos de Velocidad 74
65. Modelo del difusor con pantallas esféricas. 75
66. Cantidad de pantallas para un funcionamiento correcto según el ángulo de apertura del difusor y la razón de áreas.[31] 76
67. Constante K de pérdida de presión combinado de ambas pantallas para diferentes razones de área.[31] 77
68. Difusor Iteración 1. 78
69. Difusor Iteración 2. 79
70. Difusor Iteración 3. 80
71. Contracción, modelo 3D. 81
72. Contracción, campos de velocidad. 82
73. Honeycomb, en rojo se ve una de las secciones de bombillas y en azul se ve la placa que las aprieta hacia abajo. 84
74. Ventiladores Helicoidales Tubulares Soler & Palau 86

75. Curvas del ventilador que movería el flujo en paralelo con otro. 86
76. Curvas del ventilador que movería el flujo individualmente. 87
77. Curva del sistema y curvas de los ventiladores propuestos. 88
78. Malla computacional para configuración de tamaño de elementos general de $50[mm]$ 90
79. Gráfico de convergencia de residuales. 91
80. Gráfico de convergencia de ΔP. 91
81. Magnitud de Velocidad a lo largo del túnel de viento. 92
82. Presión Estática a lo largo del túnel de viento. 92
83. Presión Total a lo largo del túnel de viento. 93
84. Intensidad Turbulenta porcentual a lo largo del túnel de viento. 93
85. Malla computacional para Túnel de Viento con bloque de prueba. 94
86. Magnitud de Velocidad a lo largo del túnel de viento con bloque de pruebas. 95
87. Presión Estática a lo largo del túnel de viento con bloque de pruebas. . . . 95
88. Presión Total a lo largo del túnel de viento con bloque de pruebas. 96
89. Intensidad turbulenta porcentual a lo largo del túnel de viento con bloque de pruebas. 96
90. Curva de presión vs velocidad resultante del ventilador TGT/2-560-6/18°-5,5kW. 97
91. Magnitud de Velocidad a lo largo del Túnel de Viento con condición de borde Intake Fan. 98
92. Presión Total lo largo del Túnel de Viento con condición de borde Intake Fan. 98
93. Plano general del Túnel de Viento. 102
94. Generación de energía por paneles solares y consumo por el Túnel de Viento en un día promedio. 104
95. Simulación Fetch con espira de gran tamaño. 112
96. Simulación Fetch con espiras más pequeñas. 112
97. Simulación Fetch con Elementos de Rugosidad 113

Índice de Tablas

1. Características principales de los túneles de viento más adecuados disponibles en la USM. 11
2. Características de la capa límite atmosférica tipo. 42
3. Resumen de criterios de simulación. 57
4. Caídas de presión para diferentes configuraciones de álabes. 59
5. Pérdida de presión e Índice de Uniformidad para simulaciones finales de los codos 2D. 64
6. Pérdida de presión e Índice de Uniformidad para simulaciones finales de los codos 3D. 64
7. Configuración común para las simulaciones de las Fetch. 66
8. Resumen de datos de las diferentes iteraciones del difusor. 80
9. Parámetros de diseño de la contracción 81
10. Parámetros de diseño de la contracción. 82
11. Pérdidas de carga por sección, la CP1 no se agrega porque está contabilizada en la pérdida de carga de la contracción. 85
12. Datos de análisis de independencia de malla. 89
13. Dimensiones máximas para un modelo cúbico. 99
14. Tabla de datos Acero Galvanizado. 101
15. Tabla de datos MDF RH. 101
16. Tabla de datos Acrílico. [38] 101
17. Resumen de costos de equipos, instrumentos y materiales para el Túnel de Viento prototipo. 103
18. Resumen de costos total. 103
19. Resumen de costos de operación. 104

1. Introducción

1.1. Declaración del problema

La matriz energética de Chile tiene un alto consumo de combustibles fósiles. La transición energética a energías renovables está ocurriendo y está fomentada por planes gubernamentales como la ley 20/25 de Energías Renovables No Convencionales y el Plan de Descarbonización para el 2040. Tanto para el diseño de máquinas para energías renovables como para la evaluación de su comportamiento con las condiciones de sitio se requieren hacer pruebas. El costo de hacer una prueba a escala real es mucho mayor que en un modelo a escala o computacional, por ello es que el recorrido común de un producto es el siguiente:

1. Concepto
2. Diseño
3. Modelo
4. Prototipo
5. Producto

Variaciones de este procedimiento también se pueden encontrar en proyectos de estructuras, energía, aeronáutica, automovilismo, agricultura, ingeniería espacial, marítima y de vientos entre muchas otras aplicaciones.

Cada una de estas etapas tiene cierto nivel de incertidumbre y costos. Como regla general, entre menor la incertidumbre de la etapa con respecto al producto final, mayores los costos.

Siguiendo con esta idea, el modelo es una forma de probar el sistema sin asumir los costos totales de construcción. Para probar un modelo se requiere replicar las condiciones de operación a las que se someterá. Tanto en evaluaciones de desempeño de aerogeneradores, carga de viento en edificios y estructuras, dispersión de contaminantes, sustentación de perfiles alares, distribución de viento a través de edificios y topología para confort de peatones entre otros, se deberán replicar las condiciones del flujo de viento.

Debido a todo lo anterior es que surge la necesidad de tener un túnel de viento capaz de simular flujos atmosféricos, es decir, flujos que tengan un perfil de velocidades y turbulencia semejante al real.

Para el desarrollo de esta memoria se destacan dos tipos de modelos:

- Modelo Computacional: Consiste, en simples palabras, en crear un modelo a escala real de los elementos de interés en un software CAD, seleccionar la región que afecta a los elementos como un volumen de control y subdividirlo en otros pequeños volúmenes de control para aplicar las ecuaciones de Navier-Stokes en cada uno de ellos donde se harán aproximaciones para simular la interacción entre ellos.
- Modelo en Túnel de Viento: Consiste en construir un modelo a escala del producto e introducirlo en la cámara de pruebas de un túnel de viento en donde se aplicarán las condiciones equivalentes de operación para dicha escala.

La desventaja del Modelo Computacional es que, como se basa en aproximaciones, su resultado debe ser validado por un experimento. Es por esto que al Modelo Computacional suele seguirle el Modelo en Túnel de Viento.

1.1.1. Túneles de Viento Disponibles en la Universidad

A continuación se analiza la posibilidad de transformar un túnel de viento disponible en la universidad.

Se encontraron los siguientes túneles de viento entre Casa Central (CC), Campus Vitacura (CV) y Campus San Joaquín (CSJ).

- Túnel de Viento Termofluidos - Depto de Ingeniería Mecánica - CC
- Túnel de Viento Laboratorio Mecánica de Fluidos - Depto. Química y Ambiental - CC
- Túnel de Viento 2D - Arquitectura - CC
- Túnel de Viento Leybold - Depto. De Física - CC
- Estación de Conversión Energía Eólica / Eléctrica - Depto. de Industrias - CC
- Túnel de Viento Gunt - Laboratorio de Gestión Energética - Depto. de Industrias - CV
- Túnel de Viento Termohidráulica - Depto. de Ingeniería Mecánica - CSJ

Los únicos túneles de viento capaces de suministrar un flujo de aire con la suficiente calidad como para un prueba confiable son el de Termofluidos, el de Termohidráuica y el Gunt de Industrias. Los tres poseen cámaras de prueba demasiado pequeñas para estudios sensorizados y muy cortas como para permitir un desarrollo de capa límite suficiente para simular un perfil de capa límite atmosférica a escala. Se hace un estudio más detallado de las capacidades, instrumentos y características de cada túnel en la Sección 2.3.

1.2. Generalidades

Es por esto que existe la necesidad de diseñar un túnel de viento capaz de simular flujos atmosféricos, con suficiente espacio de prueba para realizar ensayos aerodinámicos con modelos sensorizados de edificios, torres de radio, torres meteorológicas, sondas meteorológicas cautivas, turbinas eólicas, drones, torres para control de heladas y estudiar los fenómenos de la capa límite atmosférica sobre terreno complejo, el efecto del viento en estructuras, ondas de gravedad, propagación de incendios, difusión de especies químicas y/o contaminantes aerotransportados, entre otras aplicaciones. Dicho túnel de viento debe contar con un sistema preciso para la regulación de los parámetros del flujo, medición de variables físicas y procesamiento de datos que sirvan para análisis cuantitativos y cualitativos en diversos temas de investigación, actividades docentes y prestación de servicios a empresas.

Objetivo General:

Diseñar y simular numéricamente un túnel de viento subsónico de circuito cerrado para flujos atmosféricos para el Laboratorio de Energías Renovables.

Objetivos Específicos:

- Estudiar el estado del arte sobre el diseño y construcción de túneles de viento atmosféricos.

- Diseñar el túnel de viento básico que permita dimensionar los componentes de acuerdo a los parámetros constructivos normados y limitaciones espaciales del sitio de emplazamiento.
- Simular numéricamente el flujo interior del túnel, considerando diversas condiciones de operación y configuración constructiva.
- Ajustar el diseño del túnel de viento en base a un análisis de optimización, y generar los planos del sistema definitivo.
- Definir y cotizar de los componentes y materiales para la estructura, equipos y software.
- Proponer un layout (arreglo de disposición) del banco de prueba en el LER.

Como limitación, se debe considerar el layout del Laboratorio de Energías Renovables de la sede José Miguel Carrera visible en la Figura 1, pues el túnel de viento estará limitado en dimensiones para que pueda ser situado dentro del laboratorio sin tapar puertas o portones ni estorbar el paso de maquinaria a través de éstos. En esta imagen se muestran demarcaciones rojas para darse una idea de las dimensiones del laboratorio, las verdes representan los equipos, en azul una cañería para el escape de gases de la caldera y en morado cables y conexiones.

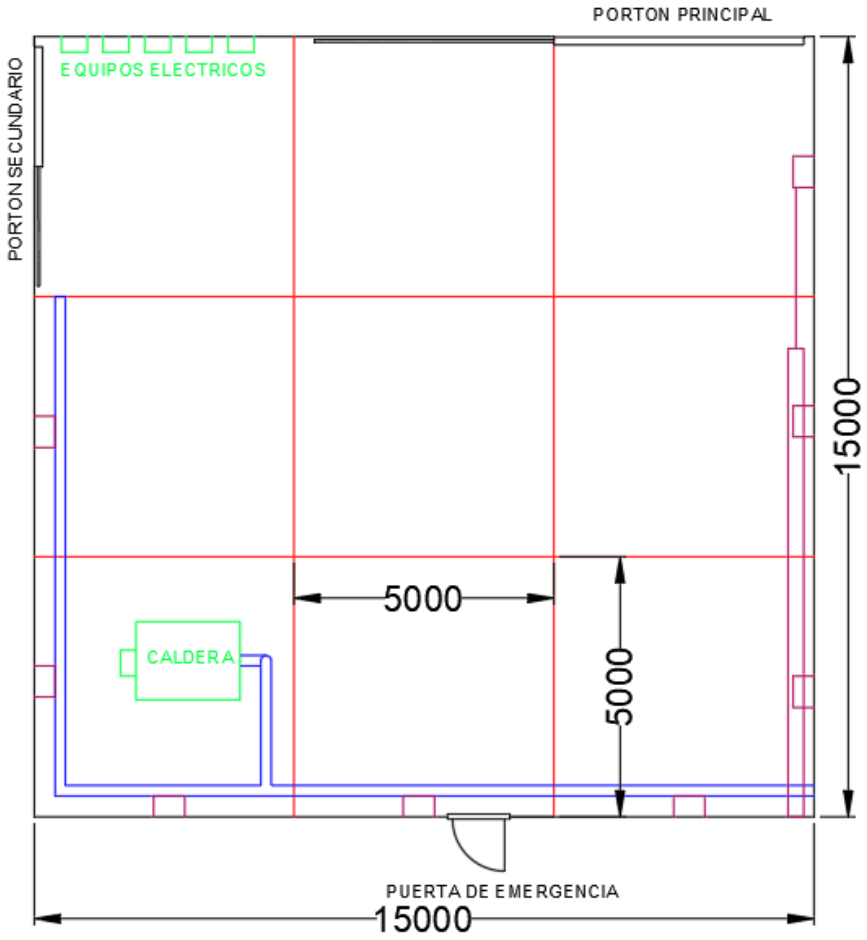


Figura 1: Layout del LER, medidas en milímetros.
Fuente: Propia - AutoCAD.

1.3. Metodología

1. Estado del Arte: Se hará una revisión bibliográfica en relación al diseño de túneles de viento, cálculo de pérdidas de carga, metodologías de simulación de componentes y túneles completos, equipos actuales instalados y sus componentes.
2. Diseño: Con la información encontrada, se procederá a ocupar las ecuaciones y recomendaciones para hacer una primera iteración del diseño del túnel, se verificará el tamaño y se harán modificaciones para que tenga una mejor relación con la disponibilidad de espacio del LER.
3. Simulación Numérica: Se verificará que el diseño del túnel genere una buena calidad del flujo en las cámaras de prueba y no haya separación de flujo o estancamientos que provoquen fluctuaciones y/o pérdidas de carga innecesarias. Se ocupará el software ANSYS FLUENT para la simulación numérica. Se realizará la simulación para varios casos de prueba y configuraciones de simulación.
    - Se ocupará el modelo de turbulencia $k-\omega$ SST para realizar las simulaciones principales.
4. Ajustes y Generación de Planos: Se optimizará el diseño en base a la simulación. Una vez congelado el diseño, se procederá a hacer el diseño constructivo en Autodesk Inventor Professional y se generarán planos para concretizar las dimensiones.
5. Componentes y Materiales: Se definirá el material de los componentes que no hayan sido definidos en las fases anteriores. Se cotizarán componentes, instrumentos y materiales que sean importantes y posiblemente ponderantes en costos.
6. Se dibujará un plano del LER y se definirá lugar y zonas para el equipo completo junto con las vistas que se consideren relevantes del equipo en el laboratorio.

2. Estado del Arte

2.1. Orígenes

Las ansias del ser humano por volar lo llevó al estudio del efecto del viento sobre diferentes superficies. Al no poder encontrar un flujo de viento estable, que se asemejara a las condiciones de vuelo de las aves y que estuviese a mano, los investigadores comenzaron a generar su propio flujo de viento.

Comenzaron con brazos giratorios, con la desventaja de que los modelos atravesarían su propia estela y la dificultad de poner sensores en un armazón que gira. Tiempo después, en el año 1871, se construye el primer túnel de viento bajo el concepto de hacer pasar aire a través de un ducto cerrado, facilitando la implementación de sensores.[1]

2.2. Diferentes tipos y aplicaciones

Los túneles de viento se diferencian principalmente a través de las siguientes categorías:

- Velocidad de Flujo
- Tipo de Circuito

2.2.1. Velocidad de Flujo

1. De capa límite: Suelen ser de muy bajas velocidades, con secciones de prueba amplias y lo suficientemente largas como para lograr un flujo desarrollado y capa límite que se asemeje, con su respectivo escalamiento por el modelo, a la capa límite del viento contra la superficie.
2. Subsónicos: Mach $< 0{,}8$. Notar que cuando el Mach es menor a 0.3, el flujo se puede considerar incompresible, aunque el fluido sea compresible (como el aire).[1]
3. Transónicos: $0{,}8 <$ Mach $< 1{,}2$. Llegan a velocidades cercanas a la del sonido. Los aviones comerciales suelen ser probados en este tipo de túneles, puesto a que operan a estas velocidades. Problemas adicionales hay en este tipo con respecto al subsónico debido a la reflexión de las ondas de choque.[1]
4. Supersónicos: $1{,}2 <$ Mach < 5 Utilizados normalmente en la industria aeronáutica militar para el diseño de aviones jet y tests en turbinas de este tipo. Estas velocidades se logran gracias a un buen diseño de una tobera convergente - divergente. Suelen usarse de manera intermitente por sus condiciones de operación.[1]
5. Hipersónicos: Mach > 5. Este es un tema especial, puesto que la caída de temperatura en la tobera es tan alta que el aire podría volverse líquido. Es por ello que suele precalentarse el aire. Son utilizados principalmente en el diseño de cohetes y vehículos espaciales.[1]

2.2.2. Tipo de Circuito

Circuito Abierto: Corresponde al túnel de viento que capta aire desde el ambiente y lo entrega al final de la ductería. Un modelo representativo se puede ver en la Figura 2. Suelen tener las siguientes partes:

- Cámara de estabilización
- Contracción
- Vena de Ensayos
- Difusor
- Ventilador

Circuito Cerrado: A diferencia del anterior, hace circular el aire que tiene en el circuito. Tiene algunas aperturas para permitir la entrada de aire nuevo y estabilizar la presión con la presión de ambiente. Existen también algunos túneles de circuito cerrado herméticos. A este tipo se le agrega como sección los codos, los cuales necesitan deflectores de flujo para mantener la homogeneidad del perfil de velocidad. Se puede ver una referencia de este tipo de túneles en la Figura 3.



Figura 2: Túnel de viento de circuito abierto.[2]

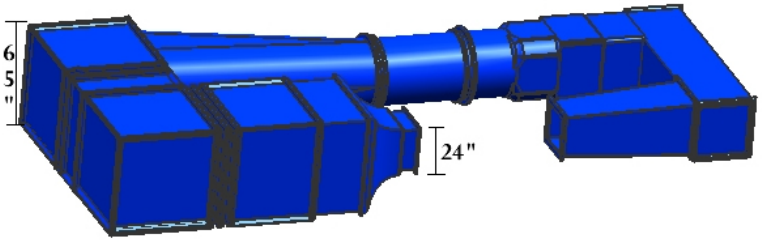
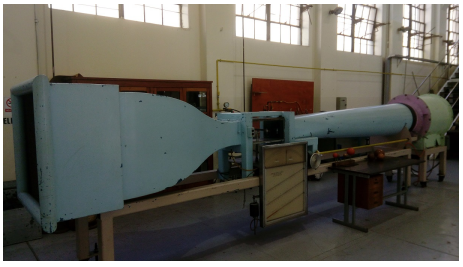


Figura 3: Túnel de viento de circuito cerrado.[3]

2.3. Análisis de los Túneles de Viento Existentes en la Universidad

El uso de túneles de viento en la Universidad Técnica Federico Santa María (desde ahora USM) está destinado tanto a docencia, investigación y servicios a externos. No todos tienen las capacidades para tomar mediciones o aseguran un flujo uniforme en la cámara de pruebas. Entre los equipos analizados se encuentran:

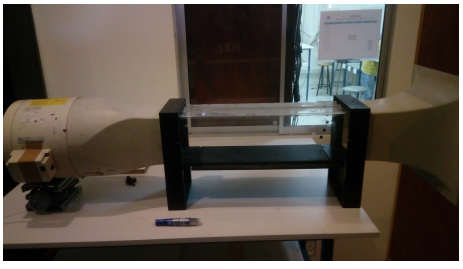
- Túnel de Viento Termofluidos - Casa Central



- Unidad de Demostraciones Ventilador Axial - Departamento Química y Ambiental - Casa Central (El departamento de Industrias posee uno similar)

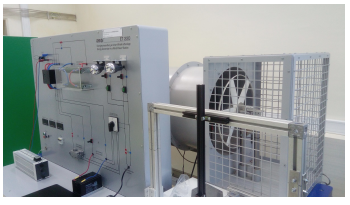


- Túnel de Viento Leybold Departamento de Física - Casa Central

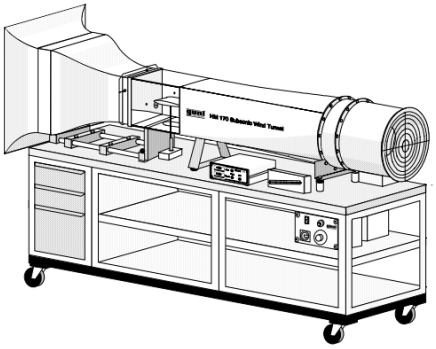


- Estación de Conversión Energía Eólica / Eléctrica - Departamento de Industrias - Casa Central

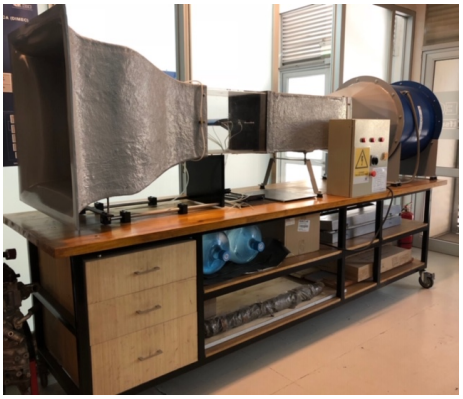




- Túnel de Viento Gunt - Laboratorio de Gestión Energética - Departamento de Industrias - Campus Vitacura



- Túnel de Viento - Termo-hidráulica - Departamento de Ingeniería Mecánica - Campus San Joaquín



- Túnel de Viento 2D - Arquitectura - Casa Central



2.4. Usos

Los equipos tienen características que los diferencian entre sí, algunas son muy específicas. Aún así, se pueden clasificar bajo estos cuatro ítemes:

- Docencia - Visualización: Capaces de mostrar formas de flujo. Uso para experiencias de laboratorio.

- Docencia - Mediciones: Capaces de tomar mediciones de presión, velocidad, temperatura y fuerzas de arrastre y/o sustentación. Uso para experiencias de laboratorio.
- Investigación: Usados en memorias, tesis, papers científicos entre otros. Con capacidad de visualización y/o mediciones con una precisión más allá de lo necesario para experiencias de laboratorio.
- Servicios: Usados para calibración de instrumentos y toma de mediciones en modelos para empresas externas.

Equipo	Departamento	Campus	Docencia Demostrativo	Docencia Mediciones	Investigación	Servicios
TV - Termofluidos	Mecánica	Casa Central				
Unidad de Demostraciones Ventilador Axial	Química y Ambiental	Casa Central				
TV - Leybold	Física	Casa Central				
Módulo Experimental de Energía Eólica	Industrias	Casa Central				
TV - Gunt	Industrias	Campus Vitacura				
TV - Termohidráulica	Mecánica	Campus San Joaquín				
TV- 2D Arquitectura	Arquitectura	Casa Central				

Figura 5: Usos de los equipos túneles de vientos y similares USM. Verde: Cumple sus capacidades. Dorado: Tiene algunos problemas para cumplir.

El túnel de viento requerido necesita cumplir con los cuatro tipos de usos descritos anteriormente, por lo que se descartan aquellos que no puedan ser adaptados. El TV Leybold está desarmado, es muy pequeño y el departamento de física no tiene planes de usarlo y le faltan partes. La Unidad de Demostraciones Ventilador Axial no posee cámara de pruebas, no está diseñado para poner un modelo adentro y por lo tanto se descarta. El Módulo Experimental de Energía Eólica no es un túnel de viento de por sí, pero es interesante rescatar que tiene una instrumentación tan detallada que permite hacer todo el análisis desde un panel de control, sin intervenir el equipo más allá de de colocar el modelo (el cual en este caso no se puede remover). El Túnel de Viento 2D del Departamento de Arquitectura se encuentra actualmente desarmado[1] y la altura de la cámara de pruebas es de 3 $[cm]$, dejando la posibilidad de ocupar sólo modelos planos, aunque es notable que por su cámara de homogeneización entra humo y sale en forma de líneas visiblemente definidas. Por ello, el descarte deja disponible sólo tres equipos, dos del Departamento de Mecánica y uno del Departamento de Industrias.

Tanto los equipos Gunt de Vitacura, Termofluidos y Termo-hidráulica tienen dimensiones parecidas. El primero tiene la mayor razón de contracción, generando la mejor calidad de

[1] Información correspondiente al semestre 2018-2

flujo en la cámara de pruebas, pero sus equipos de medición están desajustados, desactualizados e incluso algunos no funcionan bien. Otro problema que tiene es que el control de velocidad se hace girando una palanca manualmente que cierra un diafragma, cuando podría ser más eficiente usando un variador de frecuencia. El de Termo-hidráulica fue diseñado pensando hacer una réplica del Gunt, por lo que tienen características similares. Se resumen las características en la Tabla 1.

Equipo	Dimensiones C.P. $[mm]$	Velocidad Máxima $[m/s]$
Termofluidos	360x360x610	Entre 50 y 79
Gunt	290x290x430	28
Termo-hidráulica	340x340x500	39

Tabla 1: Características principales de los túneles de viento más adecuados disponibles en la USM.

A simple vista se puede notar que ninguno de los tres túneles de viento tiene las dimensiones necesarias para producir una capa límite gruesa que permita hacer análisis de flujos atmosféricos sobre estructuras y otros.

2.5. Climatic Wind Tunnel - Universidad de Ontario - Canada

Diseñado para proveer simular condiciones para una gran cantidad de industrias. Los equipos que contiene permiten estudiar condiciones como lluvia, nieve, radiación solar, escarcha, ciclos solares, temperaturas entre $-40°C$ a $60°C$, vientos de hasta $300[km/h]$ y humedades entre el 5 % y el 95 %. Tiene una boquilla de tamaño variable entre $7[m^2]$ a $14{,}5[m^2]$.[4]

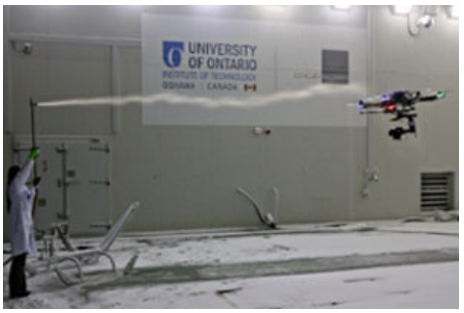


Figura 6: Climatic Wind Tunnel - University of Ontario - Canada [4]

Entre sus aplicaciones están, entre otros:

- Industria Aeroespacial
- Arquitectura
- Atletismo
- Automovilismo
- Energía y Combustibles
- Tests de Capacidades Humanas
- Dispositivos Aéreos manejados de manera remota



Figura 7: Climatic Wind Tunnel - University of Ontario - Canada [4]

2.6. Low Subsonic Wind Tunnel - Universidad Federal de Uberlandia - Brazil

La Universidad Federal de Uberlandia (en adelante UFU) tiene a su disposición un túnel de viento de circuito cerrado, baja velocidad y tamaño medio. Los detalles de su diseño están en el artículo "Low Subsonic Wind Tunnel - Design and Construction" de Almeida et al. Especial interés hay en este túnel debido a la detallada información de su construcción y diseño de su único ventilador. Además, las simulaciones de flujo demostraron que un mal diseño de los álabes deflectores de flujo podría empeorar la calidad del flujo en la cámara de ensayos. Algunos aspectos importantes están anotados a continuación [5]:

- Está dispuesto en posición horizontal. El equipo entero mide aproximadamente 30$[m]$ de largo y 10$[m]$ de ancho.
- La cámara de pruebas tiene 1,7$[m]$ de ancho, 1,2$[m]$ de alto y una longitud de 3$[m]$. Puede llegar a velocidades de 90$[m/s]$ con un nivel de turbulencia de entre el 0,2 % y el 0,5 %.
- Posee un ventilador trifásico de 350$[HP]$ (261$[kW]$) aislado de la estructura del túnel generando a una percepción nula de los efectos vibratorios de éste en la cámara de pruebas. Pesa 2 toneladas. Posee además un sistema de refrigeración por aire.
- La estructura es un armazón compuesto de vigas de SAE1020 soldada con MIG de 2$[mm]$ de ancho y cubierta con enchapado de madera naval.
- Los lados del difusor más pequeño están hechos de MDF de 18$[mm]$ de espesor. Las juntas fueron selladas con resina plástica para evitar deformaciones permanentes.
- La cámara de pruebas está unida al marco ocupando un pegamento de PVC a modo de disminuir la vibración. Los tornillos que unen la cámara con la estructura fueron cubiertos con resina plástica. Las juntas fueron selladas con un compuesto con base de PVC. Posee una puerta transparente de policarbonato.
- La contracción fue hecha con MDF Naval.
- Los álabes de las guías de flujo fueron hechos mayoritariamente con fibra de vidrio, debido a su buena calidad superficial y peso reducido en comparación al acero.



Figura 8: Túnel de Viento de la Universidad Federal de Uberlandia, Brazil.[5]

2.7. Laboratorio de Estructuras y materiales de Alta Tecnología LeMAT - Universidad Autónoma de México.

Diseñado entre un grupo de investigadores de la Universidad Autónoma de México (desde ahora, UNAM) y Aerolab, una empresa canadiense de túneles de viento, es un túnel de vientos de flujos atmosféricos de circuito cerrado con dos cámaras de prueba. Sus dimensiones máximas son de 37,75$[m]$ de largo por 13,9$[m]$ de ancho. Otras características importantes son [6]:

- Cámara de pruebas N°1: Para estudios de capa límite. Posee dos áreas de pruebas de 3$[m]$ de ancho por 2$[m]$ y una distancia entre ambas de 14$[m]$. Cada área de prueba tiene una mesa giratoria que permite el estudio del viento a diferentes ángulos de ataque.
- Cámara de pruebas N°2: 4,3$[m]$ de ancho por 4$[m]$ de alto y 5$[m]$ de largo.
- Velocidad máxima de 100$[km/h]$ equivalente a un huracán de categoría 4.
- Posee un intercambiador de calor aguas arriba de la cámara de estabilización.
- Utilizado para estudios del efecto del viento sobre: estructuras, personas en espacios urbanos, equipos y movimiento de masas de aire.
- Se hizo un asesoramiento de las instalaciones por la compañía Aerolab, el cual fue realizado por el Dr. Jewel B. Barlow, director del túnel de viento Glenn L.Martin de la Universidad de Maryland.
- Como se puede ver en la Figura 9, a pesar del tamaño, entre el ventilador y el resto del túnel hay uniones de goma para amortiguar las vibraciones y que no afecten al flujo del túnel.



Figura 9: Túnel de Viento LemAT

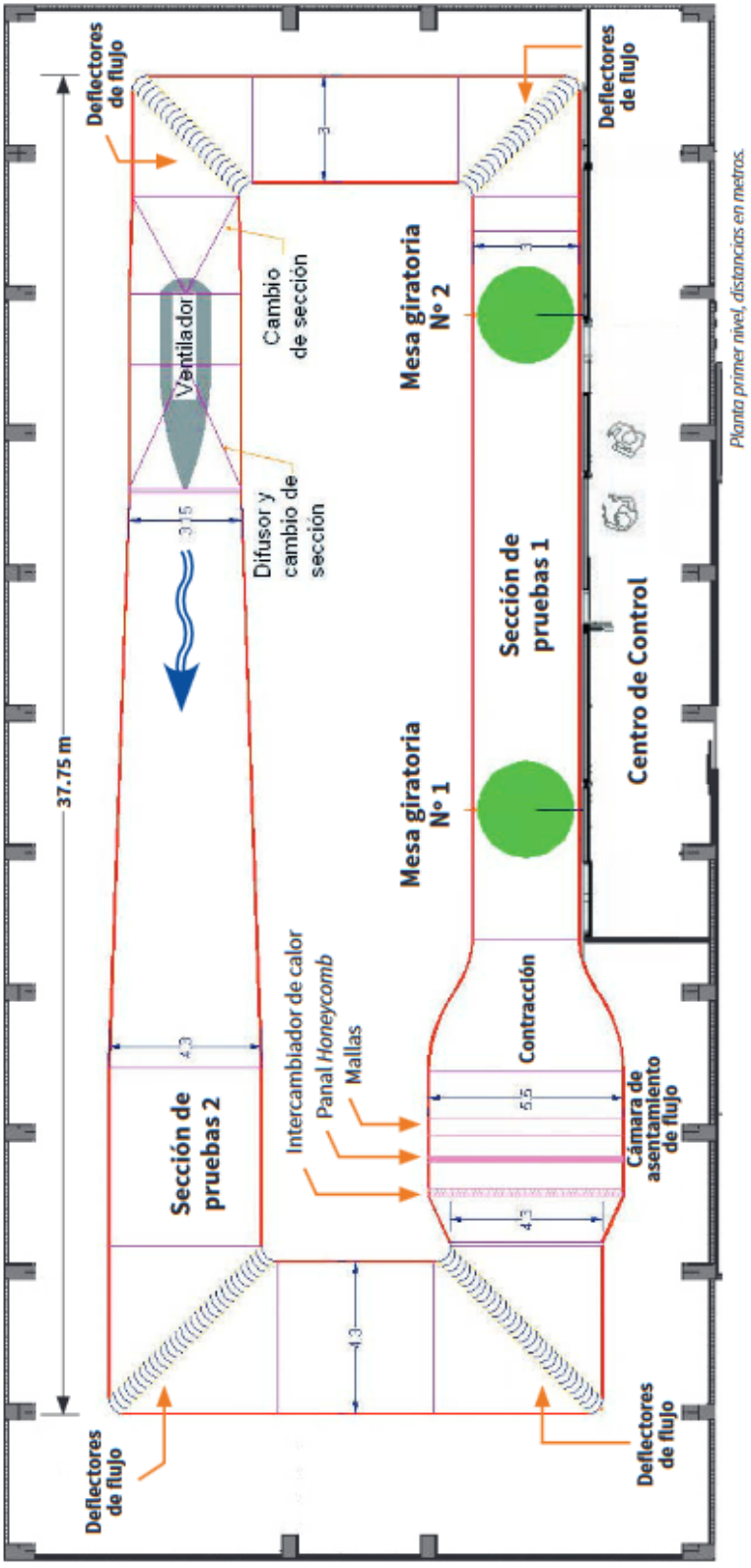


Figura 10: Túnel de Viento LemAT, vista en plano. [6]

2.8. GVPM Politecnico di Milano Wind Tunnel - Italia

El Politécnico de Milano dispone de un túnel de viento de circuito cerrado único en su estilo, el cual posee dos secciones de prueba. Una para ensayos de baja turbulencia, a la cual se le pueden quitar las tapas para cuando la interacción con las paredes sea indeseable. La otra sección tiene la función de hacer ensayos relacionados con la capa límite de la tierra. En resumen, es un túnel de viento subsónico y a la vez de capa límite.

Como se puede ver en la Figura 11, la cámara de ensayos de baja turbulencia está en la sección de abajo junto al equipo de ventiladores y la de capa límite está arriba. Mucho énfasis hay que hacer en el difusor y la contracción, porque, a diferencia del túnel de la UFU, posee un solo difusor. Otros aspectos importantes a notar se listan a continuación [7]:

- La cámara de baja turbulencia llega a velocidades de $55[m/s]$ y sus dimensiones son de $4[m]$ de ancho, $3{,}84[m]$ de alto y $6[m]$ de largo. Tiene un nivel de turbulencia menor a un $0{,}1\,\%$. Posee también una mesa giratoria de $2{,}5[m]$ de diámetro. Existe una cámara gemela intercambiable que permite la instalación de un modelo mientras se prueba el otro. La contracción tiene una razón de 3,46:1. Es usado para ensayos en modelos de helicópteros, trenes de alta velocidad, aerogeneradores pequeños, secciones de puentes y estudios de los efectos de la aerodinámica en deportes.
- La cámara de capa límite puede alcanzar velocidades de $16[m/s]$ y sus dimensiones son de $13{,}84[m]$ de ancho, $3{,}84[m]$ de alto y $35[m]$ de largo. Esta sección también contiene una mesa giratoria de $13[m]$ de diámetro y la gran longitud de esta sección está destinada para la generación de la capa límite, en donde se colocan diferentes generadores de turbulencia para permitir la correspondiente formación de capa límite y niveles de turbulencia arriba del $35\,\%$, mientras el mínimo nivel es del $2\,\%$. Esta cámara es usada para el estudio de modelos aeroelásticos de puentes de gran longitud, secciones de modelos estáticos y dinámicos de puentes, edificios, estructuras con techos grandes, aerogeneradores y granjas de energía eólica.
- La planta de poder consiste en 14 ventiladores de $100[kW]$ de $1{,}8[m]$ de diámetro cada uno. Poseen, además, variadores de frecuencia independientes.
- Existe un modelo a escala 1:9 del túnel de viento donde se prueban las modificaciones e instrumentos propuestos para el grande.
- Algunos instrumentos instalados son: Balanzas de fuerza, celdas de carga, sensores de presión, transductores de desplazamiento y acelerómetros, anemómetros de 3 componentes de hilo caliente, PIV, generadores de humo, cámaras de velocidad y suministro de aire comprimido por nombrar algunos.

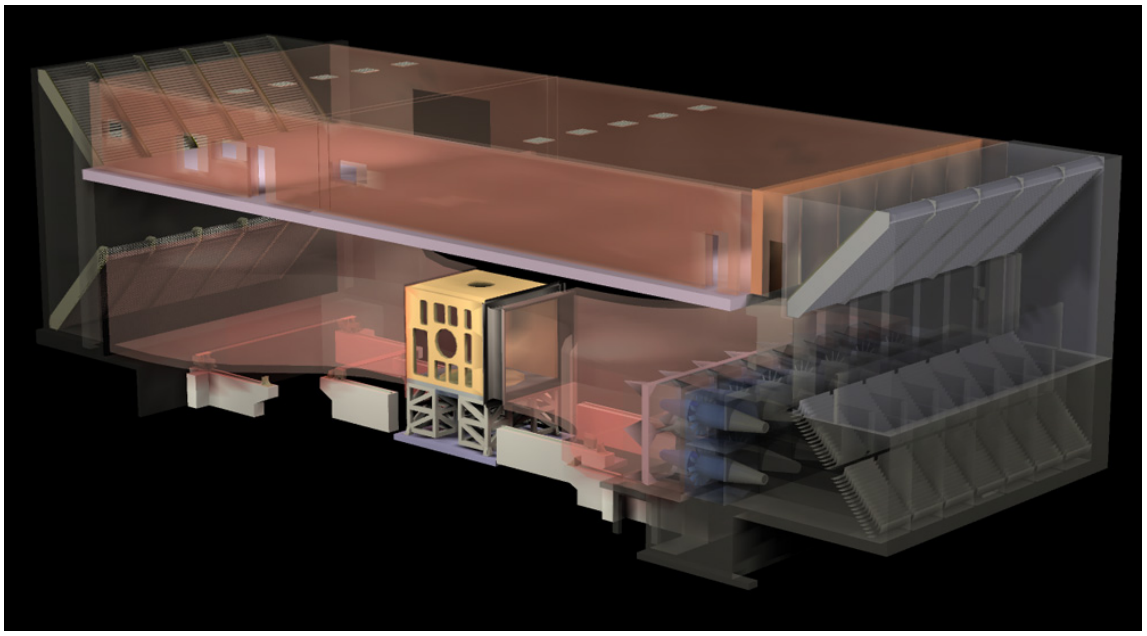


Figura 11: Túnel de Viento del Politécnico de Milano.[7]

2.9. Boundary Layer Wind Tunnel 2 - University of Western Ontario

La Universidad de Western Ontario posee dos túneles de viento destinados al estudio del efecto de los vientos teniendo en consideración la capa límite terrestre.

El primero fue construido en el año 1965, convirtiéndose en el primer túnel de viento para testeo de estructuras hechas por el hombre. Llega a velocidades de $55[km/h]$ y se le reconoce por el nombre de Boundary Layer Wind Tunnel 1 o por sus siglas BLWT1. El segundo fue construido el año 1984 y llega a velocidades de $100[km/h]$, se le reconoce como BLWT2. Estos equipos han prestado servicio a la industria de la construcción por más de 45 años. Algunas características del segundo túnel de viento son [8]:

- La cámara de alta velocidad llega hasta los $100[km/h]$ y permite escalar velocidad y número de Reynolds más allá que el BLWT1. Se ocupa para perfiles de modelos de puentes y torres.
- La sección aguas abajo de esta cámara se ocupa para estudiar las presiones y el comportamiento aeroelástico en edificios y otras estructuras. El conjunto de estas dos cámaras tienen un tamaño de $3{,}4[m]$ de ancho, $2{,}5[m]$ de alto y $39[m]$ de largo.
- La cámara de baja velocidad llega hasta los $36[km/h]$ y está destinada para escalamientos a través del número de Froude con ensayos sobre puentes largos, estudios topográficos, dispersión no solo de contaminantes, sino que también de nieve y lluvia. Además posee un canal hidráulico para la interacción entre el oleaje y el viento con estructuras y barcos. Las dimensiones de esta cámara son $5[m]$ de ancho, $4[m]$ de alto y $52[m]$ de largo.
- Tiene un ventilador de $2{,}4[m]$ de diámetro con una potencia de $240[HP]$ ($\sim 180[kW]$).

Las dimensiones totales del BLWT2 son de 15x6x64$[m]$. Estos túneles de viento se han utilizado para estudios en más de 1000 proyectos a nivel mundial. Algunos de éstos son el World Trade Center de Nueva York, la torre Willis en Chicago, el puente de la Confederación en la isla Príncipe Edward y la Torre CN en Ontario, Canadá.

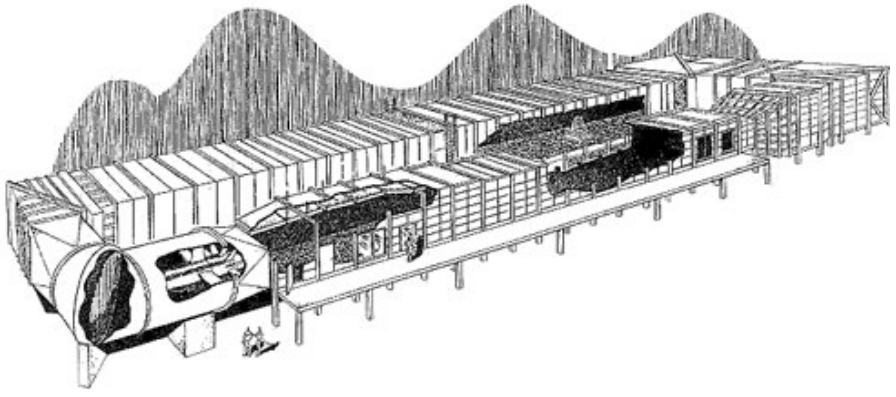


Figura 12: Boundary Layer Wind Tunnel 2 - Universidad de Western Ontario, Canadá

2.10. Túnel de Viento - Instituto Tecnológico y de Energías Renovables - Islas Canarias

Corresponde a un túnel de viento subsónico de circuito cerrado capaz de simular flujos para ensayos aeronáuticos gracias a su buena uniformidad de flujo y baja turbulencia, aunque su diseño original está destinado a ensayos civiles. Puede albergar también modelos a escala real.[9]

- La cámara de prueba es de $2[m]$x$2[m]$x$3[m]$ y el flujo puede llegar a velocidades de $56[m/s]$ en configuraciones normales y hasta $48[m/s]$ en configuración aeronáutica.
- La calidad del flujo para ensayos aeronáuticos es de una uniformidad mayor al 99,5 % y un nivel de turbulencia menor al 0,5 %.
- Cuenta con nueve ventiladores axiales de $22[kW]$ y una capacidad de flujo de $24[m^3/s]$ cada uno. Sumando en total una potencia de $198[kW]$ y un flujo de $216[m^3/s]$
- Sus usos contemplan las áreas de arquitectura, ingeniería civil, aeronáutica, energías renovables y entrenamientos deportivos.
- Su instrumentación contempla un variador de frecuencia de $220[kW]$, balanza de seis componentes, escáner de presión, anemómetro de hilo caliente, tubos pitot entre otros.

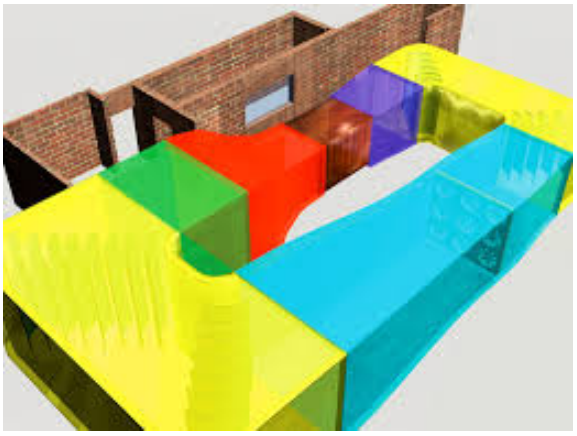


Figura 13: Túnel de Viento del Instituto Tecnológico y de Energías Renovables

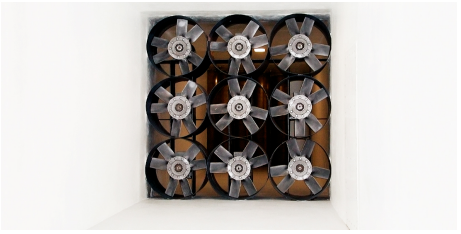


Figura 14: Ventiladores del Túnel de Viento ITER

2.11. Design Methodology for a Quick and Low-Cost Wind Tunnel

Corresponde a un artículo destinado a las ecuaciones básicas que rigen el diseño de un túnel de viento para flujos subsónicos tanto para determinar las dimensiones como para las pérdidas de carga y potencia de ventilador. Además, similar a la tesis de máster de R. Dommelen, crean un programa en Excel para determinar minimizar la cantidad de parámetros el cual es descargable desde la página de la Universidad Politécnica de Madrid. Propone ecuaciones para las siguientes secciones [21]:

- Cámara de pruebas: Dimensiones y pérdida de carga
- Contracción: Dimensiones, polinomio para la curvatura y pérdida de carga.
- Cámara de estabilización: Dimensiones, recomendaciones para el dimensionamiento de la honeycomb y pantallas y datos de pérdida de carga tanto para ambas.
- Difusores: Dimensiones y pérdida de carga.
- Codos: Dimensiones y pérdida de carga, pero hay algunos datos que no están bien definidos y son dados desde otros estudios.
- Planta de poder / Ventiladores: Ecuaciones básicas para potencia, caudal y caída de presión con referencia a la presión dinámica de la cámara de pruebas y valores recomendados de eficiencia de ventiladores. Se ocupa una configuración de varios ventiladores en paralelo, evitando así el diseño y construcción de un ventilador específico para el túnel de viento, el cual aumentaría los costos.

Se desarrolla también un ejemplo en donde se evalúa la potencia necesaria para una cámara de pruebas de $1[m^2]$ de sección a una velocidad máxima de $80[m/s]$, para el cual se obtiene una pérdida de carga de $785[Pa]$ y por consecuente una potencia total de ventiladores de $100[kW]$, por lo cual se decidió ocupar 4 ventiladores pequeños de $1[m]$ de diámetro cada uno.

Una cosa a destacar de este artículo, es que propone que todas las secciones que sean de conexión, mientras sea posible, se conviertan en difusores, para así disminuir la pérdida de carga total.

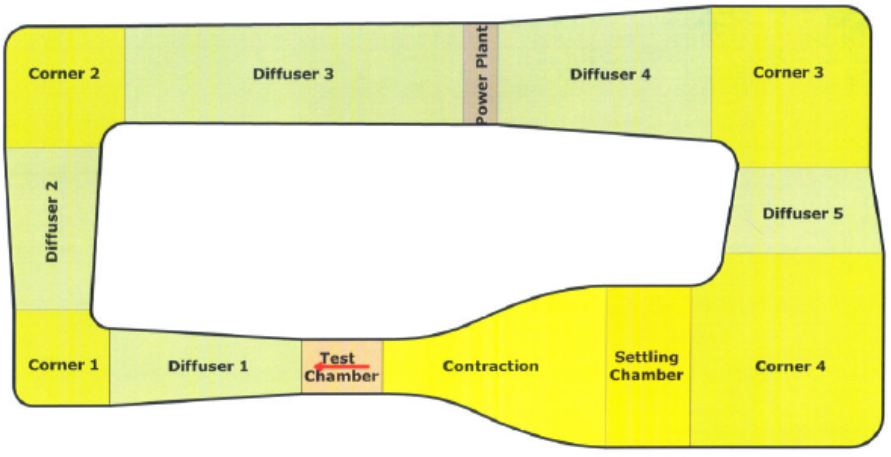


Figura 15: Esquema del tipo de túnel de viento que se propone en este artículo.[21]

2.12. Túnel de Viento Atmosférico - Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) - Universidad de la República - Uruguay

Un grupo de investigadores y docentes de la Universidad de la República diseñó y construyó un túnel de viento de capa límite atmosférica de circuito abierto, el cual comenzó su funcionamiento el año 1996. El diseño fue hecho en colaboración con la Universidad de Minesota y financiado por el CONICYT. El diseño original no contemplaba un difusor, el cual fue agregado recientemente. La universidad tenía a su disposición un túnel de viento más pequeño.

Su principal uso ha sido en obra del "Programa de Evaluación del Potencial Eólico Nacional", además de algunos trabajos sobre el efecto de los edificios sobre las mediciones realizadas por estaciones meteorológicas, calibración de anemómetros, pérdida de carga en radiadores de vehículos.

Otras características están listadas a continuación [10]:

- La cámara de ensayos tiene dimensiones de 2,25$[m]$x1,8$[m]$x17$[m]$ y la velocidad máxima en ella puede llegar hasta los 30$[m/s]$. Además, posee dos mesas de trabajo giratorias, ubicadas a cada extremo de la cámara de ensayos.
- La longitud total del túnel es de 34,8$[m]$, consta de una cámara de estabilización, contracción, cámara de ensayos, ventilador axial y un difusor.
- Su instrumentación contempla un anemómetro de hilo caliente de tres canales y sistemas para medir presión, deformación y uno para adquisición de datos. Cabe destacar que posee un brazo robótico posicionador de cuatro grados de libertad para facilitar la adquisición de datos.
- Algunas aplicaciones del túnel contemplan:
  - Difusión de contaminantes en la atmósfera.
  - Efecto de la topografía sobre el aprovechamiento de la energía eólica.
  - Efecto de obstáculos sobre el viento.
  - Confort de personas en espacios abiertos
  - Diseño y selección de sistemas destinados a la protección de espacios de usos agrícolas.
  - Diseño de carrocerías para vehículos.

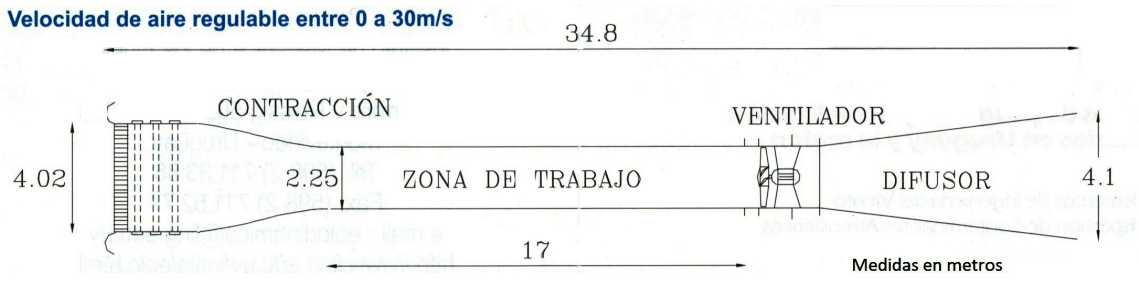


Figura 16: Dibujo esquemático del túnel de viento de IMFIA[10]



Figura 17: Foto del túnel de viento de IMFIA.[10]



Figura 18: Brazo robótico posicionador.[10]

2.13. Low-Speed Wind Tunnel Testing - J. B. Barlow, W. H. Rae, A. Pope

Este es un libro tiene como objetivo ayudar a estudiantes que estén tomando cursos de experimentos en túneles de viento y establecer una fuente de referencias para ingenieros de túneles de viento y otros que usan túneles de viento para resolver problemas de movimiento de fluidos y desarrollo de vehículos. Sin embargo, posee gran cantidad de información dedicada al diseño de túneles de viento de baja velocidad y por ello es que ha sido referenciado en varias ocasiones cuando se habla de diseño de túneles de viento.[11]

Algunos capítulos importantes son:

- 2.10 Enviromental Wind Tunnels
- 3 Wind Tunnel Design
- 16 Wind Engineering

Existe una gran variedad de capítulos importantes en el diseño de un túnel de viento, referentes a los instrumentos ocupados, a las relaciones dimensionales, a los tipos de tests y correcciones por la capa límite de las paredes entre otros, los cuales se abordarán en la medida de lo necesario.

Otro dato importante a destacar del libro es que nombra a la Subsonic Aerodynamic Testing Assosiation (SATA), formada para proveer una organización mundial de operadores de instalaciones aerodinámicas subsónicas. Sus objetivos son proveer medios para el intercambio de ideas, técnicas y soluciones a problemas asociados con experimentos del área y las instalaciones. Temas comunes a tratar son:

- Manipulación de información, instrumentación, mediciones.
- Diseño, desempeño y economía de las instalaciones.
- Operación y mantenimiento de las instalaciones.

En la página principal de SATA se puede encontrar una librería con links a páginas web de los miembros, en donde aparece información sobre los túneles de viento que ellos ocupan.

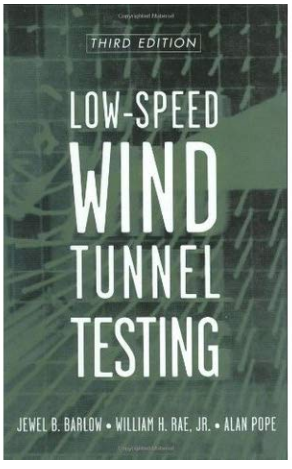


Figura 19: Portada del libro Low-Speed Wind Tunnel Testing.[11]

2.14. 8x4 Atmospheric Boundary Layer Wind Tunnel - Universidad de Cranfield - Inglaterra

Este túnel de viento corresponde a uno de capa límite atmosférica de 8 pies de ancho por 5 pies de alto y es de circuito abierto. Su cámara de pruebas de 15$[m]$ de largo permite generar las condiciones de turbulencia necesarias para simular la capa límite atmosférica de la Tierra. El túnel es suficientemente grande como para entrar sin agacharse y posee luces en las esquinas.[12]

- La cámara de pruebas es de 15$[m]$x2,4$[m]$x1,2$[m]$ y trabaja a velocidades entre 0,5$[m/s]$ y 16$[m/s]$. También posee parrillas de turbulencia y elementos de rugosidad intercambiables para simular diferentes tipos de flujo, además de una mesa giratoria.
- En temas de instrumentación, tiene una balanza de 6 componentes, sistema de escaneo de presión, anemómetro de hilo caliente de 4 canales, PIV, generador de humo de múltiples filamentos y un analizador de hidrocarburos para estudios de difusión de contaminantes.
- Algunos usos contemplan el estudio de vientos en zonas peatonales y cargas de viento en estructuras y edificios.
- A pesar del tamaño, entre el ventilador y el resto del túnel hay uniones de goma para amortiguar las vibraciones y que no afecten al flujo del túnel.



Figura 20: Túnel de Viento de la Universidad de Cranfield, Inglaterra.[12]

2.15. Low Speed Wind Tunnel L-2B - The Von Karman Institute for Fluid Dynamics

El más pequeño de los túneles de viento para flujos atmosféricos del instituto Von Karman corresponde al cual denominan L-2B, especial énfasis hay en éste porque es el más pequeño encontrado en este estado del arte. Sus principales características se describen a continuación.[13]

- Cámaras de pruebas de 0,35$[m]$ de ancho por 0,35$[m]$ de alto y un largo variable gracias a la intercambiabilidad de sus cámaras de prueba partiendo de 0,9$[m]$ hasta llegar a los 2$[m]$. Una velocidad de trabajo de hasta 35$[m/s]$
- Un motor de corriente contínua de 4,4$[kW]$ mueve el ventilador, el cual tiene una velocidad de rotación regulable gracias a un variador de frecuencia.
- Sus usos son principalmente para proyectos de cursos de Diplomado y para investigación preliminar antes de pasar a equipos más grandes, los cuales, el instituto tiene a su disposición.
- Hecho curioso son los elementos de rugosidad que se ocupan, los cuales son ladrillos tipo Lego. No es el único en ocupar este tipo de elementos y parece una buena forma para controlar la disposición de los elementos de rugosidad.

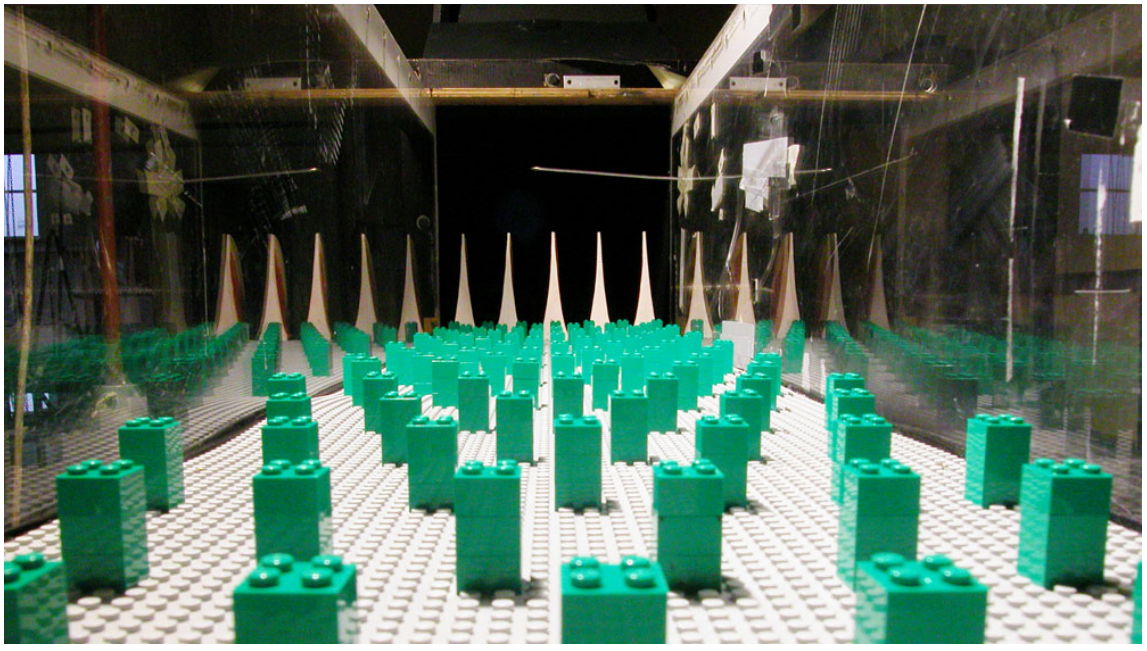


Figura 21: Túnel de viento del Instituto von Karman para Dinámica de Fluídos.[13]

2.16. UCDavis ABL Wind Tunnel UCD-ABLWT Universidad de California de Davis - Estados Unidos

Túnel de viento de circuito abierto diseñado específicamente para modelar las características turbulentas de la capa límite atmosférica. Tiene un largo total de 21$[m]$. Cuenta también con una contracción, pantallas hechas con filtros para reducir la turbulencia y pantallas de homogeneización. Además de tres espiras para producir características turbulentas deseables.[14]

- Sección de desarrollo de flujo: Esta sección cumple con la función de desarrollar la capa límite y en la descripción de túneles anteriores se ha obviado por ser parte de la cámara de pruebas, en este caso están separadas. Tiene un largo de 12,2$[m]$. Está diseñada para producir un espesor de capa límite de 1$[m]$ y velocidades de hasta 4$[m/s]$. El techo se puede ajustar para controlar el gradiente de presión a lo largo de la sección.
- La cámara de pruebas tiene un largo de 2,44$[m]$, 1,71$[m]$ de ancho y 1,2$[m]$ de alto.
- Un mecanismo de sondeo con movimiento en tres direcciones permite un posicionamiento rápido y preciso de sensores. También admite el uso de equipos generadores de humo para visualización de flujo y simular dispersión de contaminantes.
- El difusor tiene un largo de 2,37$[m]$ y provee una transición suave entre la sección cuadrada de la cámara de pruebas y la sección circular del ventilador.
- El flujo es succionado por un ventilador de 75$[HP]$ (56$[kW]$) y de diámetro de 1,83$[m]$, acoplado a un motor de corriente continua de velocidad regulable por correas. Para evitar que los efectos de remolino del ventilador afecten el flujo aguas arriba, se coloca una pantalla de homogeneización entre el ventilador y el difusor.



Figura 22: Túnel de viento de capa límite atmosférica de la Universidad de California de Davis.[14]

2.17. A validated Design Methodology for a Closed loop Subsonic Wind Tunnel

Este corresponde a un artículo destinado al uso de métodos analíticos y numéricos para el diseño de túneles de viento subsónicos de circuito cerrado, con el objetivo de diseñar un túnel de viento para la Universidad de Leeds. Los participantes fueron J. Calautit, B. Hughes, H. Chaudhry y L. Fang.[15]

Tres cosas importantes se nombran en este artículo:

- Ecuaciones para calcular la pérdida de carga en las diferentes secciones del túnel.
- El uso de placas divisoras en el difusor, las cuales permiten un difusor de mayor ángulo sin provocar separación de capa límite. Un difusor de mayor ángulo tendrá menor longitud, lo cual es muy importante cuando las limitaciones de espacio son críticas.
- Métodos para afrontar la simulación con CFD del túnel, entre eso:
  - Métodos para asegurar independencia de malla. Se ocuparon 4.245.896 elementos para simular todo el túnel. La malla computacional fue refinada y localmente enriquecida. Se fueron variando la cantidad de elementos desde 1.622.108 hasta 7.149.235.
  - Método para modelar la turbulencia. Se ocupó el RANS $k-\epsilon$ y alternativamente el RANS $k-\omega$, además del método de acople de presión SIMPLEC.

Algunas conclusiones importantes extra contemplan que el uso de guías de flujo mejora la uniformidad del flujo en un 65 % y que la mayor ponderación es por las guías de flujo instaladas aguas arriba.

2.18. Design of an Atmospheric Boundary Layer Wind Tunnel

Corresponde a una tesis de Master hecha por Rinka van Dommelen la cual se centra en el diseño de un túnel de viento de capa límite para flujos atmosféricos (ABLWT, por sus siglas en inglés) y en el desarrollo de un instrumento (o programa) para optimizar los parámetros de potencia del ventilador, las dimensiones y la velocidad de la cámara de prueba, a modo de minimizar las pérdidas de carga. Este instrumento es llamado Wind tunnel Design Instrument o WinDI. En el documento se detallan todas las ecuaciones para calcular las pérdidas de carga en cada sección. Además, se encontró que la ecuación propuesta por Barlow en 1999 para el cálculo de pérdidas de presión en difusores cuadrados está errónea y corrige los polinomios basándose en datos experimentales.[16]

2.19. Resumen de Túneles de Viento Encontrados

				Cámara de Pruebas / Sección Desarrollo Capa Límite				
Nombre	**Ubicación**	**Circuito**	**Tipo**	**Longitud [m]**	**Ancho [m]**	**Alto [m]**	**Velocidad [m/s]**	**Potencia Ventilador [kW]**
Low Subsonic Wind Tunnel	Universidad Federal de Uberlandia Brazil	Cerrado	LS	3	1.7	1.2	90	261
LemAT	Universidad Autónoma de México	Cerrado	LS	5	4.3	4	28	-
			ABL	14	3	2	-	
GVPM	Politécnico de Milano - Italia	Cerrado	LS	6	4	3.84	55	1400
			ABL	35	13.84	3.84	16	
BLWT2	University of Western Ontario Canada	Cerrado	LS	39	3.4	2.5	28	140
			ABL	52	5	4	10	
ITER	Instituto Tecnológico y de Energías Renovables -Islas Canarias	Cerrado	LS	3	2	2	56 - 48	22
IMFIA	Universidad de la República - Uruguay	Abierto	ABL	17	2.25	1.8	30	-
	Universidad de Cranfield	Abierto	ABL	15	2.4	1.2	16	-
Leeds	Universidad de Ontario - Canada	Cerrado	LS	1	0.5	0.5		-
Closed David ABL*	Universidad Tecnológica de Einhoven Países Bajos	Cerrado	ABL	5	0.6	0.7	12	0.605
Closed CF1*	Universidad Tecnológica de Einhoven Países Bajos	Cerrado	ABL	8	1.5	1	10	11.5
Closed CF2*	Universidad Tecnológica de Einhoven Países Bajos	Cerrado	ABL	8	1.5	1	11	11.5
Closed AF1*	Universidad Tecnológica de Einhoven Países Bajos	Cerrado	ABL	11	2	1.5	20	27
Open AF2*	Universidad Tecnológica de Einhoven Países Bajos	Abierto	ABL	11	2	1.5	20	35
L-2B	Von Karman Institute for Fluid Dyinamics	Abierto	ABL	2	0.35	0.35	35	4.4
UCD-ABLWT	Universidad de California de Davis	Abierto	ABL	12 / 2.44	1.71	1.2	4	56

Figura 23: Tabla resumen de los túneles de viento encontrados.

En la Figura 23, el asterisco * corresponde a túneles que sólo fueron diseñados pero no se tiene información de que hayan sido construidos. La mayoría de los túneles ABL ocupan la zona de desarrollo de capa límite como zona de pruebas, poniendo mesas giratorias al comienzo y al final, diferente es el UCD-ABLWT donde son secciones separadas y por lo tanto se dividen por un slash /.

3. Marco Teórico

3.1. Números Adimensionales en Estudios de Modelos en Túneles de Viento

3.1.1. Reynolds

Representa el cuociente entre las fuerzas inerciales sobre las fuerzas viscosas. Si la inercia predomina sobre la viscosidad, entonces el flujo es turbulento. Si fuese al revés, el flujo sería laminar. Se puede expresar bajo la siguiente fórmula [17]:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \tag{1}$$

Donde ρ es la densidad, v es la velocidad del flujo, L es un largo característico y μ es la viscosidad dinámica.

Si los Re coinciden, entonces se modelan correctamente los efectos entre las fuerzas viscosas y fuerzas de inercia. Si se pueden adaptar las condiciones para que los Re coincidan y sabiendo que el número adimensional relacionado a la fuerza de arrastre se mantendrá constante, puesto que depende del Re, se puede calcular la fuerza que recibirá el prototipo midiendo la fuerza sobre el modelo.

$$\frac{F_p}{\rho_P D_p^2 v_p^2} = \frac{F_m}{\rho_m D_m^2 v_m^2} \tag{2}$$

Donde el sufijo p es referencia al prototipo y el sufijo m al modelo. Despejando:

$$F_p = F_m \frac{\rho_p D_p^2 v_p^2}{\rho_m D_m^2 v_m^2} \tag{3}$$

3.1.2. Mach

Representa la compresibilidad del flujo, un cuociente entre la velocidad sobre la velocidad del sonido del mismo flujo.

$$M = \frac{v}{a} \tag{4}$$

Donde a es la velocidad del sonido y puede calcularse para gases ideales como:

$$a = \sqrt{kRT} \tag{5}$$

Donde k es el cuociente entre calores específicos, $1,4$ para aire, R es la constante de gas ideal para el fluido, en aire 286 $\left[\frac{m^2}{s^2 K}\right]$ o $\left[\frac{J}{KgK}\right]$ Como las fuerzas aerodinámicas también dependen de la compresibilidad, el número de Mach también debe coincidir.[1]

A bajo número de Mach, menor a 0,3, los efectos de compresibilidad son despreciables. Para aire en condiciones estándar esto equivale a $100[m/s]$, donde las variaciones de densidad son menores al 5 %.[17]

Si las velocidades variaran mucho, al punto de tener grandes variaciones en el número de Mach entre el modelo y el prototipo, entonces se deberán cambiar las condiciones del flujo para volver a hacer coincidir el Mach, por ejemplo, la temperatura.

3.1.3. Euler

En aerodinámica se ocupa el número de Euler, el cual representa la razón entre las fuerzas de presión versus las de inercia.[17]

$$Eu = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho v^2} \tag{6}$$

Donde ΔP representa la diferencia de presión entre el punto y la presión en el flujo libre. Este número también es llamado, a veces, el coeficiente de presión K_p. Este número después será ocupado para calcular la pérdida de carga en función de la presión dinámica

3.1.4. Froude

Es un número significativo para flujos con efectos de superficie libre. Representa la razón entre las fuerzas de inercia contra las fuerzas gravitatorias y se expresa de la siguiente manera [17]:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} \tag{7}$$

Donde g es la aceleración de gravedad y L es un largo característico.

3.2. Leyes de Conservación

El análisis de conservación de masa, momentum y energía para un elemento que se mueve en el espacio general as siguientes ecuaciones en notación indicial.[18]
Masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{8}$$

Momentum:

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left\{\rho u_i u_j\right\} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_j \tag{9}$$

Energía:

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = \frac{DP}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left\{\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i}\right\} + \tau_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho f_i u_i \tag{10}$$

Donde u es la velocidad, P es la presión, τ es el tensor de esfuerzos viscosos, f son las fuerzas de volumen, C_p es el calor específico a presión constante, el operador D es la derivada material y λ es la conductividad térmica.

Cuando el flujo cumpla con las siguientes condiciones:

- Incompresible
- Invíscido
- Fuerza de volumen conservativa

La ecuación de momentum se convertirá en la ecuación de Euler.

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial P}{\partial x_i} = \rho f_i \tag{11}$$

La cual, al considerar estado estacionario e integrarla en una misma línea de flujo, se convierte en la ecuación de Bernoullí.

$$P + \frac{1}{2}\rho u_i u_i + \rho g z = cte \tag{12}$$

3.3. Pérdida de Carga y Recomendaciones Dimensionales

Para compensar la pérdida de energía provocada por los esfuerzos viscosos sin tener que volver en las ecuaciones se modifica la ecuación de Bernoullí para incluir estos efectos bajo el nombre de pérdida de carga. Así, la ecuación queda de la forma [17]:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g z_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g z_2 + \Delta P \tag{13}$$

Donde se ocupa v^2 como el cuadrado de la velocidad en reemplazo de $u_i u_i$ y ΔP es la pérdida de carga, la cual depende de la forma del cuerpo que transporta el fluido. Generalmente se ocupan modelos empíricos para estimar ese término. Estos modelos se concentran en dos diferentes ramas.

1. Pérdida de carga en tubos/ductos de sección transversal constante.
2. Pérdidas de carga puntuales: Dispositivos, fittings, uniones, válvulas entre otros.

3.3.1. Pérdida de carga en un tubo o ducto de sección transversal constante

La pérdida de carga ΔP_f para un tubo circular vendrá dada por [17]:

$$\Delta P_{ducto} = f \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho v^2 \tag{14}$$

Donde L es el largo del tubo y D_h es el diámetro. f es un coeficiente experimental que depende de la rugosidad del tubo y del número de Reynolds. Existen diferentes modelos para calcularlos, desde tablas, gráficos hasta ecuaciones. Para flujo turbulento se puede ocupar la ecuación de Darcy, Colebrook y Altshul [17]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\epsilon / D_h}{3{,}7} + \frac{2{,}51}{Re_D \sqrt{f}} \right) \tag{15}$$

Esta ecuación se resuelve por métodos iterativos. Las rugosidades para algunos materiales están adjuntas en la Figura 24.

Duct Material	Factors Roughness Category	Absolute Roughness ε, ft
Uncoated carbon steel, clean (0.00015 ft)	smooth	0.0001
PVC plastic pipe (0.00003 to 0.00015 ft)		
Aluminum (0.000015 to 0.0002 ft)		
Galvanized steel, longitudinal seams, 4 ft joints (0.00016 to 0.00032 ft)	medium smooth	0.0003
Galvanized steel, continuously rolled, spiral seams, 10 ft joints (0.0002 to 0.0004 ft)		
Galvanized steel, spiral seam with 1, 2, and 3 ribs, 12 ft joints (0.00029 to 0.00038 ft)		
Galvanized steel, longitudinal seams, 2.5 ft joints (0.0005 ft)	average	0.0005
Fibrous glass duct, rigid	medium rough	0.003
Fibrous glass duct liner, air side with facing material (0.005 ft)		
Fibrous glass duct liner, air side spray coated (0.015 ft)	rough	0.01
Flexible duct, metallic (0.004 to 0.007 ft when fully extended)		
Flexible duct, all types of fabric and wire (0.0035 to 0.015 ft when fully extended)		
Concrete (0.001 to 0.01 ft)		

Figura 24: Rugosidad en ductos
Fuente: ASHRAE[19]

Cabe destacar que esta fórmula está hecha para tuberías circulares. En un ducto rectangular o con contorno elíptico (entre otros) se puede calcular las pérdidas ocupando el concepto de Diámetro Hidráulico, el cual se calcula como:

$$D_h = \frac{4A}{p} \tag{16}$$

Donde A es el área de la sección transversal y p es su perímetro.

3.3.2. Pérdidas de carga puntuales

Algunos accesorios que se colocan en la línea de tuberías pueden provocar perturbaciones en el flujo generando así pérdidas de carga. Estas pérdidas de carga se modelan como:

$$\Delta P = K\frac{1}{2}\rho v^2 \tag{17}$$

Donde K es un valor experimental que varía con cada accesorio.

3.4. Secciones de un Túnel de Viento: Definición, Ecuaciones, Dimensionamiento y otras Recomendaciones

3.4.1. Vena de Ensayos

La pérdida de carga se calcula en esta zona ocupando el diámetro hidráulico y el factor de fricción en tuberías de la siguiente manera:

$$\Delta P = f\frac{L}{D}\frac{1}{2}\rho v^2 \tag{18}$$

El dimensionamiento y las velocidades dependerá de los experimentos que se deseen realizar.

3.4.2. Difusores

El objetivo de estas partes es reducir la velocidad del flujo para así reducir las pérdidas por fricción y disminuir la potencia necesaria en los ventiladores, además de conectar las partes para cerrar el circuito.

El difusor más importante es el que está directamente conectado a la cámara de pruebas. Se debe asegurar de que no haya separación de capa límite dentro de éste porque las pulsaciones de presión viajarían hacia la cámara provocando variaciones de presión y velocidad indeseadas. Para evitar separación de flujo se recomienda que el semi ángulo de apertura sea no mayor a $3,5°$

La pérdida de carga se puede estimar ocupando el método de Idel'Cik [20]:

$$K_{diff} = K_{ex} + K_f \tag{19}$$

K_f está definido como:

$$K_f = \frac{f}{8\sin\alpha/2}\left[1 - \left(\frac{A_0}{A_1}\right)^2\right] \tag{20}$$

Donde A_0 es el área de la sección angosta del difusor, A_1 el área de la sección ancha.

Donde K_{ex} es la pérdida de carga por expansión y K_f es la pérdida de carga por fricción. El primer término se calcula por la ecuación dada por Barlow.[11]

$$K_{ex} = K_e\left(\frac{Ar-1}{Ar}\right)^2 \tag{21}$$

Mientras el coeficiente K_e depende del ángulo de apertura y se calculará ocupando el siguiente polinomio dado por Barlow y corregido por Dommelen, válido para un difusor cuadrado.[16]

$$K_e = 0{,}09623 - 0{,}004152\alpha \qquad \alpha < 1{,}5$$

$$K_e = 0{,}122156 - 0{,}0458960\alpha + 0{,}02202816\alpha^2 - 0{,}003269152\alpha^3 - 0{,}0006144896\alpha^4$$

$$1{,}5 < \alpha < 5$$

$$K_e = -0{,}1322 + 0{,}05866\alpha \qquad \alpha > 5 \tag{22}$$

Cabe mencionar también que cuando el ángulo es mayor a 20° aproximadamente, la separación de flujo es tal que el flujo se "mueve sobre si mismo" y el coeficiente de pérdida de presión es relativamente constante.

De esta forma, se puede calcular la pérdida de carga en base a la velocidad de entrada al difusor de la siguiente forma:

$$\Delta P = \frac{1}{2} K_{diff} \rho v^2$$

3.4.3. Cámara de Estabilización: Rejillas de Homogeneización y Pantallas

Esta parte del túnel tiene como función homogeneizar el flujo a través de rejillas honeycomb, tubulares, cuadradas e incluso con otras formas y además de pantallas.

Si bien las rejillas logran reducir eficientemente las fluctuaciones laterales, también generan fluctuaciones longitudinales del orden del diámetro de la rejilla. Como recomendación, la longitud debe ser mínimo 6 veces el diámetro.

Complementando las rejillas, las pantallas logran reducir bastante bien las fluctuaciones longitudinales con respecto a las laterales.[21]

Rejillas de homogeneización

La ecuación está dada por las relaciones empíricas de Prandtl [11]:

$$K_{rejilla} = \lambda \left(\frac{L_{cell}}{D_{cell} + 3} \right) \left(\frac{1}{\beta} \right)^2 + \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right)^2 \tag{23}$$

Donde L_{cell} es el largo de la celda, D_{cell} es el diámetro hidráulico de la celda, β es la porosidad, definida como el área libre de la celda sobre el área total y λ es un coeficiente que se determina como lo siguiente:

$$\lambda = 0{,}375 \left(\frac{\delta}{D_{cell}} \right)^{0{,}4} Re_\Delta^{-0{,}1} \qquad Re_\Delta < 275$$

$$\lambda = 0{,}214 \left(\frac{\delta}{D_{cell}} \right)^{0{,}4} \qquad Re_\Delta > 275 \tag{24}$$

Donde Re_Δ es el número de Reynolds con referencia a la rugosidad y se determina como:

$$Re_\Delta = \frac{v\Delta}{\nu} \tag{25}$$

Donde Δ es la rugosidad. Se recomienda que el diámetro de la celda esté relacionado con el diámetro hidráulico de la cámara de estabilización bajo la siguiente relación [11]:

$$D_{cell} = \frac{D_{camara\ estabilizacion}}{150}$$

También se recomienda que el largo de la celda sea alrededor de 8 a 12 veces el diámetro de la celda.

Pantallas

Las pantallas se pueden calcular bajo las siguientes ecuaciones [11]:

$$K_{pant} = K_{mesh}K_{re}(1-\beta) + \left(\frac{1-\beta}{\beta}\right)^2$$

$$K_{re} = 0{,}785\left(\frac{Re_{wire}}{241} + 1\right)^{-4} + 1{,}01 \tag{26}$$

Donde β es la porosidad de la pantalla, Re_{wire} es el número de Reynolds en base al diámetro del alambre y K_{mesh} es el coeficiente de suavidad del alambre y suele rondar entre 1 y 2,1.

3.4.4. Contracción

El objetivo principal de la contracción es acelerar el flujo desde la cámara de estabilización hacia la vena de ensayos y reducir las fluctuaciones axiales, mejorando así la calidad del flujo. Sin embargo, las fluctuaciones laterales son incrementadas. La razón de contracción N viene dada por la razón entre las áreas transversales de los extremos de la contracción [21]:

$$N = \frac{A_1}{A_2}$$

- Si la razón de contracción es mayor, las fluctuaciones axiales son menores, las fluctuaciones laterales son mayores y la velocidad en la cámara de estabilización es menor.
- Si la velocidad en la cámara de estabilización es menor, entonces hay menores pérdidas de carga, por lo que se pueden agregar, en cambio, más pantallas y rejillas de homogeneización.
- Si hay más pantallas, entonces las fluctuaciones longitudinales se reducen.
- Si hay más rejillas de homogeneización, entonces las fluctuaciones laterales se disminuyen.

En conclusión, la turbulencia dentro del túnel es poco isotrópica y mejorar la razón de contracción da oportunidades para mejorar la calidad del flujo, disminuyendo las fluctuaciones longitudinales y/o las laterales.

La forma de la contracción está estudiada por K. Javed y M.Ali, los cuales optimizan un polinomio de grado 6 a través de simulación CFD.[22]

$$y(x) = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 + fx^5 + gx^6 \tag{27}$$

Donde las condiciones de borde están dadas por las dimensiones, pendiente cero y curvatura cero para la entrada y salida, dejando un parámetro de curvatura igual cero libre. Éste parámetro fue optimizado por ellos en $i/L = 0{,}6$, donde i es el punto de curvatura igual cero tomando como referencia el lado ancho de la contracción.

Idel'Cik [20] calcula a pérdida de carga en esta sección, para cuando ambos ángulos de apertura son iguales, de la siguiente forma:

$$K = \left(\frac{f}{8\sin\alpha/2}\right)\left(1 - \frac{1}{N^2}\right) \tag{28}$$

En donde el coeficiente de fricción se calcula en base a la sección angosta con la ecuación de Darcy (Ecuación 15).

3.4.5. Codos con guías de flujo

Los codos con álabes guías ayudan a que el flujo siga el camino del ducto sin tener separación, lo que se traduce en menores pérdidas de cargas y mejor homogeneidad de flujo.

Según las recomendaciones del grupo de Intech[21], es conveniente que el radio de curvatura interno del codo sea 0,25 veces el ancho del codo para los codos más grande (aguas arriba de la vena de ensayo) y 0,2 veces para los más chicos (aguas abajo de la vena de ensayos hasta el ventilador)

El espaciado entre álabes puede ser igual o variable, esto dependerá de las velocidades que maneje el codo. Es recomendable que para el codo más pequeño (y por lo tanto de mayor velocidad), el espaciado sea variable.

Otro aspecto importante referente a los álabes es que estos pueden tener espesor variable (como los álabes de un avión) o pueden ser simplemente una placa doblada, la cual es más fácil de implementar y genera resultados aceptables.

La pérdida de carga se puede calcular con las ecuaciones propuestas por Barlow[11] de la siguiente forma:

$$K_{codo} = 0{,}10 + \left(\frac{4{,}55}{(\log_{10} Re_c)^{2{,}58}}\right) \tag{29}$$

Donde Re_c se saca en base a la longitud de la cuerda de los álabes. Siendo c el largo de la cuerda y h el espaciamiento entre álabes, la ecuación es válida si el ángulo de giro es de 90° para una razón de:

$$0{,}2 < \frac{h}{c} < 0{,}3$$

Cuando son álabes planos.

$$0{,}1 < \frac{h}{c} < 0{,}25$$

Cuando los álabes tienen espesor variable.

3.4.6. Cámara de Desarrollo de Capa Límite - Fetch

El objetivo de la Fetch es hacer crecer la capa límite en un espacio reducido. Este tópico ha sido estudiado en varias ocasiones por ser de gran influencia en el tamaño del Túnel de Viento, parámetro restrictivo en el mayor de los casos[23]. La Fetch dispone de tres elementos para hacer crecer la capa límite, la barrera, la espira y los elementos de rugosidad. El primero es el elemento más simple y suele ser una placa de baja altura dispuesta a lo ancho del piso de la Fetch, mientras la espira y los elementos de rugosidad tienen una mayor complejidad constructiva y de disposición[24][25]. El flujo choca contra la barrera, provocando un déficit de momentum cercano al piso, después se enfrenta a las espiras produciendo una pérdida de momentum diferenciada mayor a nivel de piso y menor en la punta, formando así un perfil de velocidad no lateralmente homogéneo que aguas abajo se homogeneiza llegando a formar un perfil de capa límite. Los elementos de rugosidad cumplen dos funciones, producen un déficit de momentum extra para lograr la formación de ciertos perfiles de capa límite y agregan turbulencia al flujo, permitiendo que se homogeneice lateralmente en un menor trecho[24]. En los últimos túneles de viento estudiados en el estado del arte no se ha visto el uso de la barrera y hay poca información sobre sus dimensiones, por lo que en los estudios no se considerará. La disposición de la espira y se puede ver en la Figura 26. Las características de la Capa Límite Atmosférica se pueden ver en la sección 3.5.

Espiras (Spires) El principio de funcionamiento consta del siguiente: Se asumió que la región baja es más importante y por ello se debería dejar crecer de forma “natural” y que las capas superiores deberían ser formadas por los generadores. En un punto, las dos perturbaciones se juntarían para formar la capa límite. La forma se fijó en un intento por que la turbulencia decayera desde un máximo en el suelo hasta cero en la punta (o un nivel muy bajo).[24]

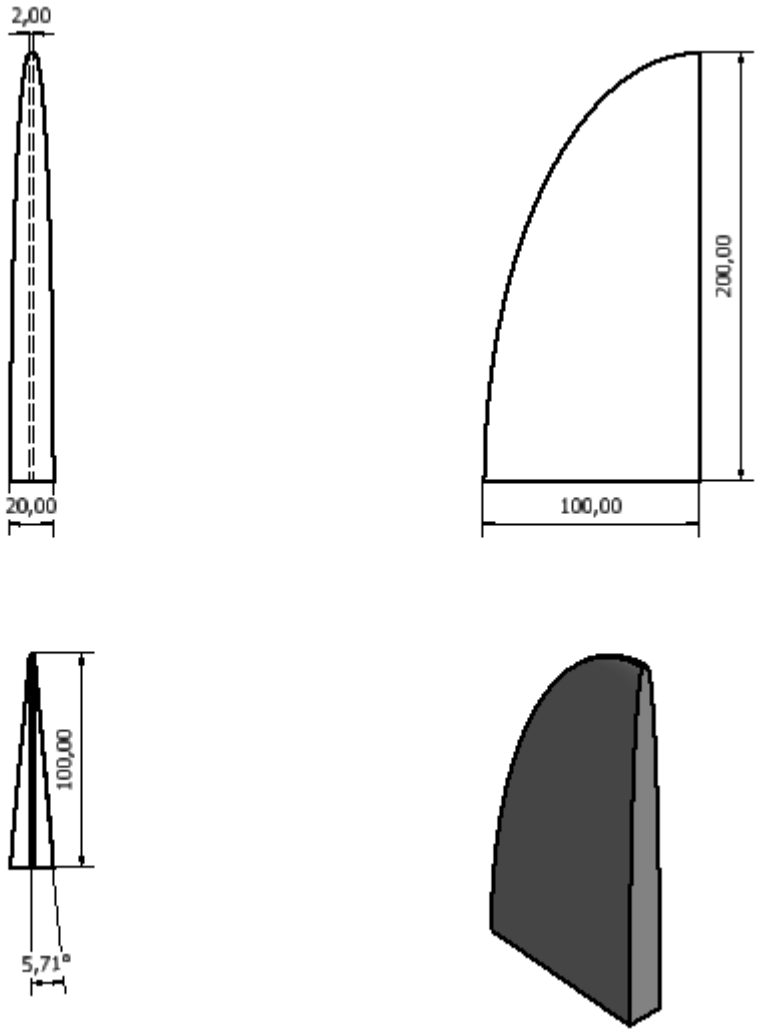


Figura 25: Espira tipo elíptico-cuña. Relación de dimensiones según Counihan.[24]

Fuente: Propia - Inventor Professional

Elementos de Rugosidad Estos elementos corresponden a pequeñas protuberancias que se ponen en la zona de desarrollo de capa límite y tienen una altura y densidad calculadas. Permiten un corto desarrollo de la capa límite de manera "natural"[24]

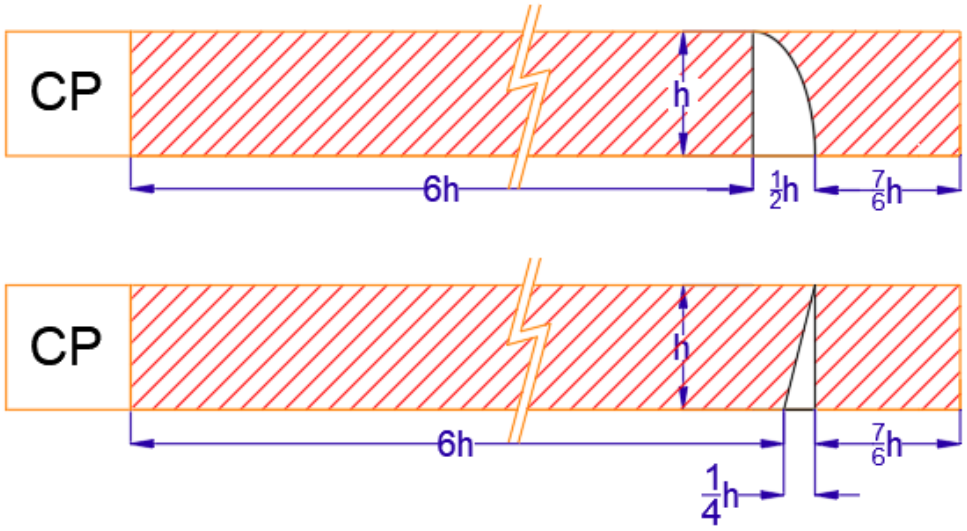


Figura 26: Parametrización de dimensiones de la Fetch, sin incluir techo.
Fuente: Propia - AutoCAD

El flujo necesita homogeneizarse antes de llegar a la cámara de pruebas, existen discrepancias sobre la distancia que se debe dejar después de las espiras. Mientras que Counihan aproxima que se necesita una distancia equivalente a 5 veces la altura de la espira[24], Irwin[25] menciona que es suficiente con que ese valor sea 6 y Rahmat afirma que, recién a una distancia de 13 veces dicha altura, el flujo se homogeneizará[23]. Este fenómeno se podrá ver más claramente en las simulaciones.

Por otra parte, Irwin[25] vuelve a proponer el uso de espiras triangulares, con su cara plana enfrentando al flujo y sin que tengan necesariamente una forma de cuña apuntando aguas abajo. Se pueden ver las dimensiones características de en la Figura 27. El dimensionamiento de estas espiras se basa en las siguientes ecuaciones.

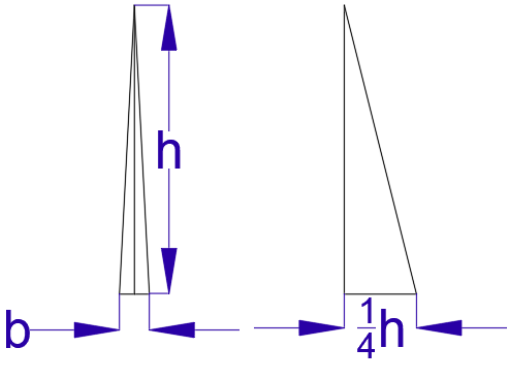


Figura 27: Espiras triangulares.
Fuente: Propia - AutoCAD

$$\frac{u}{U_\delta} = \left(\frac{z}{\delta}\right)^\alpha \tag{30}$$

Seleccionadas la altura de la capa límite que se desea simular y el exponente α de la ley de potencia 30, la altura de la espira se calculará como [25]:

$$h = 1{,}39\frac{\delta}{1+\alpha/2} \tag{31}$$

Mientras la relación entre la base del triángulo b y su altura estará dada por la siguiente ecuación [25]:

$$\frac{b}{h} = 0{,}5\left[\psi\frac{H/\delta}{1+\psi}\right](1+\alpha/2) \tag{32}$$

Donde el parámetro ψ estará calculado como [25]:

$$\psi = \beta\frac{\frac{2}{1+2\alpha}+\beta-\frac{1{,}13\alpha}{1+\alpha\cdot(1+\alpha/2)}}{(1+\beta)^2} \tag{33}$$

$$\beta = \frac{\delta}{H}\frac{\alpha}{1+\alpha} \tag{34}$$

donde H es la altura de la cámara de pruebas.

Mientras tanto, la altura k de los elementos de rugosidad cubicos estará dada por [25]:

$$\frac{k}{\delta} = \exp\left(\frac{2}{3}\ln(D/\delta) - 0{,}1161\sqrt{\frac{2}{C_f}+2{,}05}\right) \tag{35}$$

Esta ecuación es sólo válida cuando $30 < \frac{\delta D^2}{k} < 2000$. Donde D es el espaciamiento entre elementos y C_f estará calculado como:

$$C_f = \frac{0{,}136\alpha}{1+\alpha^2} \tag{36}$$

Las dimensiones k y D quedan sin determinar bajo estas ecuaciones. A modo de cerrar estas ecuaciones, Song recopila de Sill, Gartshore, Cross y Xu la siguiente recomendación [26]:

$$\frac{\delta}{16} < k < h - \delta \tag{37}$$

Eso da la libertad suficiente como para encontrar un tamaño de elemento fácil de construir.

La disposición de los elementos de rugosidad debe ser de la forma en que se muestra en la Figura 28.

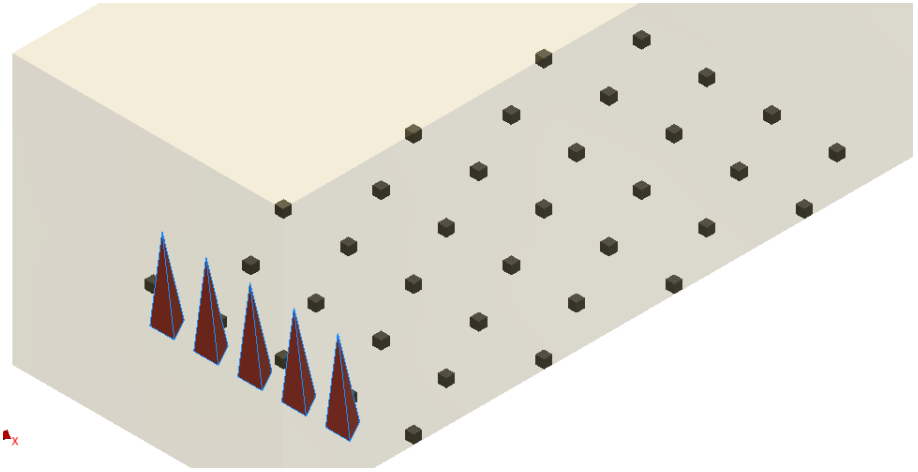


Figura 28: Disposición de elementos de rugosidad.
Fuente: Propia - Inventor Professional

3.5. Capa Límite Atmosférica

La capa límite atmosférica tiene varias centenas de metros de altitud y su forma varía dependiendo de la topografía y estructuras que se encuentren en el suelo, como se puede ver en la Figura 29.

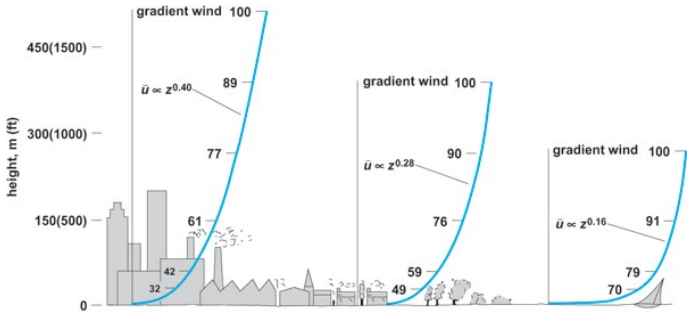


Figura 29: Perfiles de capa límite para zonas urbanas y rurales.
Fuente: UP WIND Project.[27]

Existen varias formas de modelarla, dependiendo de los análisis que se quieran hacer con ella. Uno de los más conocidos el modelo por Ley de Potencia, el cual corresponde con la Ecuación 38.

$$\frac{u(z)}{U_*} = \left(\frac{z}{z_*}\right)^{\alpha} \tag{38}$$

Donde $u(z)$ es la velocidad del perfil en una altura z, mientras z_* y U_* son una altura característica y su correspondiente velocidad y típicamente suelen tomar los valores de la velocidad y la altura en la capa límite o a una cierta altura de medición (por ejemplo, a 10 metros). En este estudio se hará énfasis al modelo a través de la altura de capa límite, el cual permite definir la escala para los modelos.

Existe gran cantidad de tablas de donde conseguir valores de δ y de α para modelar la capa límite. Se tomarán los "Exposures", definidos por la ASCE (American Society of Civil Engineers), los cuales son definiciones de la forma de la capa límite[28], para hacer la dimensionalización de espiras y elementos de rugosidad que permitan modelar la capa límite. Las propiedades de los "Exposures" se pueden ver en la Tabla . Los "Exposures" se aplican para las siguientes estructuras:

- Exposure B: Estructuras con altura promedio de techo menores o igual a 9,1$[m]$, donde la rugosidad del terreno tipo B prevalezca en el viento por una altura mayor a 457$[m]$. Para edificios y estructuras con una altura promedio de techo mayor a 9,1$[m]$, donde la rugosidad del terreno tipo B prevalezca en el viento por una altura mayor a 792$[m]$ o 20 veces la altura del edificio o estructura, cual sea mayor.
- Exposure C: Se aplica para todo caso que quede fuera del Exposure B o D.
- Exposure D: Se aplica donde la rugosidad del terreno tipo D prevalezca en el viento por una distancia mayor a 1.504$[m]$ o 20 veces la altura del edificio o estructura, cual sea mayor. También se debe aplicar donde la rugosidad del terreno directamente arriba del lugar sea del tipo B o C y el sitio está dentro de un radio de 183$[m]$ o 20 veces la altura de la estructura o edificio (cual sea mayor) de un sitio con condición de Exposure D.
- Para un sitio que se encuentre en la transición de un Exposure a otro, se debe aplicar el Exposure que resulte en mayores cargas de viento.[28]

Para mayor detalle sobre los Exposures y la definición de los tipos de rugosidad de terreno, consultar el Estandar ASCE 7-16.

Exposure	α	δ $[m]$
B	1/4,0	365,76
C	1/6,5	274,32
D	1/9,0	213,36

Tabla 2: Características de la capa límite atmosférica tipo.
Fuente: Estandar ASCE 7-16

4. Diseño y optimización del túnel de viento

Este capítulo está dividido en cinco partes principales, la primera detalla el desarrollo del diseño general del túnel de viento mientras que la segunda se enfoca en las secciones en particular. La tercera está dedicada a la selección del ventilador, mientras que la cuarta para la simulación completa del túnel de viento, incluyendo el acople con las condiciones de borde del ventilador. Finalmente, la quinta sección habla de las capacidades y limitaciones del túnel de viento. El diseño en general se fue ajustando y corrigiendo tanto por recomendaciones como por validaciones de las partes, es por ello que en algunas partes de la primera sección hagan referencia a la segunda.

4.1. Diseño General

En esta sección se resumen las versiones por las cuales pasó el túnel desde su concepción, pasando por las modificaciones hasta la versión final. La primera, Figura 30, corresponde a una versión básica con dos difusores, y codos con deflectores.

- Ventaja
  - Simpleza de construcción.
- Desventajas
  - Difusores muy cortos, las perturbaciones del codo podrían viajar hacia la cámara de pruebas.
  - Secciones de mayor peso en altura.

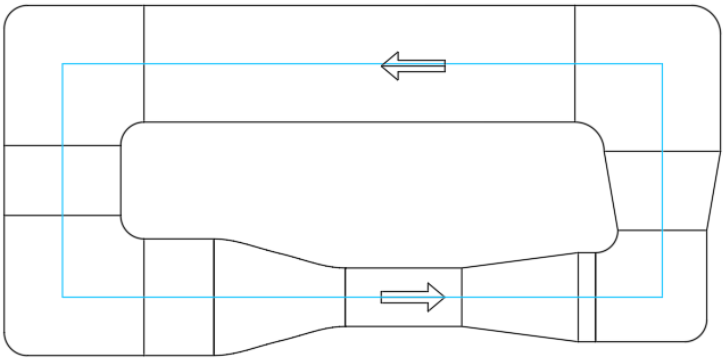


Figura 30: Versión 1 Túnel de Viento.
Fuente: Propia - AutoCAD

En la segunda versión, Figura 31, se giró el túnel para que el acceso a los modelos más grandes y el peso queden más abajo.

- Ventajas
  - Peso más cerca del suelo → Mayor estabilidad.
  - Mejor accesibilidad para modelos más grandes
- Desventajas
  - Difusores muy cortos, $L/H \sim 2$ las perturbaciones del codo podrían viajar hacia la cámara de pruebas.

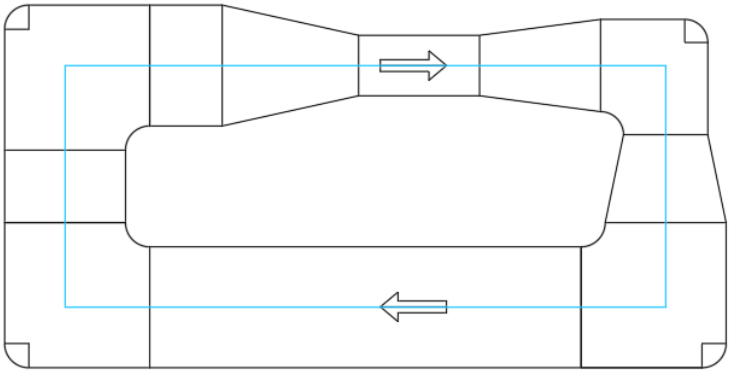


Figura 31: Versión 2 Túnel de Viento.
Fuente: Propia - AutoCAD

Para simplificar el diseño, y por ende, la construcción, se decidió que el primer codo aguas abajo de la cámara de pruebas aerodinámica fuera igual a los otros tres codos. Esto además provoca que el segundo difusor pase a ser un ducto recto, reduciendo las secciones que arriesgan recirculación de flujo. Las complicaciones se concentran entonces en el diseño de un solo difusor de gran ángulo.

Se trazaron también las fronteras ideales de 9[m]x4,5[m] y se dibujó la espira con su respectiva zona de desarrollo de capa límite, visibles en la Figura 32.

- Ventajas
  - Un difusor en vez de dos, menos secciones que diseñar.
  - Codo 1 es idéntico a los demás, el diseño global y construcción es más simple.
- Desventajas
  - El diseño del único difusor se hace más complejo.

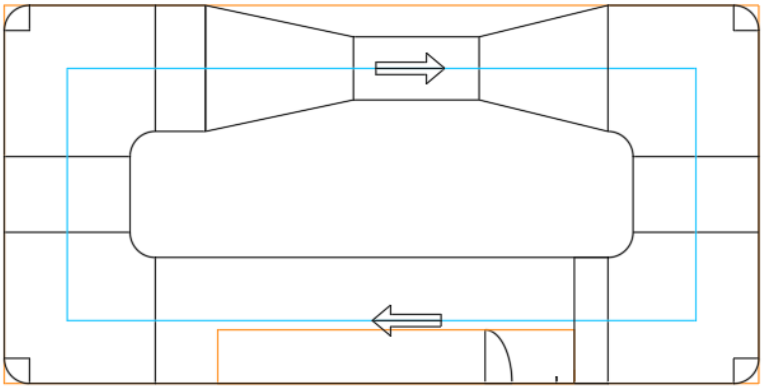


Figura 32: Versión 3 Túnel de Viento.
Fuente: Propia - AutoCAD

Para comparar el difusor con la literatura se utilizó el parámetro L/H donde L es el largo del difusor y H es la altura (o ancho) de la zona angosta. Las recomendaciones indican que este parámetro L/H debe ser cercano a 3 para cuando la contracción tenga un ratio pequeño y de 4 para cuando la contracción tenga un ratio grande[21]. Para el diseño anterior el difusor tenía un L/H de 2, arriesgando que las perturbaciones aguas abajo de la cámara de pruebas, viajen aguas arriba afectando la prueba. Se investigó el uso de codos con área transversal variable, los cuales son más cortos y le dan más espacio al difusor, dándole un $L/H \sim 4$. También se tomó en consideración una contracción de ancho diferente al alto, aprovechando así un poco más el espacio y generando un ratio de contracción de 4,5. El resultado se puede ver en la Figura 33. La Figura 46 muestra que este tipo de codos no es óptimo para deflectar el flujo, de hecho, los dos últimos álabes están dentro de una zona de recirculación. En la Sección 4.2 se detallan las mejoras que se hicieron a estos codos para una correcta deflexión del flujo.

- Ventajas
  - Ratio de contracción mayor. De 4 a 4,5.
  - Difusor más largo, $L/H \sim 4$.
- Desventajas
  - Diseño de los codos y de los deflectores de flujo más complejo.
  - Deflectores de flujo ineficientes para redireccionar el flujo.

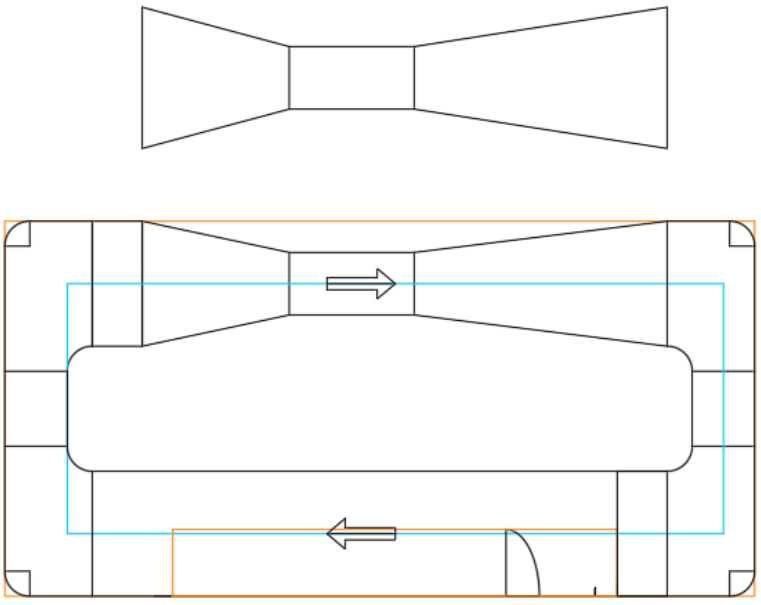


Figura 33: Versión 4 Túnel de Viento.
Fuente: Propia - AutoCAD

En la versión 5, Figura 34, se incluyó en el diseño el ventilador del LER y se modificó el diseño de los codos para que tengan un radio interno diferente al externo. En la Figura 35 se puede ver el difusor adaptado para el ventilador del LER. Como se puede ver en la Figura 47, el resultado mejoró bastante al optimizar la configuración de álabes de los codos, pero la complejidad de la construcción aumentó. No fue así al evaluar el difusor adaptado para el ventilador LER, la forma errática del flujo se puede ver en la Figura 61 y no es apta para un difusor de túnel de viento. Es por esto que se desechó el uso del ventilador del LER y se procede a diseñar un difusor más acorde a lo que recomienda la literatura y se seleccionará un ventilador comercial.

- Ventajas
  - Mejor calidad de flujo aguas abajo de los codos.
- Desventajas
  - Ventilador del LER queda descartado, aumento en los costos de inversión.

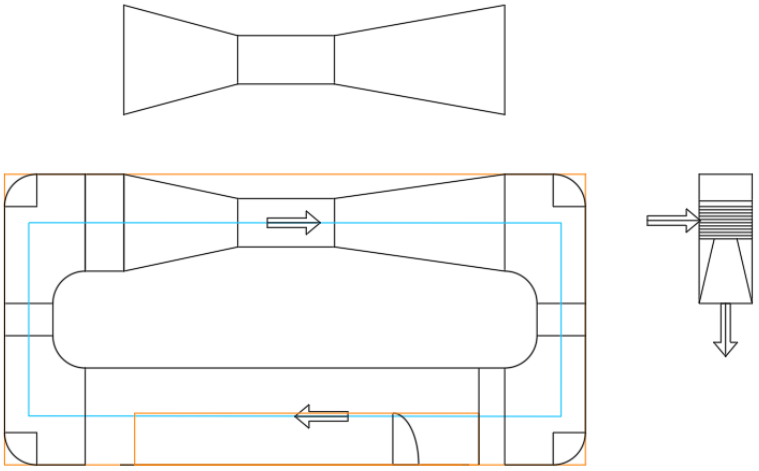


Figura 34: Versión 5 Túnel de Viento.
Fuente: Propia - AutoCAD

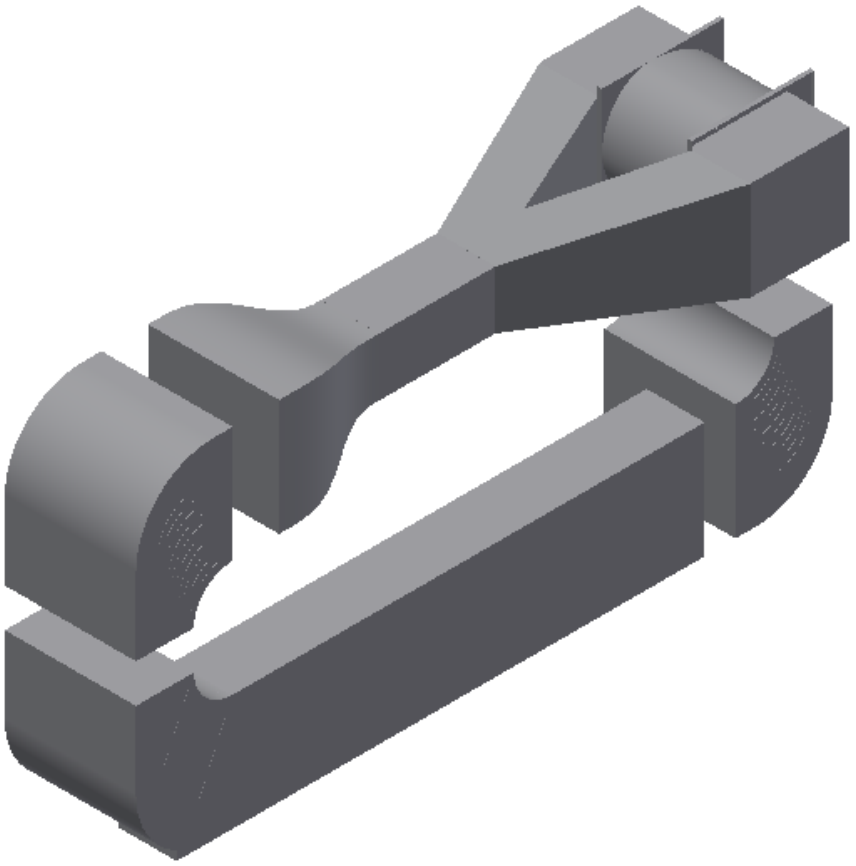


Figura 35: Representación del túnel de viento en base a los modelos simulados con el ventilador del LER instalado.
Fuente: Propia - Inventor Professional

Desde este punto en adelante y debido a limitaciones de tiempo, se priorizó el diseño del Túnel de Viento prototipo, el cual corresponde a un escalado 1:2 con respecto al modelo definitivo.

En la versión 6 Figura 36, se disminuyó el tamaño de la espira, disminuyendo la perturbación combinada entre las espiras y el techo y como también la distancia requerida para obtener una capa límite desarrollada, como se puede ver en la Figura 95.

Debido a las grandes separaciones de flujo en el difusor se optó por poner dos pantallas de sección esférica en éste, la decisión fue tomada acorde al análisis hecho en la Sección 4.2.4. La complejidad de encontrar una configuración adecuada para el difusor llevó a reducir el factor N de la contracción de vuelta a 4, permitiendo así tener un difusor simétrico en plano horizontal y vertical.

- Ventajas
  - Más simpleza en el diseño del difusor.
  - Flujo más desarrollado en la cámara de pruebas de capa límite atmosférica.
- Desventajas
  - N vuelve a ser 4, menor calidad de flujo en la cámara de pruebas aeronáuticas.

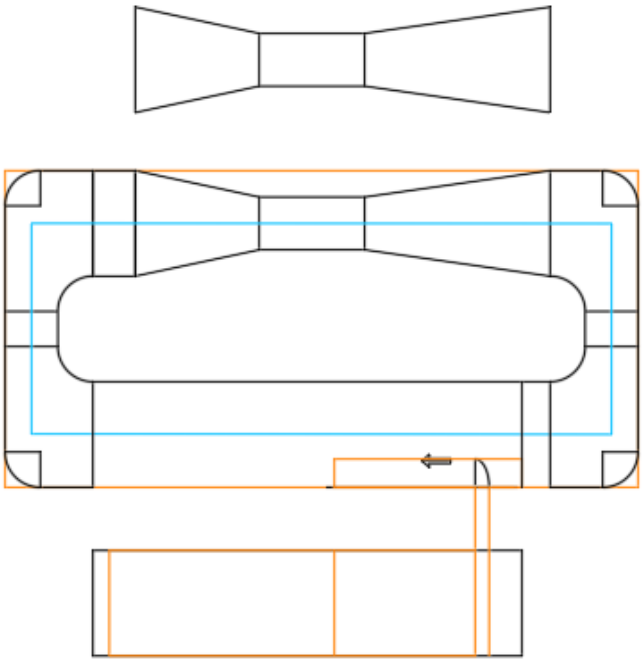


Figura 36: Versión 6 Túnel de Viento.
Fuente: Propia - AutoCAD

El volumen interior se puede ver en la Figura 37.

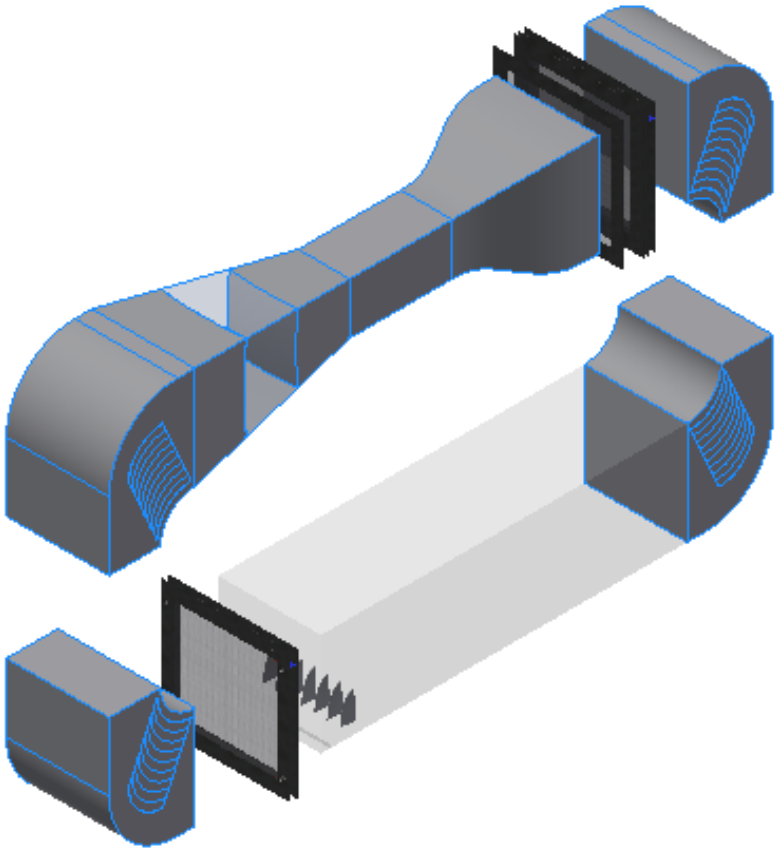


Figura 37: Representación del túnel de viento en base a los modelos simulados sin considerar la instalación del ventilador.
Fuente: Propia - Inventor Professional

Para la versión 7, se seleccionó el ventilador y se hicieron modificaciones extra para ajustar dimensiones y calidad de flujo al ventilador propuesto. La primera modificación consiste en reemplazar los dos codos aguas abajo del difusor por codos normales con álabes deflectores de espaciamiento constante, los cuales tienen mejor calidad de flujo y su sección de 750$[mm]$ se acopla de mejor manera al ventilador de 560$[mm]$ de diámetro, no así las secciones de 375$[mm]$ de los codos con expansión. Estos codos tienen un radio de curvatura mayor a los propuestos anteriormente. Otra modificación fue en los otros dos codos, donde se optó por utilizar álabes deflectores de distinto tamaño y espaciamiento, además de aumentar el radio del codo sin expansión. Se espera que con esta nueva versión, los ajustes finales sean menores. Se puede ver el resultado de estos ajustes en las Figuras 38 y 39, con las dimensiones resultantes en la Figura 40 (que varían en 200$[mm]$ de los planos por las dimensiones de los marcos para las pantallas). Adicionalmente, se puede ver el modelo ensamblado del túnel en la Figura 41 y el modelo a simular en la Figura 42. Finalmente, se puede ver el espacio que ocuparía el Túnel de Viento prototipo en el LER en la Figura 43.

- Ventajas
  - Mejor adaptación de los codos al potencial ventilador.
- Desventajas
  - El túnel ocupa mayor espacio al tener un lado de los codos más grandes.

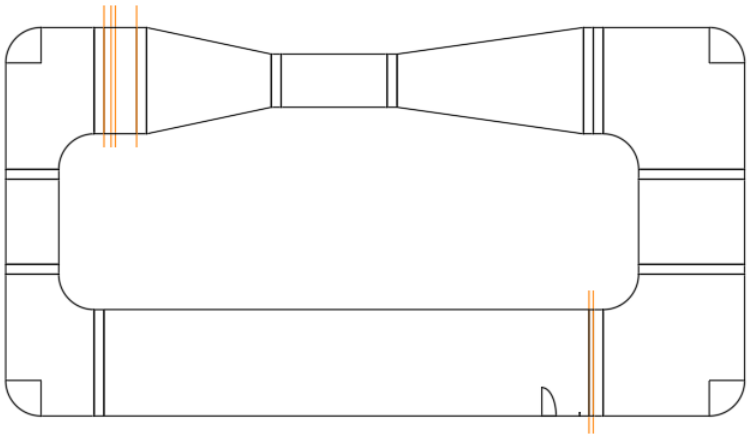


Figura 38: Versión 7 Túnel de Viento.
Fuente: Propia - AutoCAD

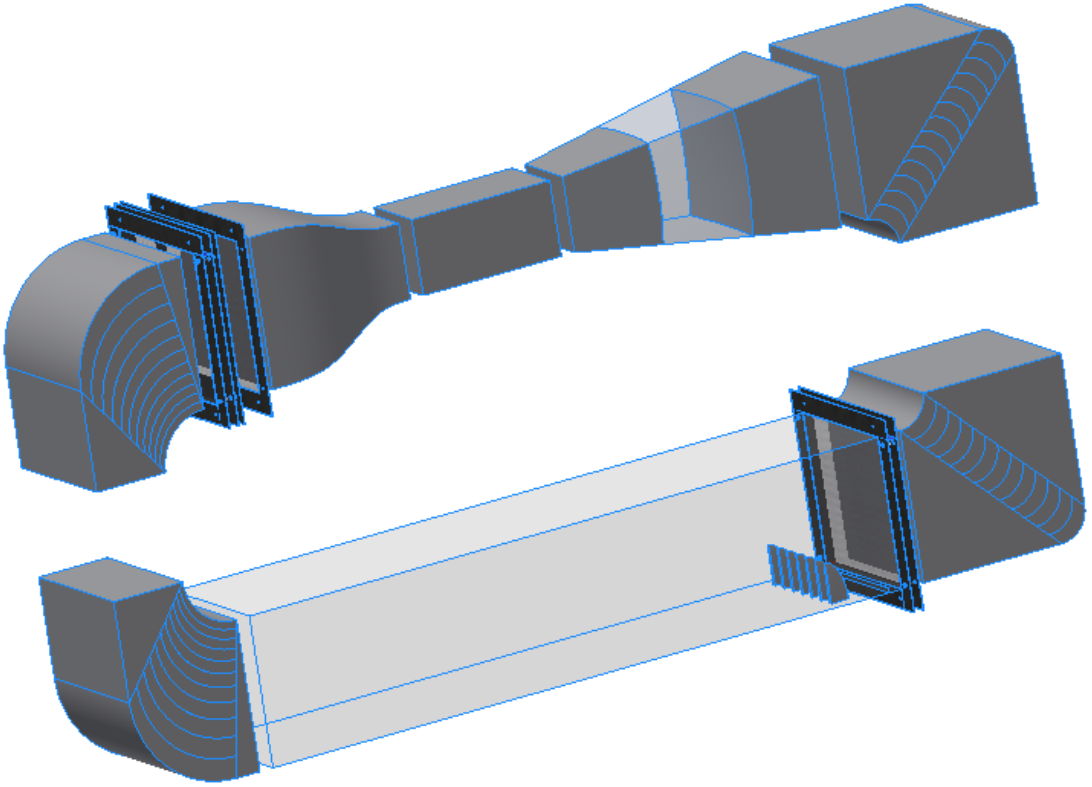


Figura 39: Representación del túnel de viento con codos adaptados para el ventilador cotizado.
Fuente: Propia - Inventor Professional

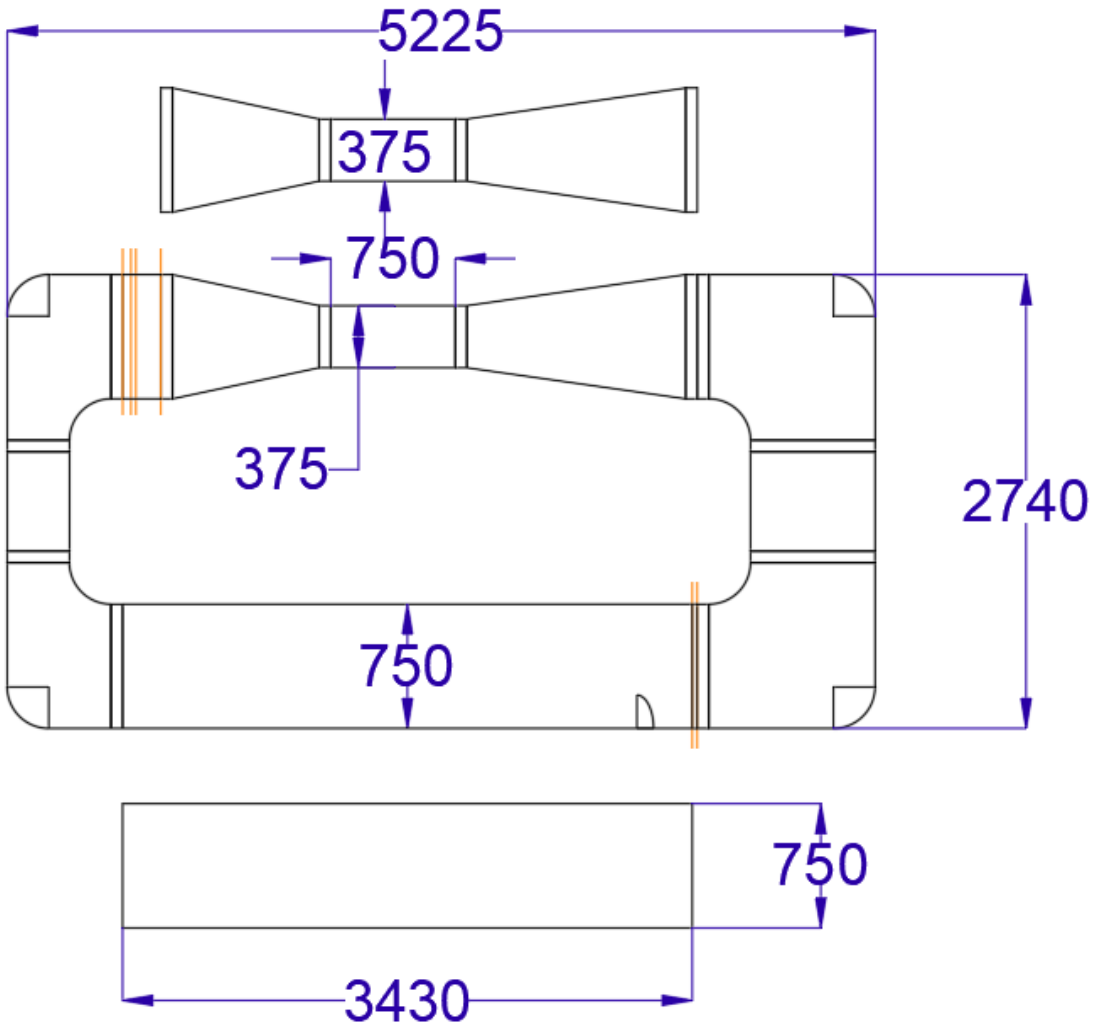


Figura 40: Version 7 con dimensiones.
Fuente: Propia - AutoCAD

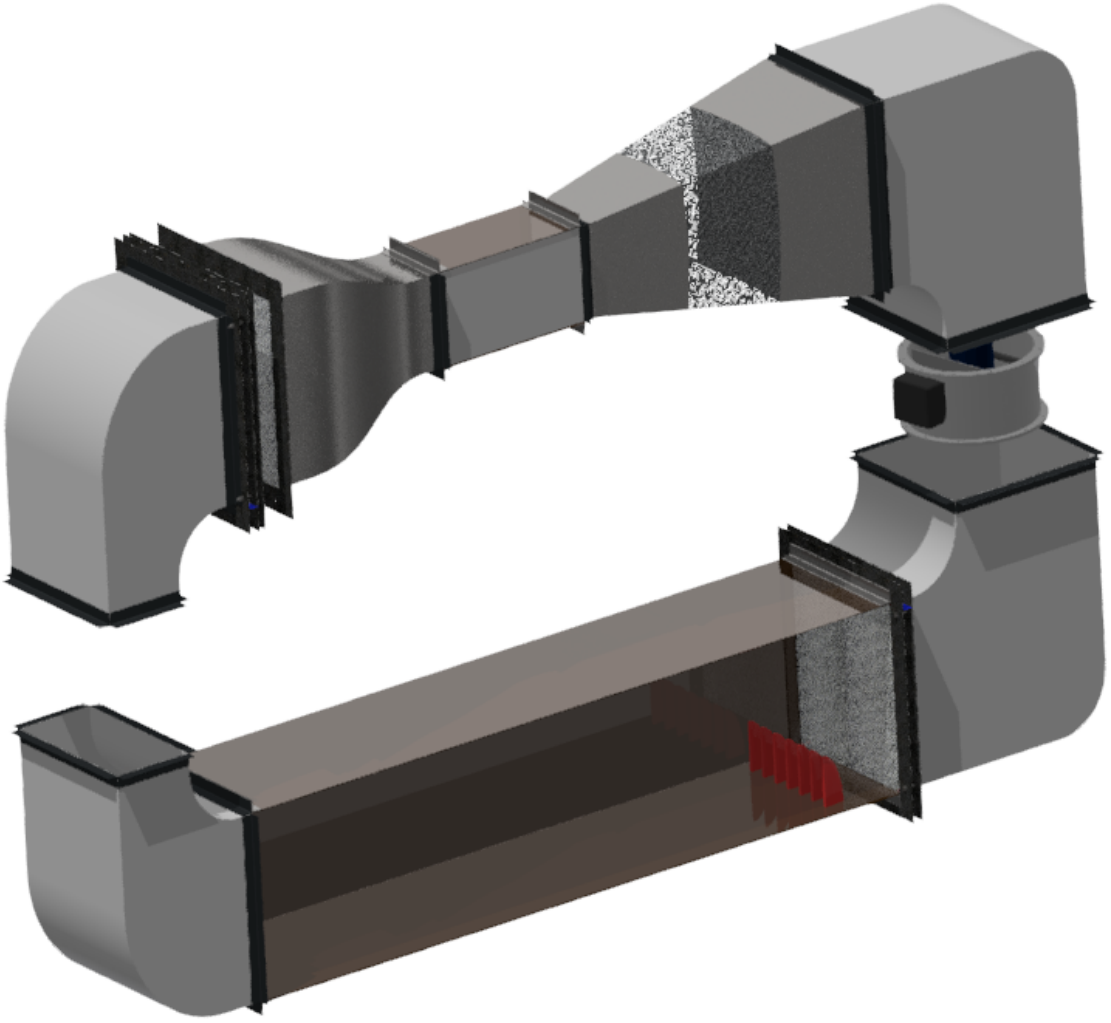


Figura 41: Túnel de Viento ensamblado, se deja el espacio para el ventilador y un ducto conector.
Fuente: Propia - Inventor Professional

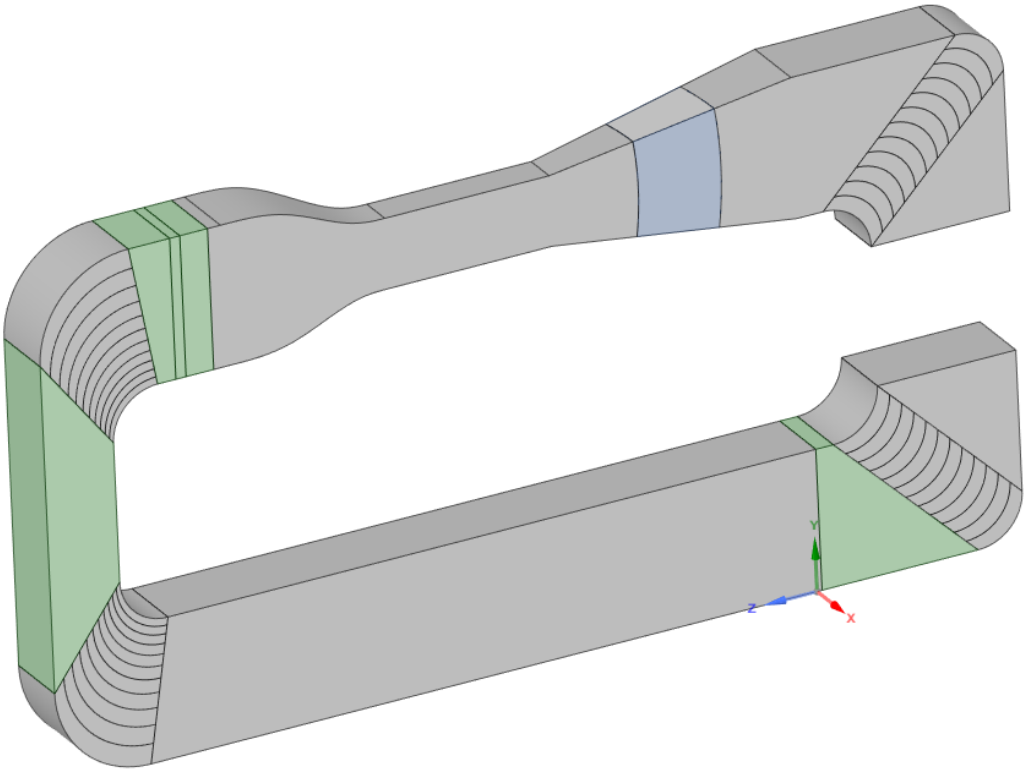


Figura 42: Modelo para simulación del túnel de viento.
Fuente: Propia - SpaceClaim

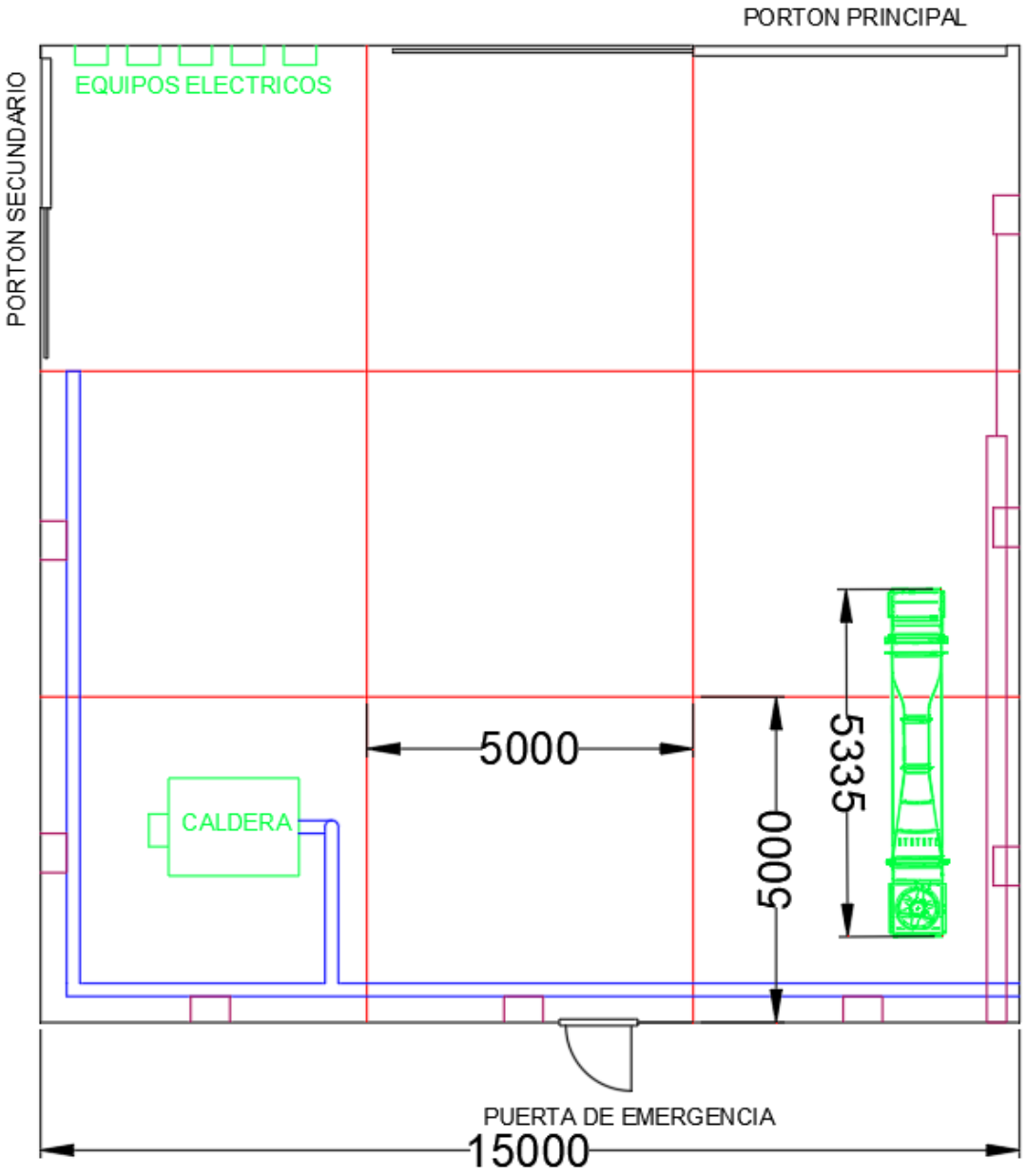


Figura 43: Disposición del túnel de viento en el LER.
Fuente: Propia - AutoCAD

4.2. Diseño y optimización de secciones del túnel de viento por CFD

4.2.1. Modelo Computacional

En base a la literatura y simulaciones típicas, se seleccionaron parámetros para hacer la malla computacional, tipos de condiciones de borde y métodos para hacer refinamientos posteriores en zonas de interés y estudiar convergencia de solución. A lo largo de este estudio, se fueron mejorando los criterios con el objetivo de disminuir el tiempo de simulación, tener mejor convergencia de iteraciones y de malla en base a recomendaciones de literatura, experiencia y webinars de la ESSS. Las últimas simulaciones se hicieron con los criterios resumidos en la Tabla 3.

Modelo de Turbulencia	$k-\omega$ SST
Acople de Presión-Velocidad	Coupled
Método de Mallado	Hex-Dominant Face Sizing en paredes
Valores $y+$ objetivo	30 - 300
Condición de borde de entrada	Velocity-Inlet
Condición de borde de salida	Pressure-Outlet
Condición de borde de simetría	Siempre cuando fuese posible
Condiciones de convergencia	Residuales en el orden de 10^{-5} Monitoreo de ΔP_{total} y Uniformity-Index
Otros	Pseudo-Transient High Order Term Relaxation

Tabla 3: Resumen de criterios de simulación.

Se eligió el modelo $k-\omega$ SST por ser el más recomendado, ya que ocupa $k-\omega$ cerca de las paredes y $k-\epsilon$ lejos de ellas. Los valores de $y+$ objetivo aseguran que se ocupen las funciones de pared, disminuyendo en gran medida la cantidad de nodos a ocupar. Para asegurar la independencia de malla, se hizo un refinamiento total de malla una vez lograda la convergencia de la solución y un engrosamiento posterior de las celdas aledañas a las paredes para asegurar que el valor $y+$ siguiese estando dentro del rango objetivo. Este método será ligeramente modificado para las simulaciones de túnel completo, complementando con un barrido entre varios tamaños de elementos.

4.2.2. Codos

Se hicieron simulaciones de los codos para comprobar y mejorar la forma y calidad del flujo y disminuir las pérdidas de carga.

La primera simulación se hizo en un codo sin álabes como referencia al peor de los casos, a una velocidad de $12[m/s]$ y se pueden ver los resultados en la Figura 44.

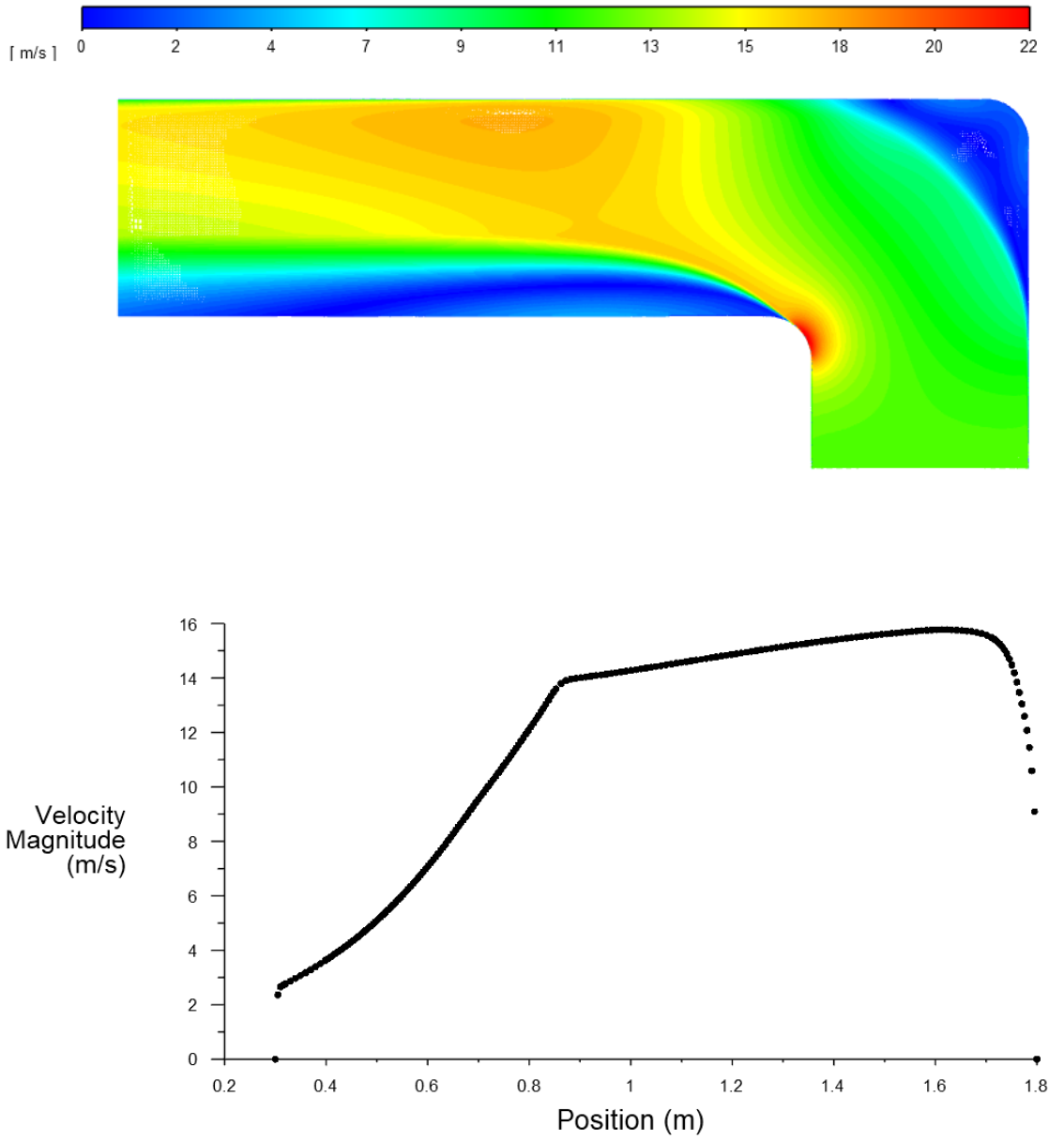


Figura 44: Codo sin álabes. Campos de velocidad en la figura superior y perfil de velocidad en la salida en la figura inferior.
Fuente: Propia - Resultado Fluent

Como era de esperar, la calidad del flujo es inaceptable y se arrastraría aguas abajo afectando las cámaras de prueba. La pérdida de carga se calcula como la diferencia del promedio ponderado en masa de la presión total en la entrada versus la salida de la sección y en este caso es de 16,22$[Pa]$, mientras que el índice de uniformidad es de 85 %. Se resumen las simulaciones hechas a la misma velocidad en la Tabla 4, donde se puede ver que la cantidad de álabes deflectores óptima para las pérdidas de carga es cercana a 8, ideal en HVAC. Sin embargo, la calidad del flujo se optimiza cercana a los 16 álabes deflectores y se puede ver aquella simulación en la Figura 45, mientras las otras simulaciones mostraban perturbaciones aguas abajo por la capa límite de los álabes.

N° Alabes	$\Delta P[Pa]$	Índice de Uniformidad
0	16,22	85 %
4	5,43	97 %
8	4,20	98 %
12	4,56	98 %
16	9,80	98 %

Tabla 4: Caídas de presión para diferentes configuraciones de álabes.

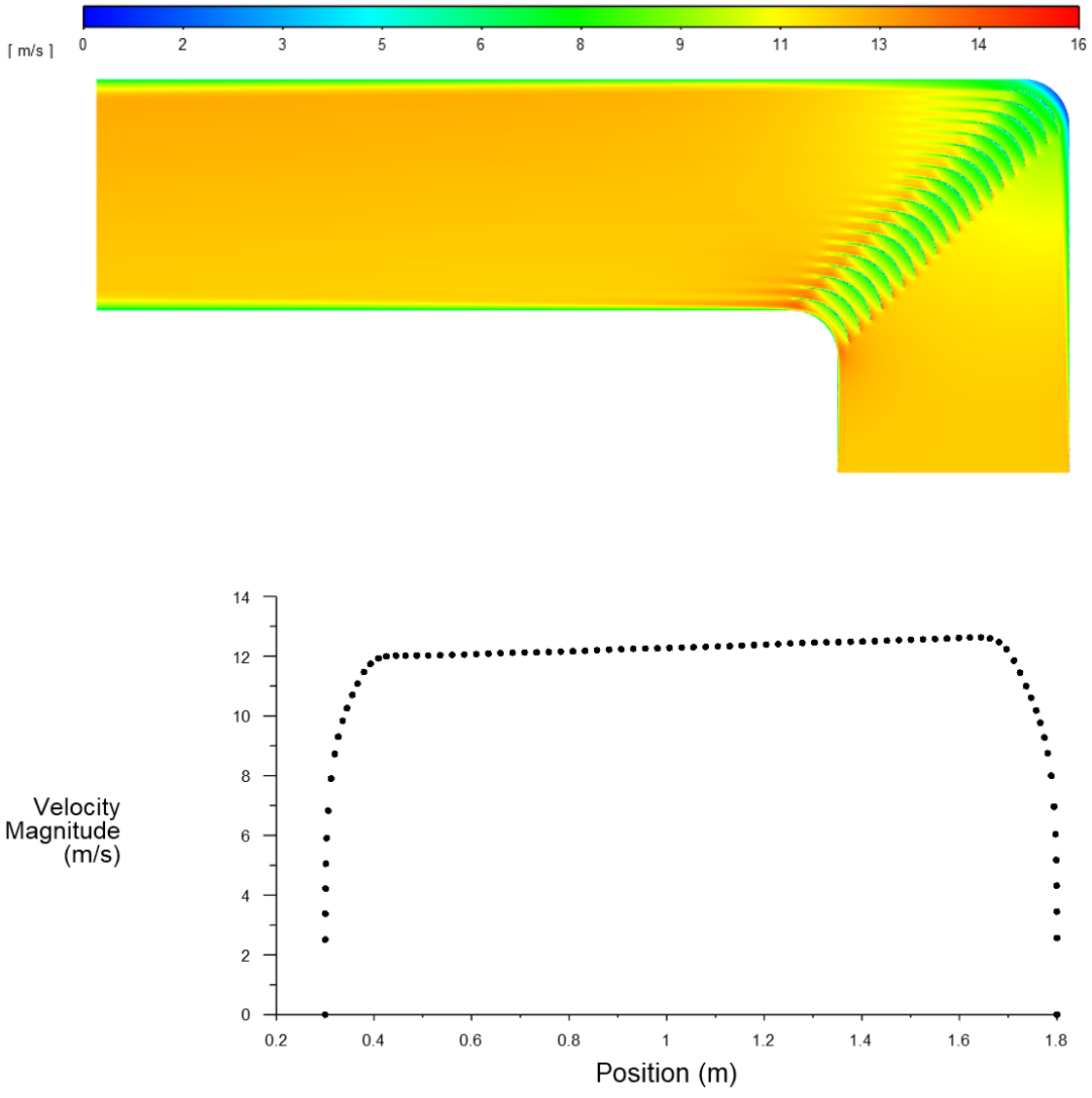


Figura 45: Codo con 16 álabes. Campos de velocidad en la figura superior y perfil de velocidad en la salida en la figura inferior.
Fuente: Propia - Resultado Fluent

A modo de ganar espacio para el desarrollo de la capa límite, se simularon codos de expansión con 16 álabes. El resultado, como se puede ver en la Figura 46, muestra una fuerte

separación de flujo. Claramente esto no se podía ver en los experimentos de Reinke[29], ya que la separación se recupera rápidamente a la salida del codo. La pérdida de carga entre bordes es de 31$[Pa]$.

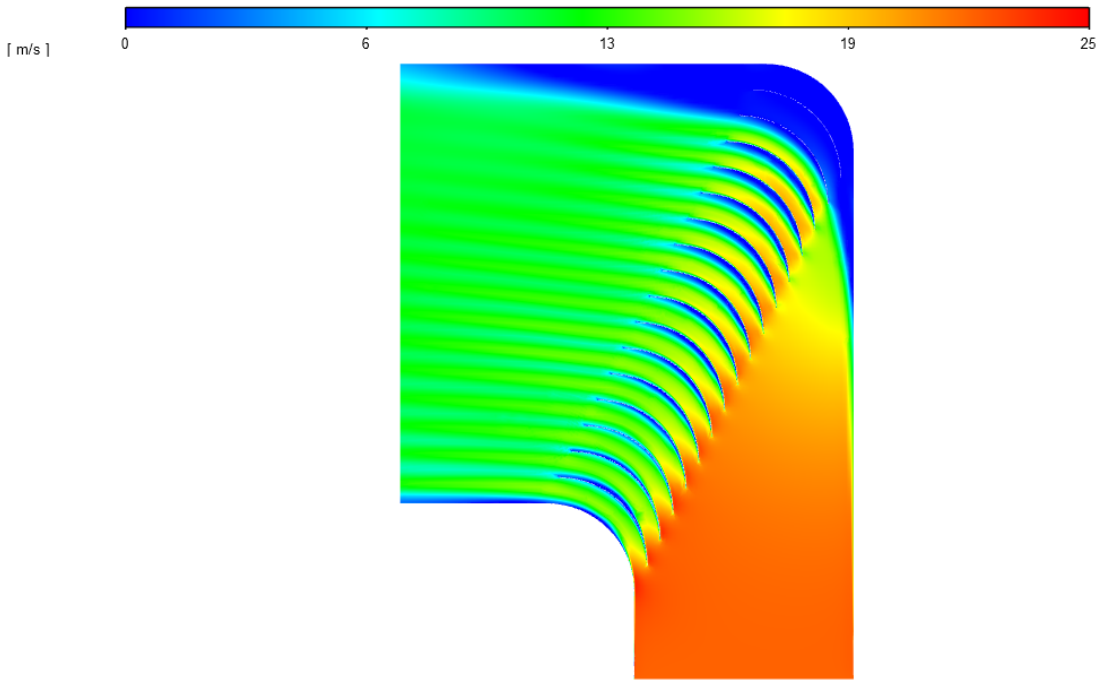


Figura 46: Codo contracción con 16 álabes.
Fuente: Propia - Resultado Fluent

Se hizo un esfuerzo por mejorar esta situación, generando codos con un radio interno diferente al externo, álabes de 1/4 de giro con radio y separación entre uno y otro variable. Debido a la dificultad en la construcción de los álabes, se decide ocupar sólo 9. Se logró una pérdida de carga de 30$[Pa]$, una mejora no muy grande en estos términos pero sí para efectos de homogeneidad de flujo, como se puede ver en la Figura 47.

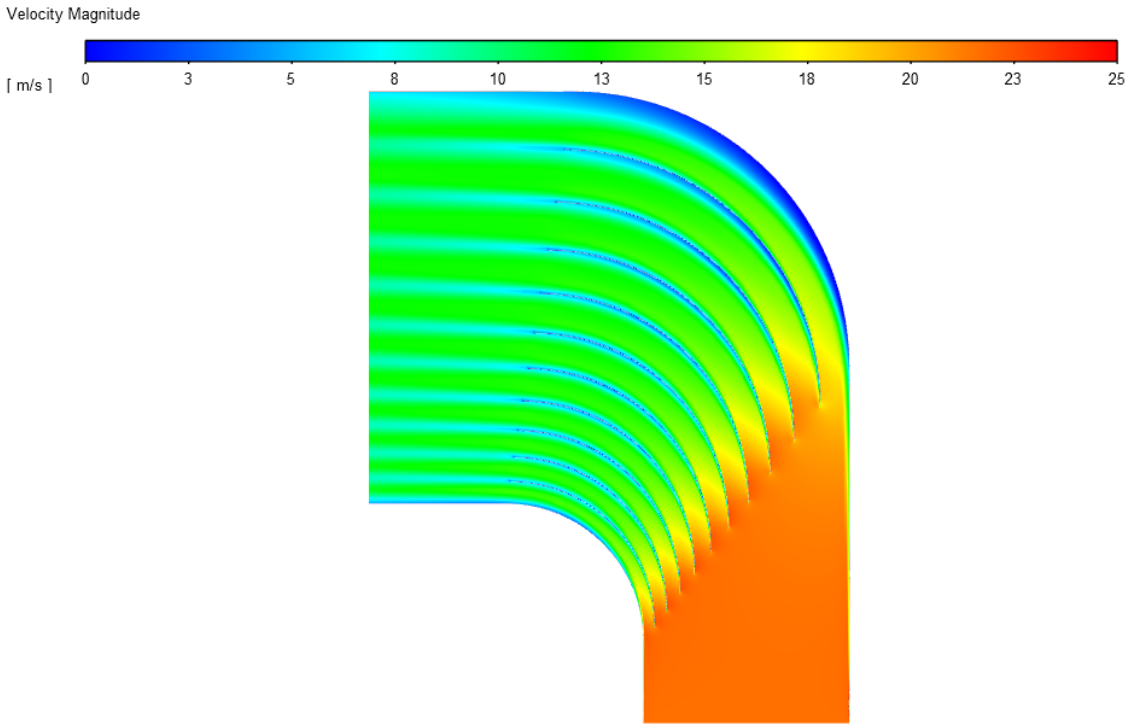


Figura 47: Codo con radio interno diferente al radio externo y álabes con espaciamiento y radio variable.
Fuente: Propia - Resultado Fluent

Existe una dificultad grande al hacer cada álabe deflector con un radio y separación diferentes. Un diseño simple puede ser construido con herramientas manuales, mientras que uno más complejo requerirá el uso de herramientas de manufactura asistida por computador. Es por ello que se prueba un diseño más simple con un codo expansivo de 500[mm] radio interior, 1000[mm] radio exterior y 10 alabes deflectores de radio constante de 500[mm]. Los resultados de este diseño se pueden ver en la Figura 48.

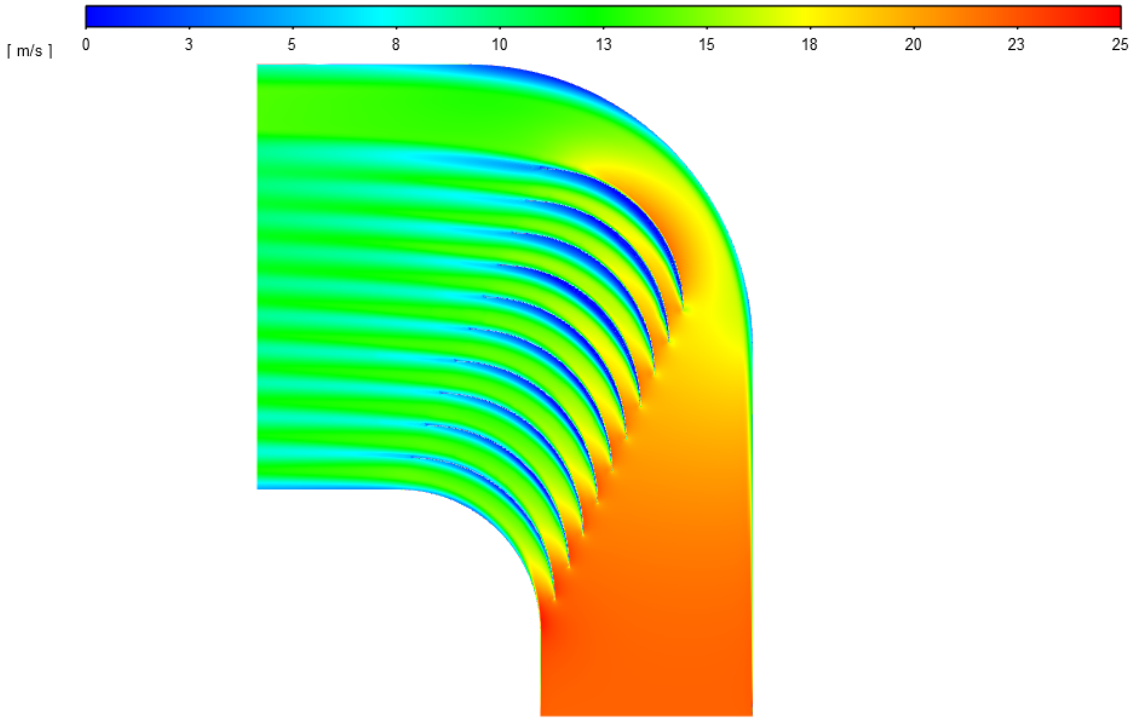


Figura 48: Alabes de 500[mm] de radio, 30 [Pa] de pérdida de carga
Fuente: Propia - Resultado Fluent

Teniendo esto en mente, se procede a hacer una simulación 3D del codo difusor. Los resultados de esta simulación se pueden ver en la Figura 49.

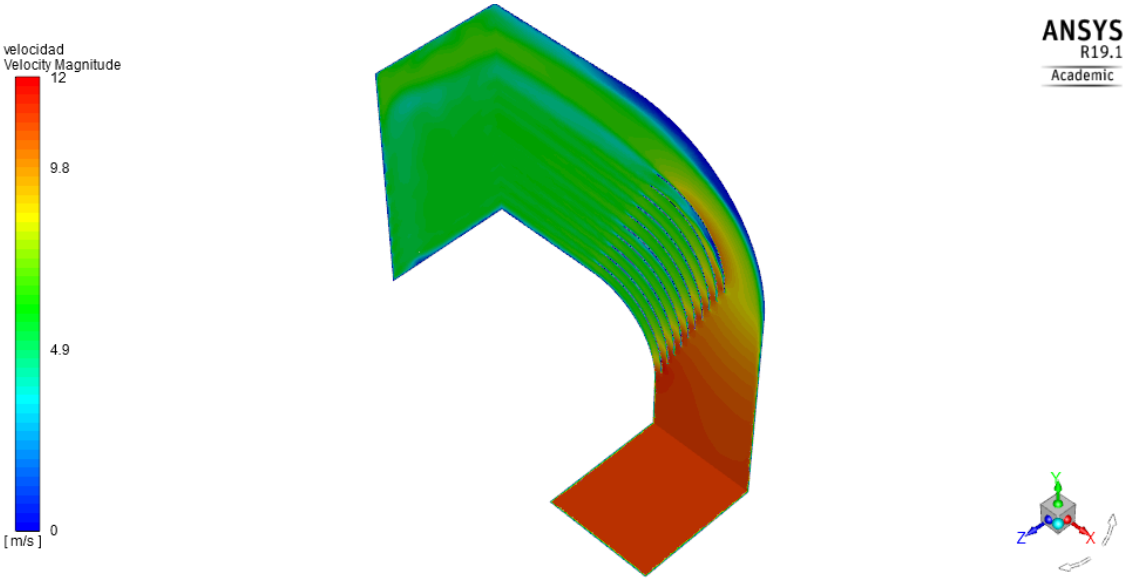


Figura 49: Simulación Codo Difusor.
Fuente: Propia - Resultado Fluent

El resultado muestra la generación de un flujo secundario en la parte externa del codo.

Se propone ocupar los mismos codos para cuando el flujo deba contraerse. En general, las reducciones de área son más robustas ante la separación de flujo que las expansiones de área. Esto queda comprobado en la Figura 50.

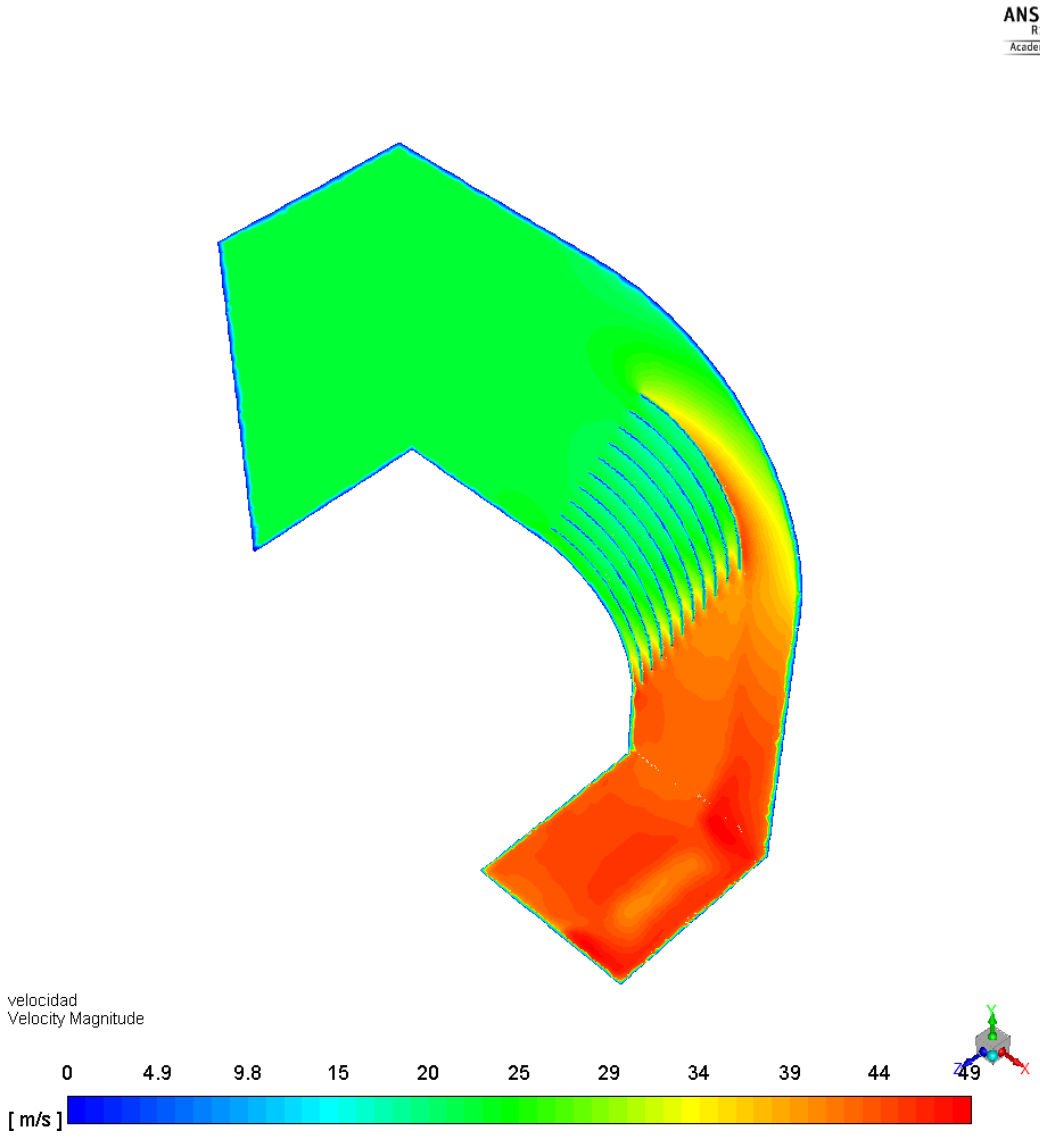


Figura 50: Simulación Codo Contracción.
Fuente: Propia - Resultado Fluent

Conforme a la configuración descrita en la versión 7, se vuelven a considerar los codos normales. A modo de reducir la dificultad de construcción y reducir la separación en la esquina exterior, se decide por ocupar codos con 11 álabes deflectores con un radio de curvatura mayor, los resultados para el prototipo se pueden ver en la Figura 51.

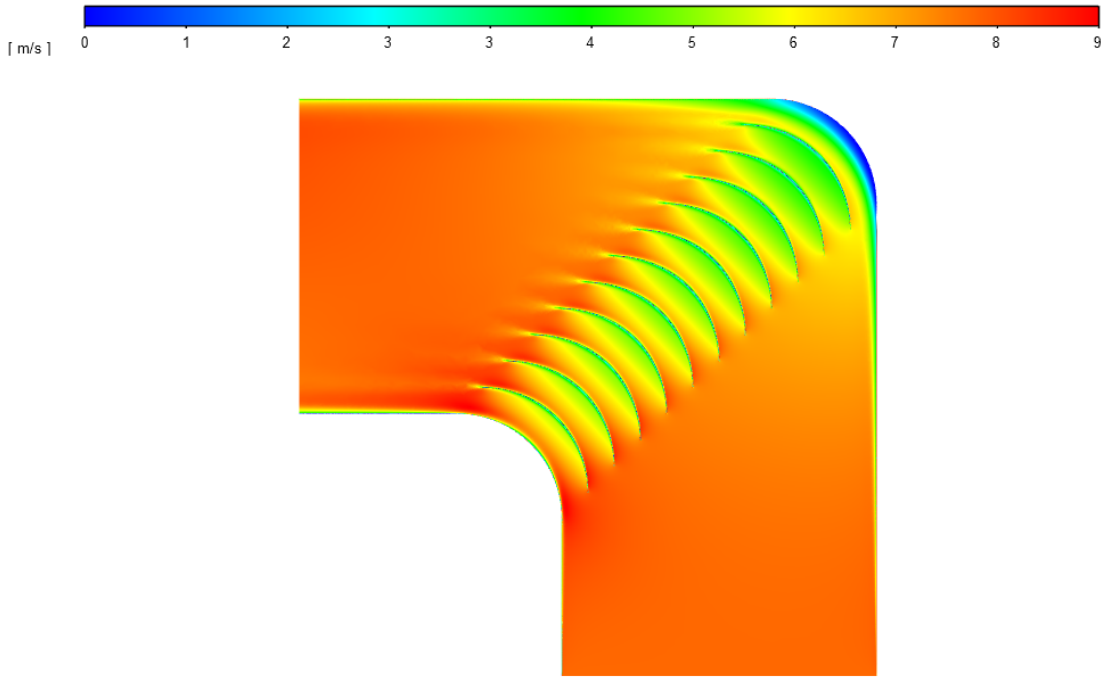


Figura 51: Simulación 2D Codo con 11 álabes deflectores radio de 250[mm]. Campo de velocidades.
Fuente: Propia - Resultado Fluent

Este diseño de codos normales se considera definitivo. Para los codos de expansión, el diseño definitivo es el presentado en la Figura 47, pues los resultados vistos en la Figura 49 mostraban muy poca homogeneidad de flujo.

El Uniformity Index y la pérdida de presión para ambas simulaciones en 2D se pueden ver en la Tabla 5

	Uniformity Index	ΔP $[Pa]$
Codo 11 álabes	98,7 %	2,3
Codo exp	95,8 %	12,8

Tabla 5: Pérdida de presión e Índice de Uniformidad para simulaciones finales de los codos 2D.

En comparación, con las mismas simulaciones pero en 3D, se llegan a los valores de la Tabla 6, a lo que se le agrega la simulación del codo de expansión funcionando para contraer el flujo. Estas simulaciones también se pueden ver en las Figuras 54, 52

	Uniformity Index	$\Delta P[Pa]$
Codo Exp 10 álabes	95,12 %	15,21
Codo Contr 10 álabes	98,57 %	12,32
Codo 11 álabes normal	97,74 %	4,07

Tabla 6: Pérdida de presión e Índice de Uniformidad para simulaciones finales de los codos 3D.

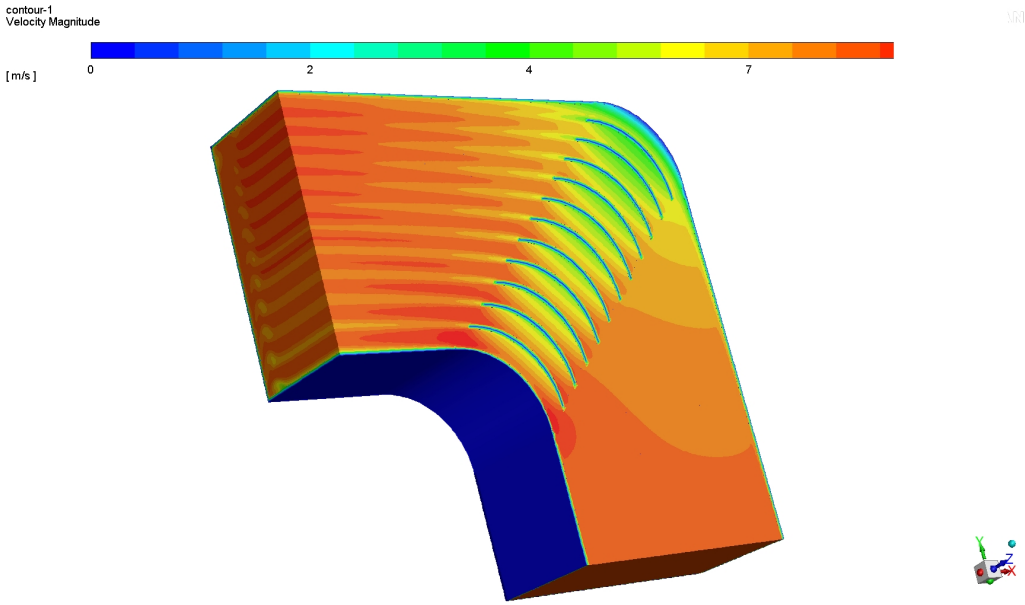


Figura 52: Simulación 3D del codo de 11 álabes y radio constante.
Fuente: Propia - Resultado Fluent

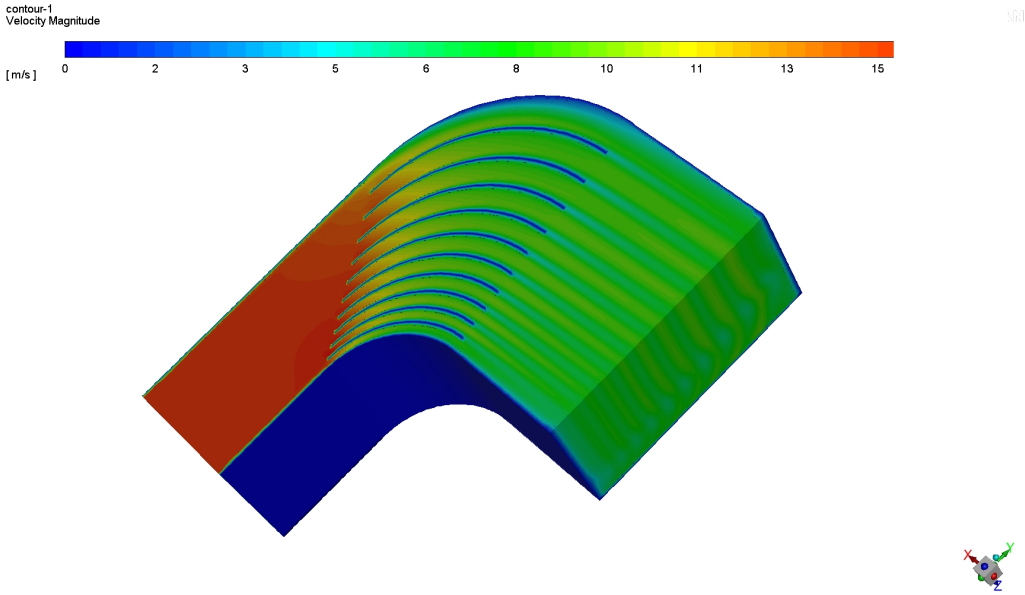


Figura 53: Simulación 3D del codo de expansión con álabes de diferente radio.
Fuente: Propia - Resultado Fluent

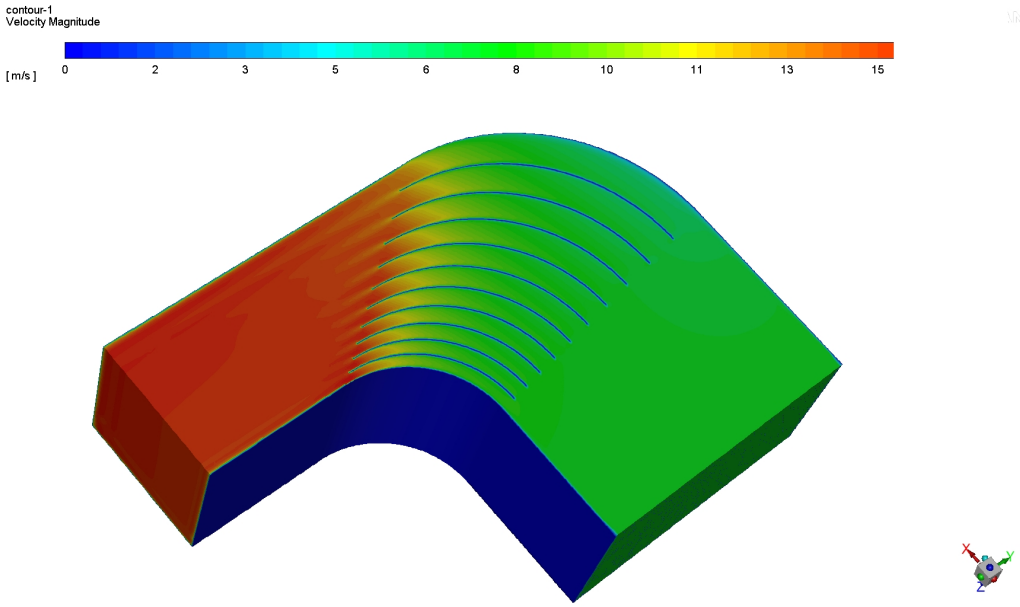


Figura 54: Simulación 3D del codo de expansión en flujo inverso con álabes de diferente radio.
Fuente: Propia - Resultado Fluent

4.2.3. Cámara de desarrollo de capa límite (Fetch)

Para comprobar la capacidad de la Fetch para reproducir una capa límite atmosférica escalada, se hicieron simulaciones con las espiras propuestas por Counihan e Irwin en distintos tipos de configuraciones[24][25] Algunas iteraciones intermedias se pueden ver en el Anexo 8.1.

A continuación se muestran las 3 configuraciones finales para la prueba de funcionamiento de la Fetch.

- Espiras elípticas con altura del 30 % del alto de la Fetch.
- Espiras triangulares con altura del 30 % del alto de la Fetch
- Espiras triangulares con altura del 50 % del alto de la Fetch

Todas estas simulaciones comparten la configuración de la Tabla 7 y los resultados se pueden ver a continuación.

Sin elementos de rugosidad	
Exponente de Ley de Potencia	α =1/6,5
Velocidad de Entrada	7,5$[m/s]$

Tabla 7: Configuración común para las simulaciones de las Fetch.

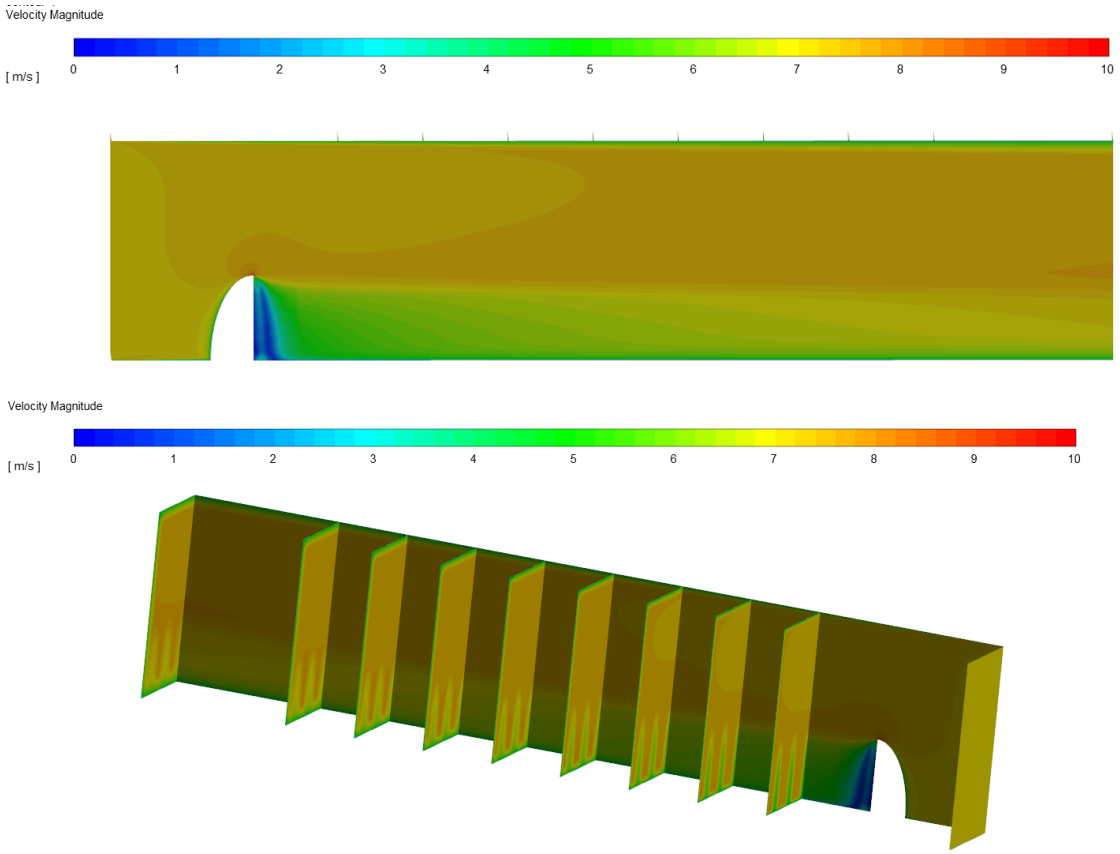


Figura 55: Simulación con espiras elípticas para conseguir un perfil de capa límite del 30 % de la altura total de la Fetch.

La configuración propuesta por Counihan no resulta ser adecuada para simular la capa límite atmosférica con éstos parámetros, lo cual se puede apreciar en la Figura 55. Se puede notar en la simulación, que la perturbación lateral producida por las espiras no se homogeneiza en el largo de la Fetch. Se pueden ver 6 superficies equiespaciadas aguas abajo de la espira, cada una con una separación equivalente al largo de la espira, con las cuales se puede ver el desarrollo del perfil. Como se estima que en la 6ta superficie el perfil debe haber llegado al estado deseado, se tomaron muestras de velocidad en líneas verticales a lo ancho de la Fetch, las cuales se pueden ver en la Figura 56.

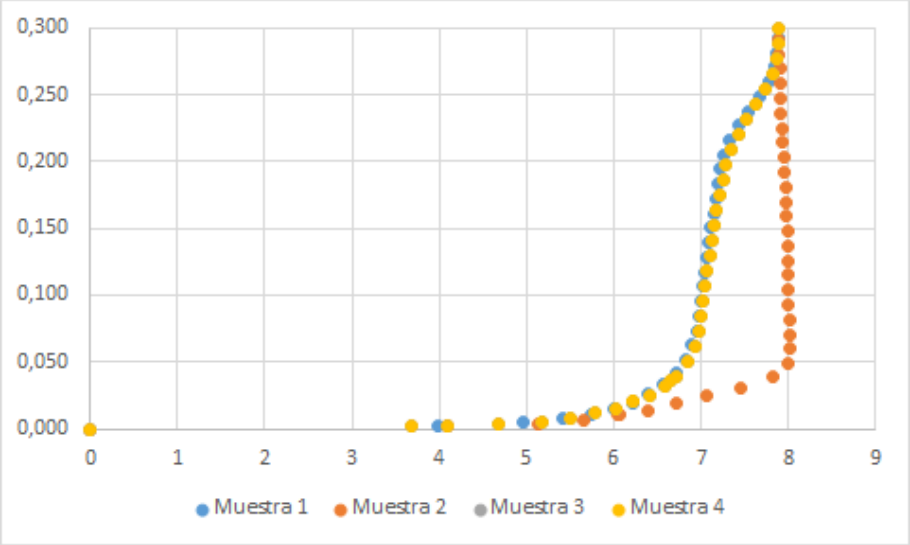


Figura 56: Muestras del perfil vertical de velocidades a una distancia desde el borde de la espira equivalente a 6 veces el alto de ésta.

Las muestras reflejan que la capa límite no se puede simular con esta configuración de espiras y comprueban las advertencias de Rahmat[23] sobre la necesidad de una gran longitud para la homogeneización de las perturbaciones de espiras elípticas.

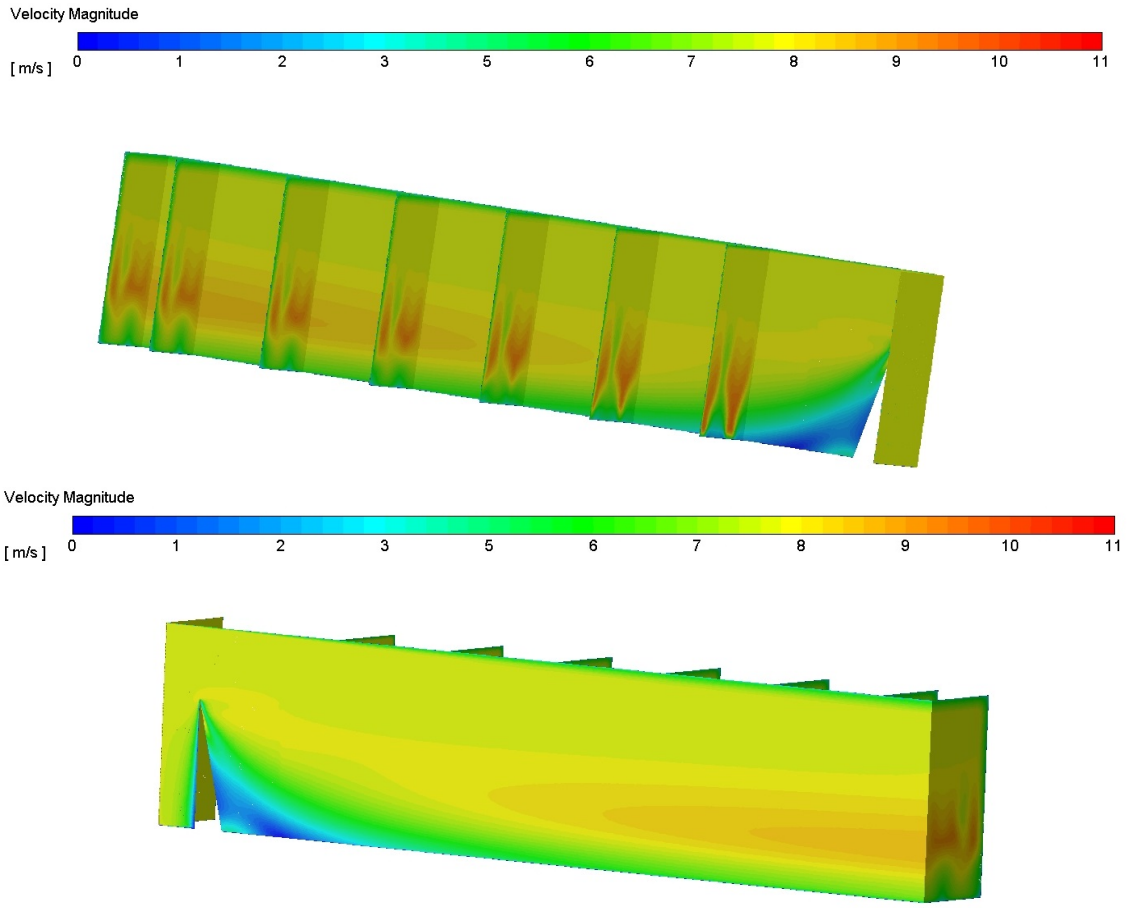


Figura 57: Simulación con espiras triangulares para conseguir un perfil de capa límite del 50 % de la altura total de la Fetch.
Fuente: Propia - Resultado Fluent

En la simulación con espiras triangulares para la generación de capa límite del 50 % de la altura de la Fetch, Figura 57, se puede ver que existen limitaciones para el tamaño de las espiras. Las perturbaciones fueron demasiado grandes y no lograron ser homogeneizadas hasta el final de la Fetch. Se tomaron muestras en la 6ta superficie y se graficaron en la Figura 58, las cuales reflejaron, al igual que en el caso anterior, que la generación de la capa límite atmosférica a escala es impracticable con esta configuración.

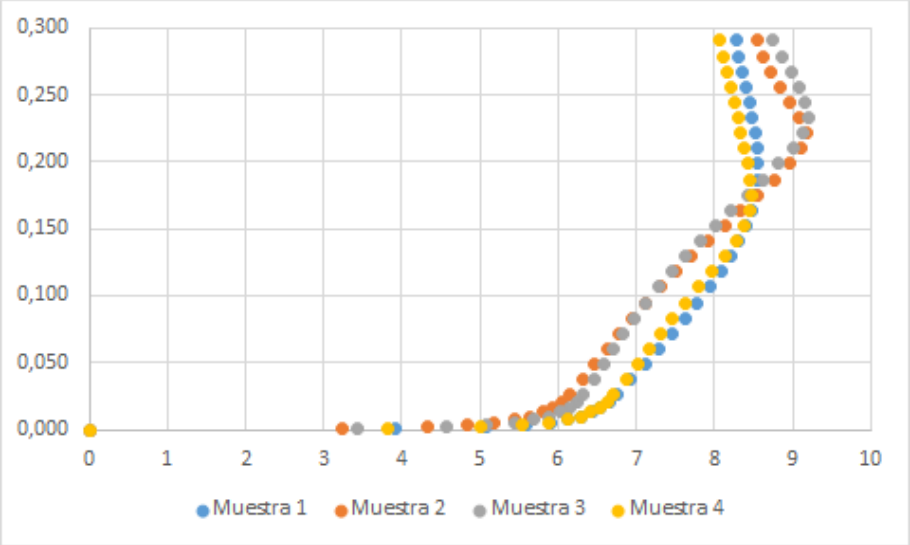


Figura 58: Muestras del perfil vertical de velocidades a una distancia desde el borde de la espira equivalente a 6 veces el alto de ésta.

Por otro lado, y buscando imitar los resultados de Shojaee[30], los cuales demostraban una buena homogeneización del perfil cuando la altura de la capa límite es alrededor del 30 % de la altura de la Fetch, los resultados se pueden ver en la Figura 59.

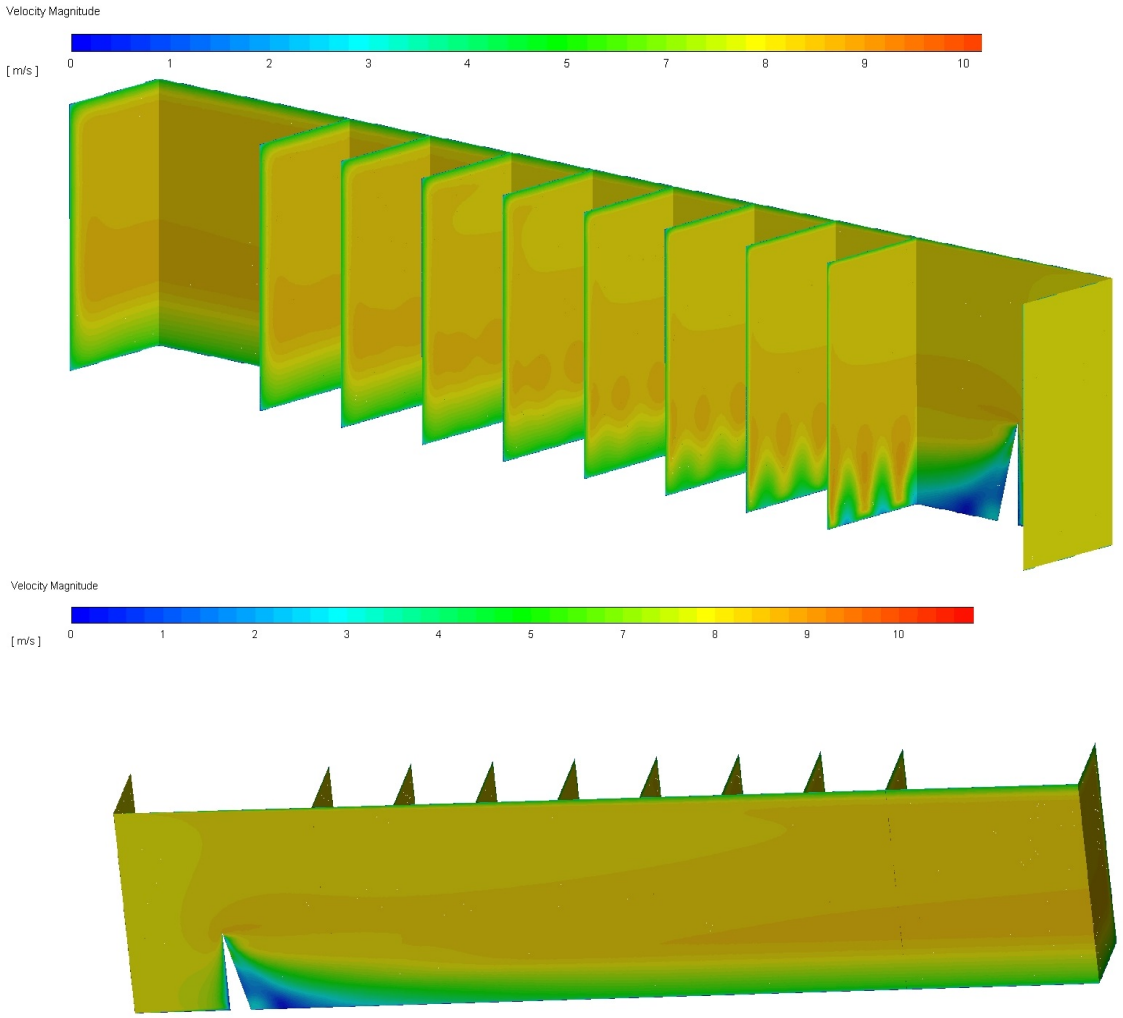


Figura 59: Simulación con espiras triangulares para conseguir un perfil de capa límite del 30 % de la altura total de la Fetch.
Fuente: Propia - Resultado Fluent

El perfil se homogeneizó lateralmente casi en su totalidad. Se tomaron las muestras en la 6ta superficie. Los resultados se pueden ver en la Figura 60. A diferencia de los otros, este perfil si logra ser lo suficientemente homogéneo y produce un perfil de velocidades con una forma parecida al de una capa límite atmosférica.

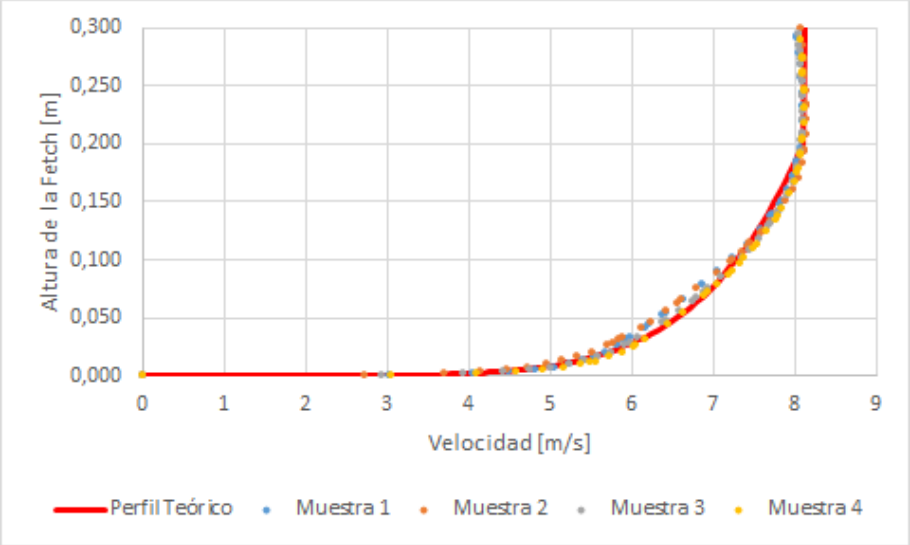


Figura 60: Simulación con espiras triangulares para conseguir un perfil de capa límite del 30 % de la altura total de la Fetch.

No se presentan en el cuerpo de este informe las simulaciones con elementos de rugosidad. Esto debido a que las ecuaciones para dimensionarlos salían de sus rangos de validez para los perfiles deseados, sin embargo, se pueden ver en el Anexo 8.1

Se detectaron las siguientes diferencias con respecto al perfil deseado:

- Debido al déficit de momentum en la zona inferior de la Fetch, y por conservación de masa, la velocidad del flujo libre tiende a ser mayor, en este caso cercana a $8[m/s]$, mientras la deseada era de $7{,}5[m/s]$.
- La altura donde la capa límite termina se encontró ligeramente abajo de los $200[mm]$, mientras la deseada era de $225[mm]$.
- El parámetro α de la ley de potencia difiere ligeramente.

Algunos diseñadores de ABLWT recomiendan que el techo de la Fetch tenga una altura ajustable, que se pueda levantar desde la cámara de pruebas formando un pequeño ángulo. Ésta característica permitiría reducir las variaciones de velocidad de flujo libre y del parámetro α, y probablemente tenga un efecto en la altura de la capa límite. Esta modificación generaría cambios en el diseño del túnel de viento, por lo que también debería considerarse en ocupar factores de corrección para los parámetros deseados.

La Fetch logra, con la última configuración, generar un perfil de velocidades que potencialmente pueda replicar una capa límite atmosférica a escala.

4.2.4. Difusor

Se diseñó un difusor para acoplarlo con el ventilador del LER. Como éste tiene dos entradas de flujo y una de salida, el difusor no solo tiene que ampliar su área transversal, sino que también debe dividirse en 2, como se puede ver en la Figura 35

La simulación arrojó fuertes separaciones de flujo, recirculaciones, poco aprovechamiento del espacio del difusor y una expansión de flujo no homogénea con un Uniformity Index del 80 %, resultados que se pueden ver en la Figura 61 y 62. Por lo tanto, la funcionalidad del difusor no se está aprovechando.

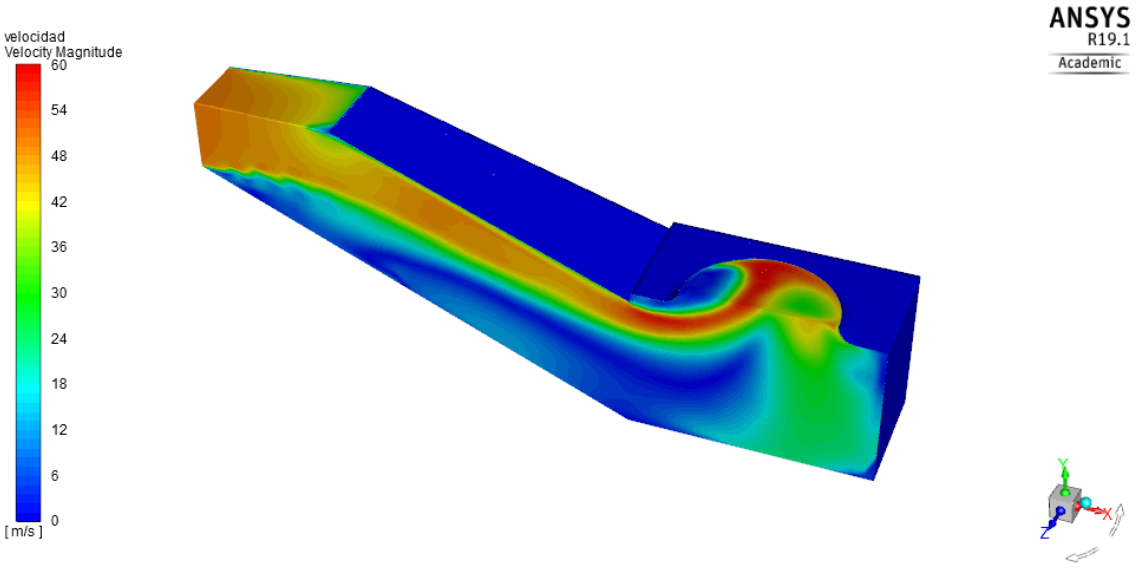


Figura 61: Simulación del difusor adaptado para el ventilador del LER. Gráfica de velocidad.

Fuente: Propia - Resultado Fluent

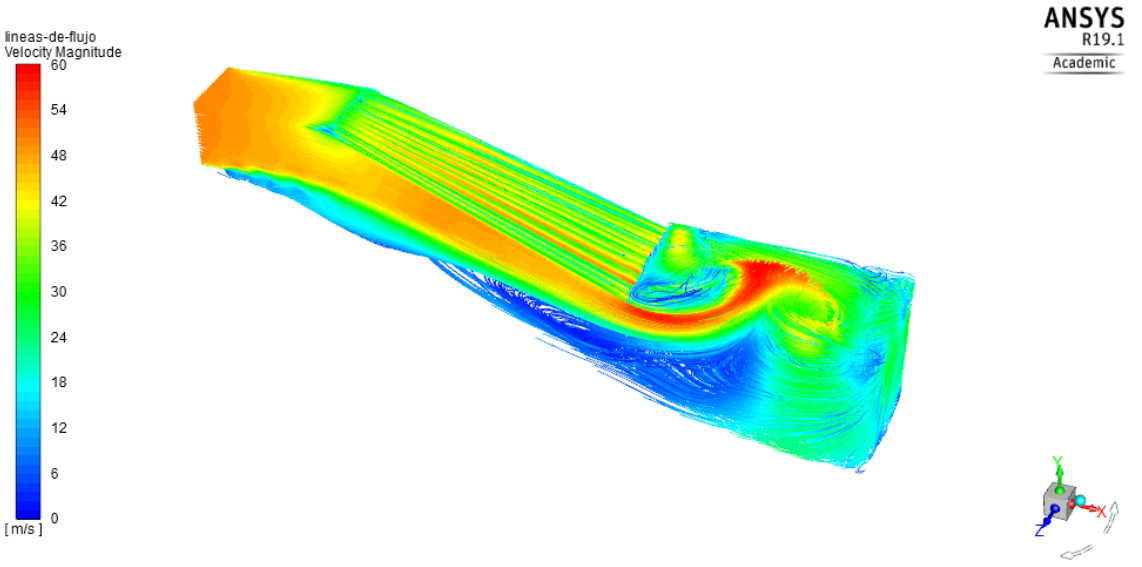


Figura 62: Simulación del difusor adaptado para el ventilador del LER. Gráfica de líneas de flujo.

Fuente: Propia - Resultado Fluent

Con estos resultados, se procede a desechar la opción del ventilador del LER. Se simuló el difusor con las medidas resultantes debido a la estructura y sin elementos de control

de capa límite, a modo de tener una referencia. Tal como se puede ver en la Figura 63, hay grandes separaciones de flujo que deben ser evitadas por los elementos de control. El parámetro "Uniformity Index.[es] de 72 % y la pérdida de presión es de 188[Pa]

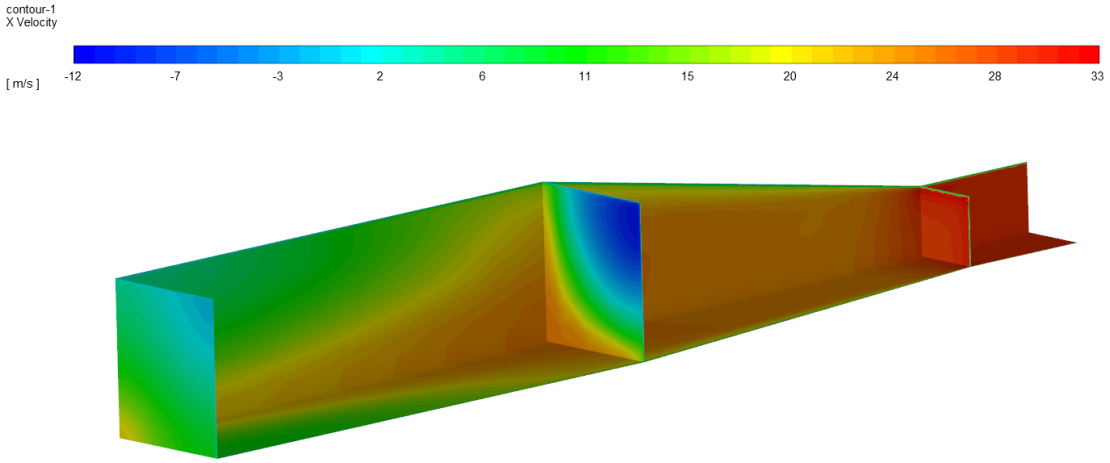


Figura 63: Difusor sin elementos de control de capa límite. Campos de velocidad.

Fuente: Propia - Resultado Fluent

Existen variados métodos de control, los más costosos implican succionar aire desde las paredes del difusor, mientras que otros consisten en poner pantallas o placas divisoras. Se diseñó y simuló un difusor con placas divisoras que mantuvieran un ángulo de apertura menor a 7°. Los resultados de esta simulación se pueden ver en la Figura 64

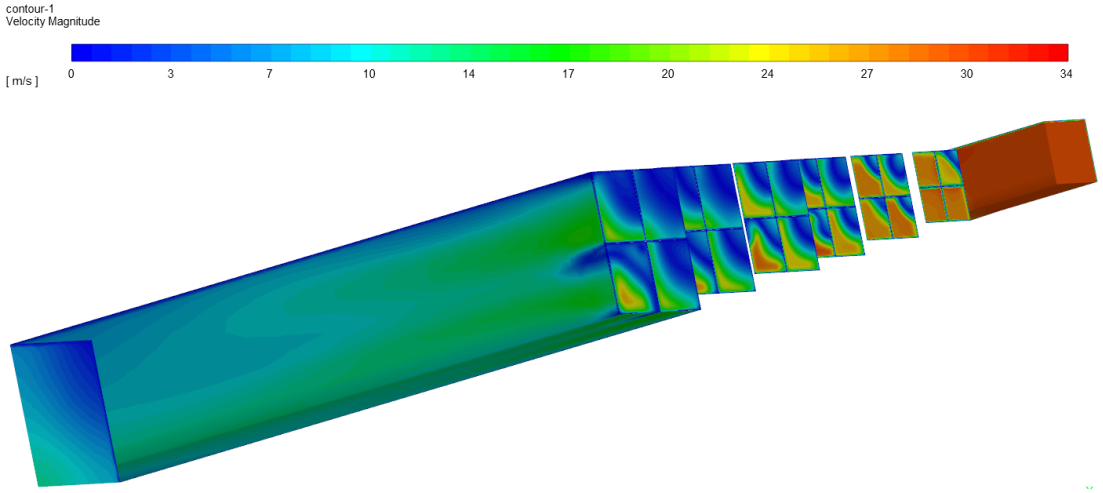


Figura 64: Simulación del difusor con 3 placas divisoras horizontales y 3 verticales. Campos de Velocidad

Fuente: Propia - Resultado Fluent

Se puede ver que este tipo de diseño no está exento de separación de flujo. La simulación no tuvo buena convergencia, apreciándose oscilaciones en la pérdida de presión de 50[Pa]. Este tipo de comportamiento de la simulación es típico de cuando se intentan ocupar wall

functions y existen recirculaciones de flujo. Si bien, la simulación no es precisa, basta con conocer que tiene recirculaciones como para desechar el diseño. El peak de caída de presión obtenido fue cercano a los 235$[Pa]$ y el Uniformity Index menor de 83 %.

Se procede entonces a revisar el método de poner pantallas intermedias. Una revisión más profunda de la bibliografía muestra que las pantallas deben colocarse de forma tal que queden lo más perpendicular a las paredes posibles y se recomiendan ciertas relaciones para asegurar el buen funcionamiento. Por esto se consideró una pantalla cuya superficie tenga la forma de una esfera y que esté cortada de manera de entrar en el difusor, así como se muestra en la Figura 65. Por otro lado, la cantidad de pantallas que se necesitan depende del ángulo de apertura del difusor y de la razón de área y está dada por el gráfico de la Figura 66. Para seleccionar el tipo de pantalla que lograría un buen funcionamiento, se debe considerar el parámetro K_{sum} y la Figura 67, el cual es la suma de los coeficientes de pérdida de carga de ambas pantallas. También se menciona que estas recomendaciones son conservadoras y se pueden obtener resultados con menor pérdida de carga[31].

Se probaron 5 combinaciones:

- Una pantalla plana en la entrada del difusor
- Una pantalla esférica en la entrada del difusor
- Una pantalla esférica en la mitad del difusor
- Dos pantalla esféricas a 1/3 y 2/3 del difusor
- Dos pantalla planas a 1/3 y 2/3 del difusor

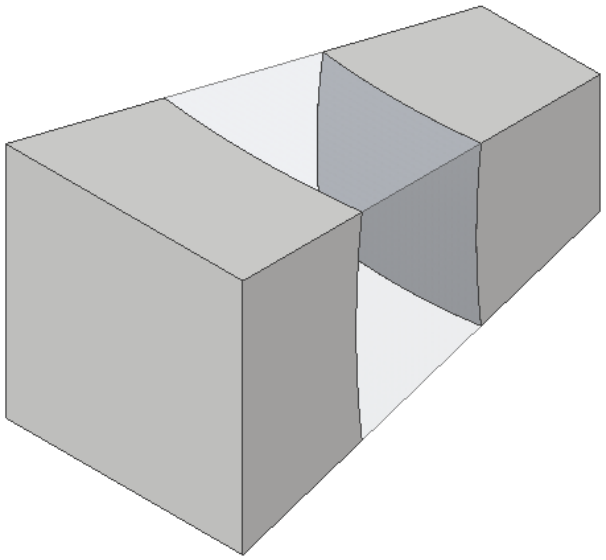


Figura 65: Modelo del difusor con pantallas esféricas.
Fuente: Propia - Inventor Professional

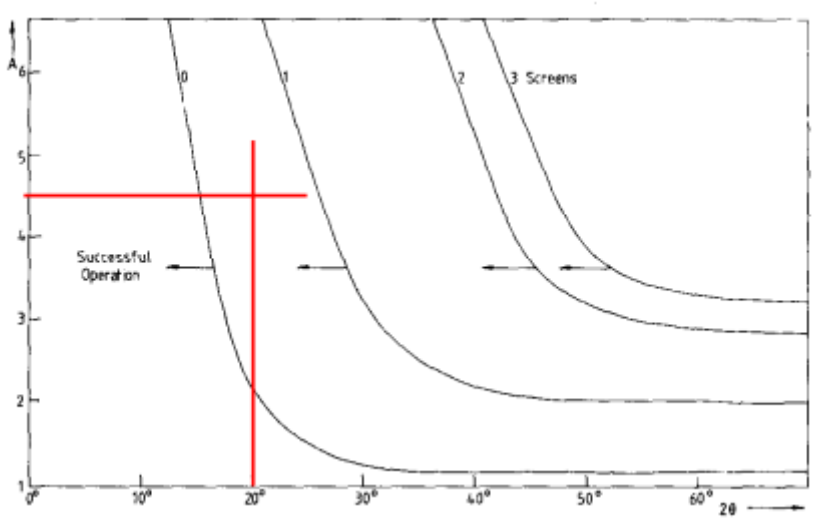


Figura 66: Cantidad de pantallas para un funcionamiento correcto según el ángulo de apertura del difusor y la razón de áreas.[31]
En rojo marcado el punto que corresponde a este difusor.

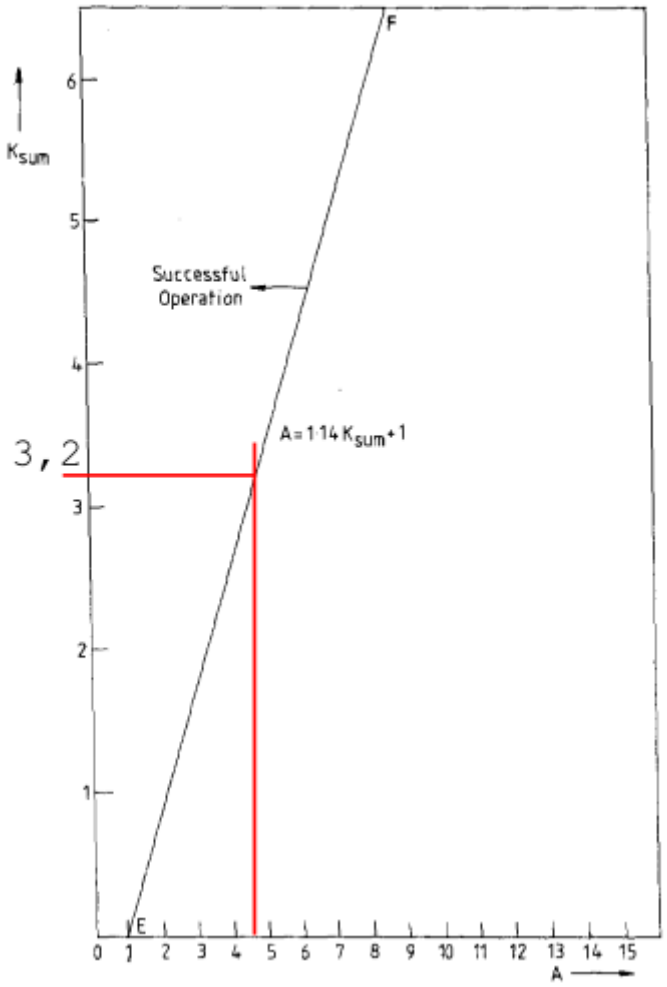


Figura 67: Constante K de pérdida de presión combinado de ambas pantallas para diferentes razones de área.[31]
En rojo marcado el punto que corresponde a este difusor.

Mientras el primer y segundo caso tuvieron resultados parecidos a que si no hubiese pantalla alguna, se notó una mejoría en el cuarto caso. Esta configuración tuvo resultados muy buenos en términos de uniformidad de flujo (mayor al 90 %), pero una pérdida de carga demasiado grande. Se iteró este cuarto caso con pantallas planas para simplificar el diseño, pero el patrón de flujo se volvió inestable en la simulación, lo cual es típico de un flujo con recirculación. Esto no es de sorprender, puesto que se sabe que cuando el flujo no choca de forma perpendicular contra la pantalla, éste tiende a rebotar. Se hicieron dos iteraciones más del cuarto caso pero con pantallas con mayor porosidad, buscando una menor pérdida de carga. Los resultados se pueden ver en las Figuras 68, 69 y 70 y en la Tabla 8.

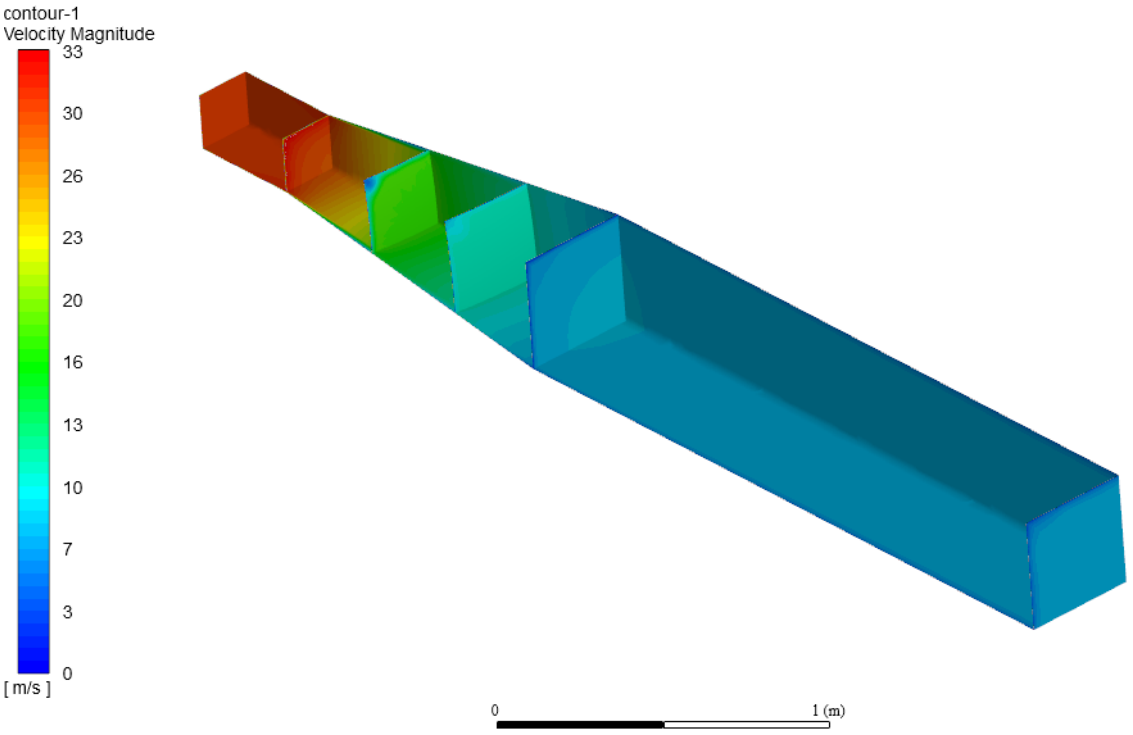


Figura 68: Difusor Iteración 1.
Fuente: Propia - Resultado Fluent

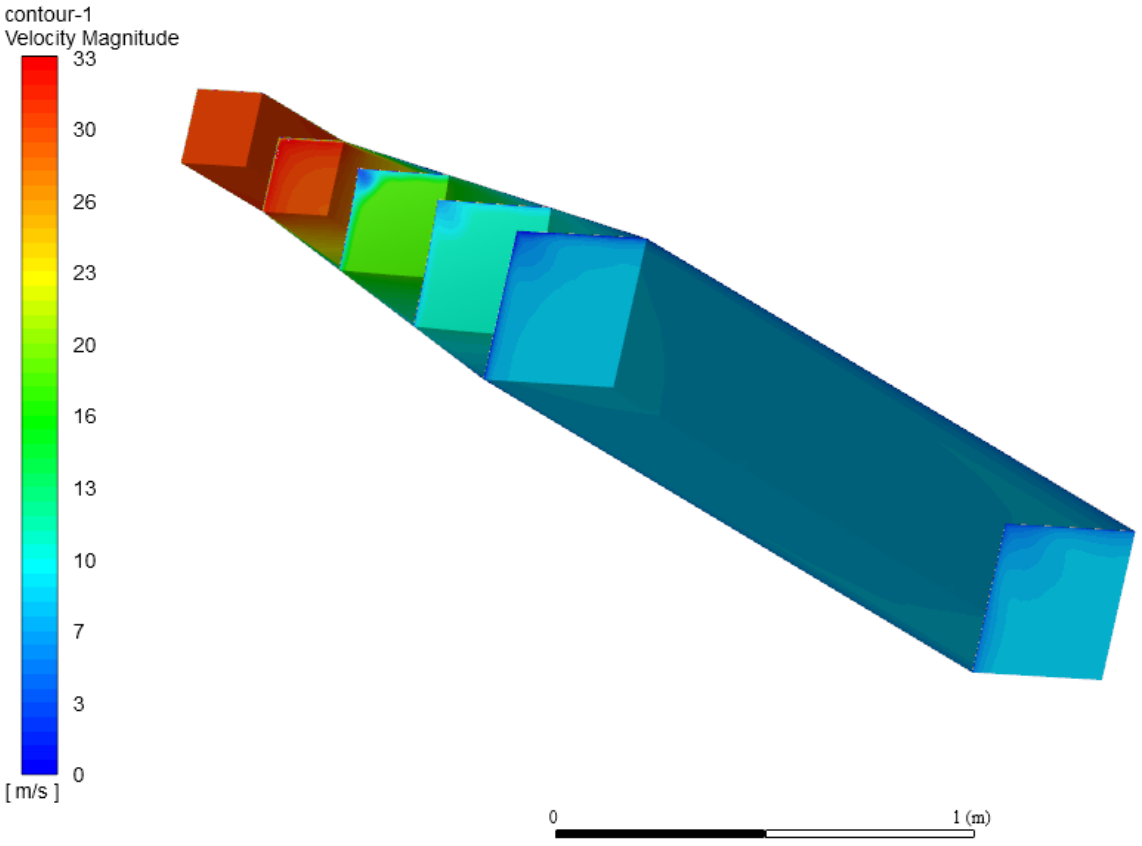


Figura 69: Difusor Iteración 2.
Fuente: Propia - Resultado Fluent

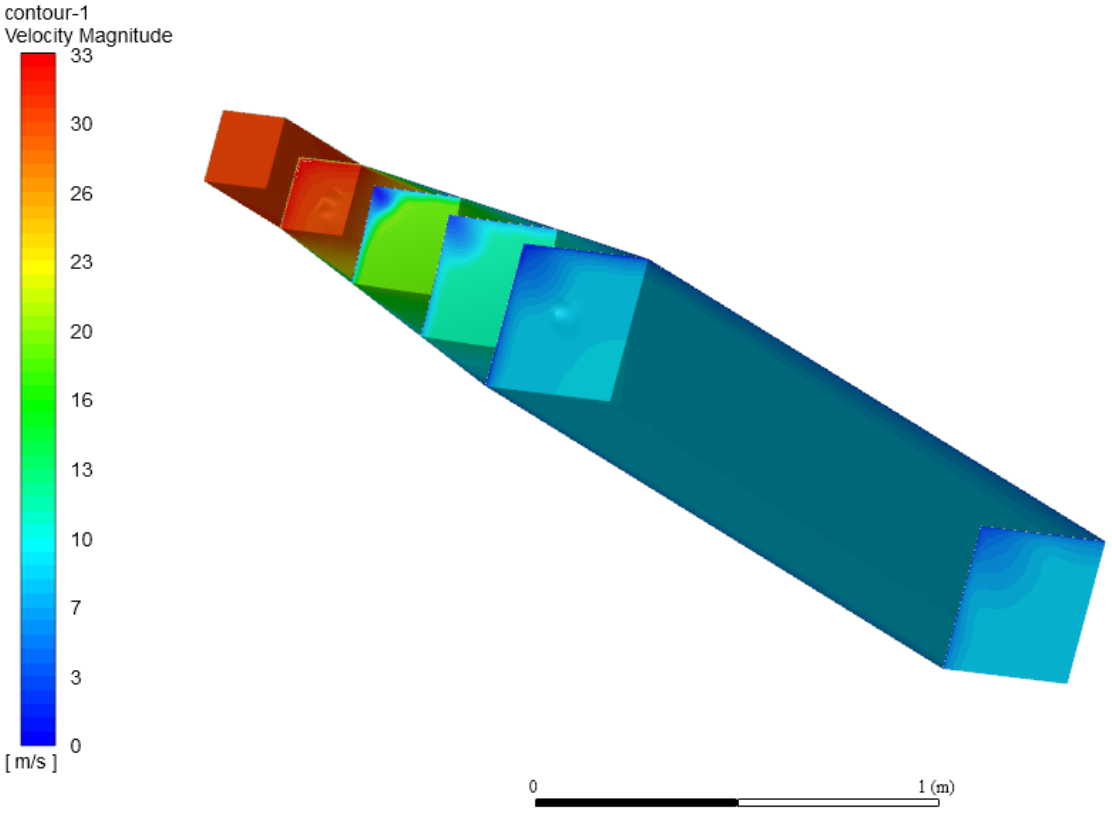


Figura 70: Difusor Iteración 3.
Fuente: Propia - Resultado Fluent

Iteración	N° Mesh 1^{era} y 2^{da} Pantalla	ΔP [Pa]	Índice de Uniformidad [–]
1	18-20	404,6	0,97
2	14-16	321,1	0,95
3	10-12	257,2	0,92

Tabla 8: Resumen de datos de las diferentes iteraciones del difusor.

Finalmente, el difusor más optimizado se logró con una malla comercial Mesh N°10 seguida de una N°12, cuyas porosidades son 0,58 y 0,64 respectivamente. La pérdida de carga baja a 257$[Pa]$ y las variaciones del perfil de velocidad bajaron solo hasta el 92 %.

4.2.5. Contracción

Se realizó una simulación de la contracción basada en los parámetros de diseño de Javed y Ali[22] y las restricciones de ángulo de apertura del grupo Intech[21] y Dommelen[16]. El primer parámetro indica que el punto de inflexión debe estar a una distancia de 0,6 veces el largo de la contracción cercano al lado angosto. Se recomienda que el segundo parámetro tenga un semi-ángulo de apertura de 12° y no sea mayor a 12,5° para contracciones de entrada para túneles abiertos y 15° para túneles cerrados. Los parámetros resultantes pueden verse en la Tabla 9.

Ángulo Horizontal	30 °
Ángulo Vertical	24 °
Largo	882 [mm]
Ancho Entrada	848 [mm]
Altura Entrada	750[mm]
Ancho Salida	375 [mm]
Altura Salida	375 [mm]
Razón de Contracción N	4,52

Tabla 9: Parámetros de diseño de la contracción

Los resultados muestran que las variaciones del perfil de velocidad son menores al 99 %. El perfil de velocidad es apreciable en la Figura 71.

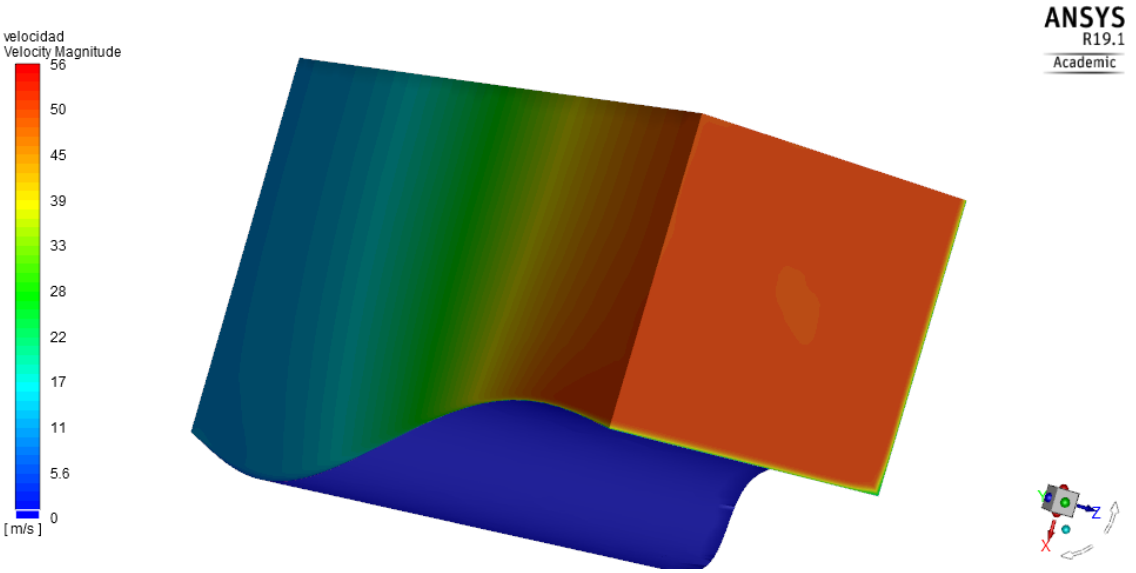


Figura 71: Contracción, modelo 3D.
Fuente: Propia - Resultado Fluent

Después de la modificación donde la razón de contracción pasó de 4,52 a 4, se hizo la simulación de nuevo con los parámetros de la Tabla 10. La ecuación que gobierna la forma de la contracción es la descrita en la Ecuación 39

$$\frac{375}{2} + t^3\frac{625}{114354828} - t^4\frac{625}{44827092576} + t^5\frac{125}{9884373913008} - t^6\frac{625}{156924320242915008} \quad (39)$$

Ángulo Horizontal	24 °
Ángulo Vertical	24 °
Largo	882 [mm]
Ancho Entrada	750 [mm]
Altura Entrada	750[mm]
Ancho Salida	375 [mm]
Altura Salida	375 [mm]
Razón de Contracción N	4

Tabla 10: Parámetros de diseño de la contracción.

Los resultados se pueden ver en la Figura 72. Las variaciones del perfil de velocidad variaron poco y por precisión de decimales siguen siendo 99 %.

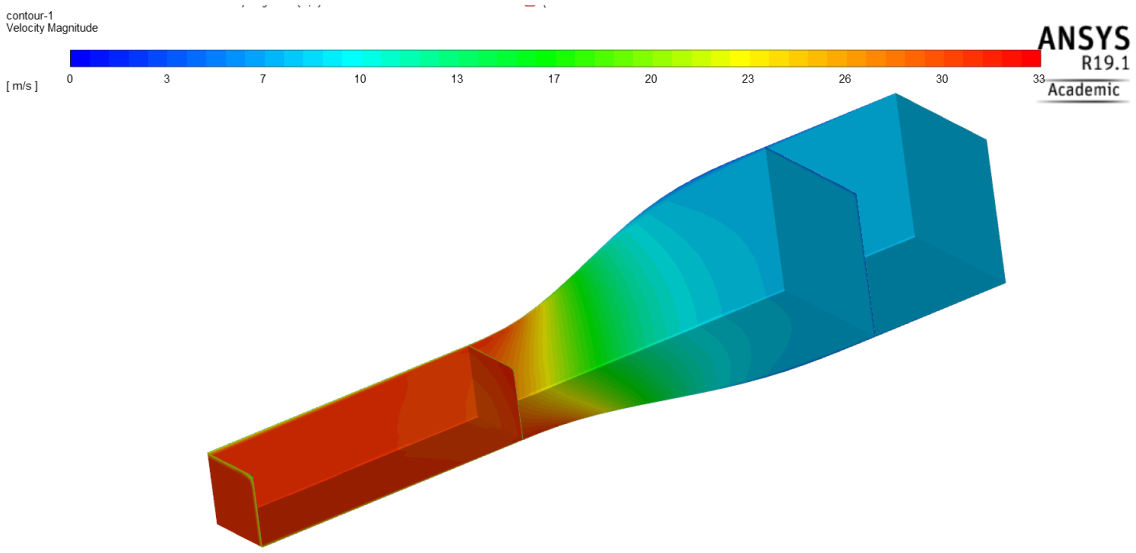


Figura 72: Contracción, campos de velocidad.
Fuente: Propia - Resultado Fluent

4.2.6. Cámara de estabilización

Se diseñan dos cámaras de estabilización, una para la cámara de pruebas de capa límite y otra para la de pruebas aerodinámicas. La primera considera una honeycomb construida en base a bombillas y sujeta entre rejillas. La segunda considera otra honeycomb construida de la misma manera y además dos pantallas.

La simulación CFD de estos componentes es extensiva en el uso computacional y por lo tanto se deja fuera de alcance. La determinación de configuraciones ideales de la honeycombs y pantallas por simulación se proponen como trabajo a futuro, en especial en el ámbito de configuraciones fractales para la generación de flujos especiales. Las simulaciones que contienen estos elementos se harán con con el modelo "Porous Jump".

Honeycomb: Las bombillas son comerciales y sus dimensiones dependerán del proveedor, pues no existen bombillas estándar. Para el diseño se consideran bombillas "tipo Mc'Donald" cuyas dimensiones son las siguientes [32]:

- Diámetro: 7 $[mm]$
- Diámetro interno: 6,8 $[mm]$
- Diámetro externo: 7,2 $[mm]$
- Largo: Cortadas a 49$[mm]$

Pantallas: Las pantallas usadas para reducir la turbulencia deben tener porosidad mayor a 0,57. Mientras que la pérdida de carga de dos pantallas seguidas una de otra es la suma de la pérdida de carga de cada una, el factor de reducción de turbulencia es el producto entre los dos factores. Se recomienda que el espaciado entre las pantallas sea mayor a 30 veces el tamaño del poro de la pantalla (apertura + diámetro de alambre) y de alrededor de 500 veces el diámetro del alambre[11]. Mientras tanto, en el estudio de Scheiman[33] se ocuparon pantallas con porosidad cercana a 0,69. En base a esto, se diseña una configuración de pantallas con las siguientes características.

- Malla comercial Mesh N°10
- Diámetro de alambre: 0,5 $[mm]$
- Espacio entre alambres: 2 $[mm]$
- Porosidad: 0,64
- Espacio entre Honeycomb y primera pantala: 30 $[mm]$
- Espacio entre pantallas: 150 $[mm]$

El modelo de la Honeycomb queda entonces como se puede ver en la Figura 73

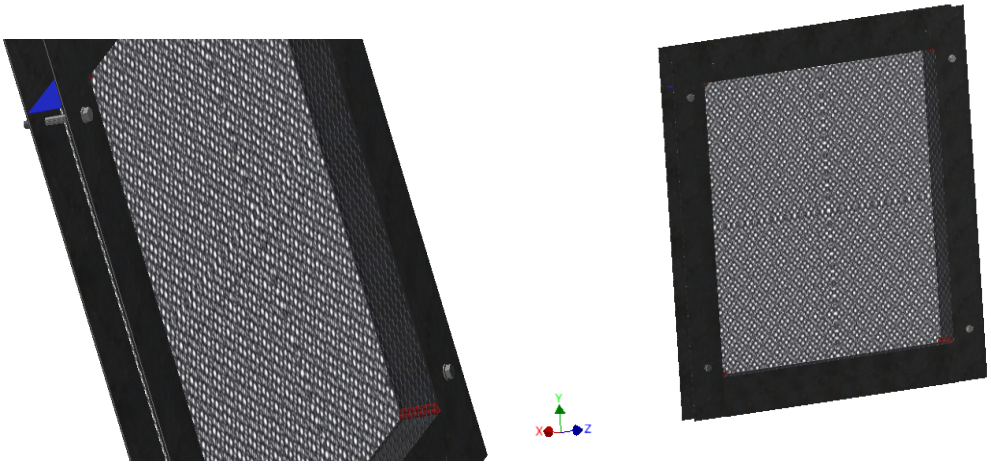


Figura 73: Honeycomb, en rojo se ve una de las secciones de bombillas y en azul se ve la placa que las aprieta hacia abajo.
Fuente: Propia - Inventor Professional

4.3. Punto de equilibrio: pérdidas de carga y selección del ventilador

Se resumen las pérdidas de carga en la Tabla 11.

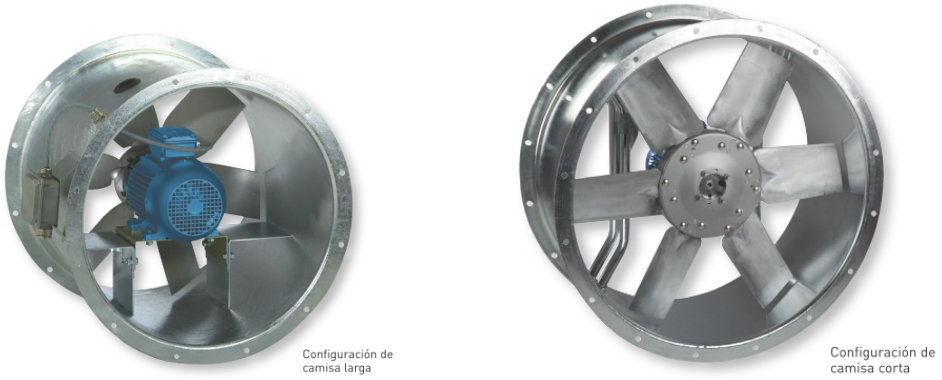
Velocidad	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	$[m/s]$
	ΔP						$[Pa]$
Pre-Pantalla HC1	0,00	1,48	5,92	13,32	23,68	36,99	
HC1	0,00	1,55	5,78	12,49	21,58	32,97	
Post-Pantalla HC1	0,00	1,48	5,92	13,32	23,68	36,99	
Screen 1	0,00	2,94	11,77	26,47	47,06	73,54	
Screen 2	0,00	2,94	11,77	26,47	47,06	73,54	
Contracción	0,00	0,84	3,37	7,58	13,48	21,07	
Difusor	0,00	25,73	103,65	257,00	456,89	713,89	
Codo 1 - norm	0,00	0,45	1,81	4,08	7,25	11,32	
Codo 2 - norm	0,00	0,45	1,81	4,08	7,25	11,32	
Pre-Pantalla HC2	0,00	1,48	5,92	13,32	23,68	36,99	
HC2	0,00	1,55	5,78	12,49	21,58	32,97	
Post-Pantalla HC2	0,00	1,48	5,92	13,32	23,68	36,99	
Fetch	0,00	0,78	3,11	7,00	12,44	19,44	
Codo 3 - Contr	0,00	1,26	5,03	11,32	20,13	31,45	
Codo 4 - Dif	0,00	1,69	6,76	15,22	27,05	42,27	
TOTAL	**0,00**	**46,10**	**184,32**	**437,48**	**776,47**	**1211,75**	$[Pa]$

Tabla 11: Pérdidas de carga por sección, la CP1 no se agrega porque está contabilizada en la pérdida de carga de la contracción.

Se seleccionaron dos tipos de ventiladores tubulares helicoidales de Soler&Palau. Esto pensando en que los ventiladores tienen que tomar el flujo en sentido axial y entregarlo en sentido axial. Este tipo de ventiladores son de gran caudal y gran presión. Los ventiladores axiales más comunes suelen ser de poco salto de presión y no producirían un flujo lo suficientemente veloz para túneles de viento. En otras memorias se ha visto que el diseño del ventilador para el túnel de viento es un tema en sí mismo.[5]

- TGT/2-500-6/12°-2,5kW
- TGT/2-560-6/18°-5,5kW

La representación del modelo tipo se puede ver en la Figura 74. El primero se selecciona pensando en ponerlo en paralelo con uno gemelo y el segundo como individual. Las curvas de los ventiladores junto al punto de operación calculado del túnel para 30$[m/s]$ se pueden ver en las Figuras 75 y 76.



(a) Ventilador camisa larga. (b) Ventilador camisa corta.

Figura 74: Ventiladores Helicoidales Tubulares Soler & Palau
Fuente: Catálogo TGT Soler & Palau

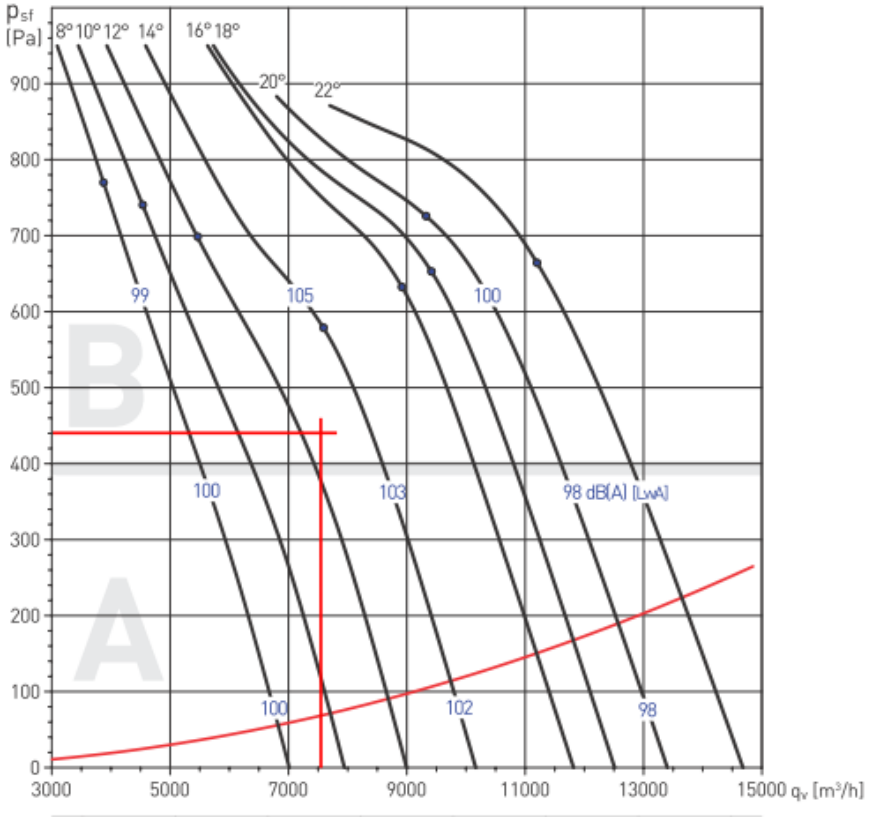


Figura 75: Curvas del ventilador que movería el flujo en paralelo con otro.
La cruz marca el punto de operación simulado mientras la curva es un ejemplo que viene con el catálogo. *Fuente: Catálogo TGT Soler & Palau*

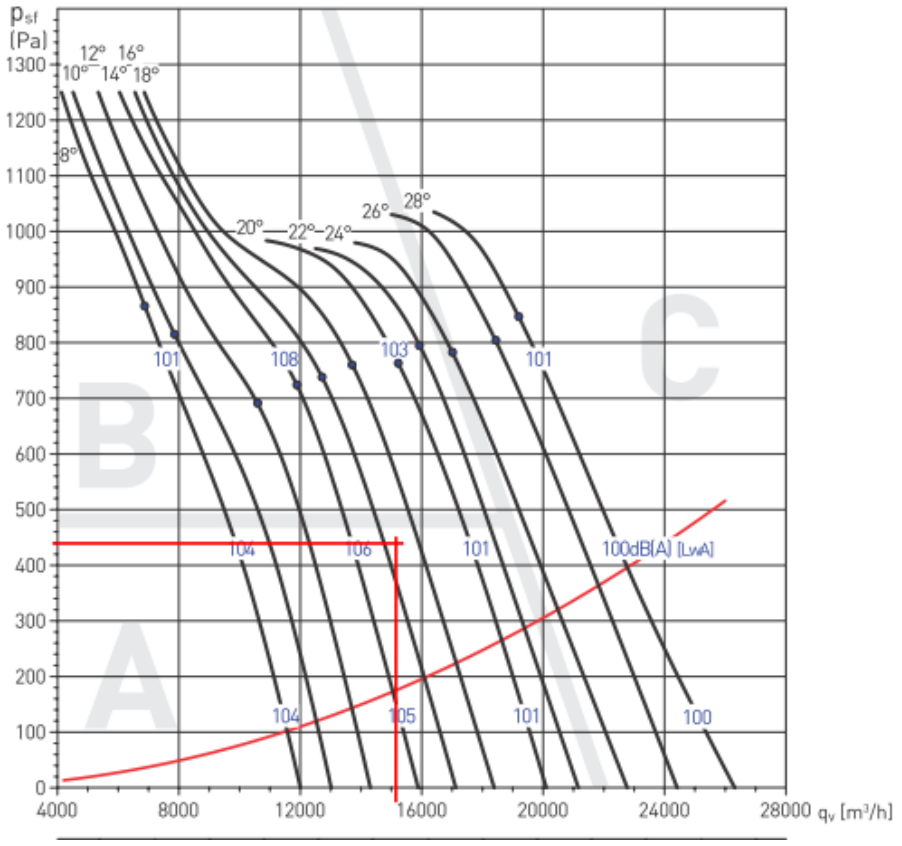


Figura 76: Curvas del ventilador que movería el flujo individualmente.
La cruz marca el punto de operación simulado mientras la curva es un ejemplo que viene con el catálogo. *Fuente: Catálogo TGT Soler & Palau*

El punto de operación será entonces el cruce entre las curvas del sistema y la del ventilador. Esto se puede ver claramente en la Figura 77. Debido a las dimensiones del primer ventilador, se deberá poner una transición a un diámetro más grande para la versión 6 del túnel de viento. En cambio, ocupando la versión 7, se podría poner una transición a un diámetro más pequeño, aunque se espera que esto sea innecesario, pues existen túneles de viento donde el ventilador no tiene una zona de transición, como se puede ver el Túnel de Viento del ITER[9] en la Figura 14.

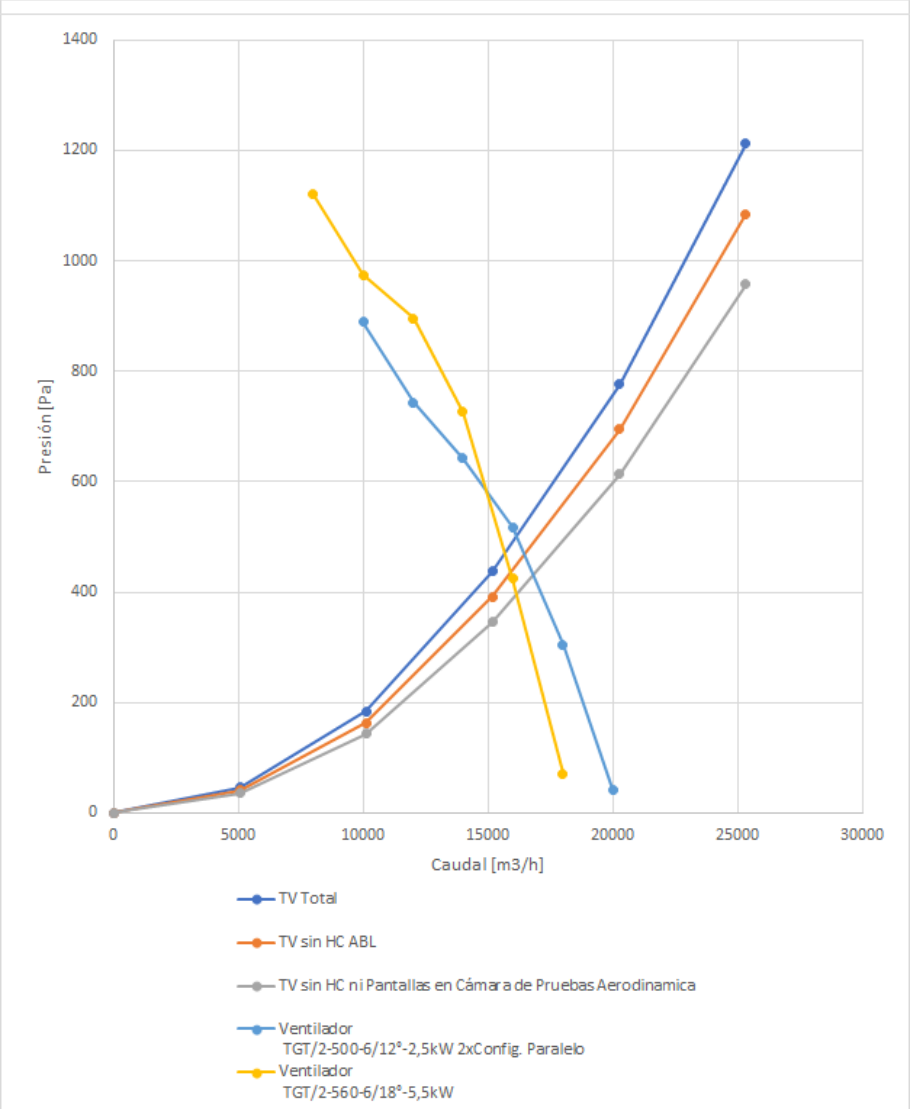


Figura 77: Curva del sistema y curvas de los ventiladores propuestos.
Fuente: Propia

4.4. Simulación Túnel Completo

La determinación de la pérdida de carga a través de ecuaciones y/o simulaciones independientes de cada componente no considera la interacción entre ellos y suele tender a menospreciar este valor. Para que una sección no interactúe con los otras, la separación entre secciones debe ser lo suficientemente grande como para que el flujo se vuelva desarrollado entre ellas, recomendación impracticable para muchos de los diseños de cañerías y ductos. En un túnel de viento, como el aprovechamiento de espacio es un parámetro crítico, todos las secciones son propensas a interactuar entre sí, es por eso que, para asegurar un perfil homogéneo en la cámara de pruebas y tener una buena estimación de la pérdida de carga, se hacen simulaciones del túnel de viento completo. Es también necesario hacer este tipo de simulación al hacer pruebas sensorizadas del rendimiento del túnel. Se siguieron las recomendaciones de Calautit para la simulación y se modificaron algunos parámetros conforme a recomendaciones generales de simulación[15]. A continuación se presentan tres

simulaciones:

- Túnel de Viento sin elementos de generación de capa límite y sin objetos de prueba.
- Túnel de Viento sin elementos de generación de capa límite y con un "Bluff Body" o Bloque de Prueba.
- Túnel de Viento sin elementos de generación de capa límite, sin objetos de prueba y con condición de borde de "Intake-Fan"

Simulación Túnel de Viento sin elementos de generación de capa límite y sin objetos de prueba

Para esta simulación, se tomaron las siguientes consideraciones:

- Se dividió el cuerpo del Túnel de Viento en la mitad para reducir la carga computacional y se ocupó la condición de Simetría en las resultantes partes interiores.
- Se asignó la condición de borde de Velocity Inlet de 7,5$[m/s]$, con el objetivo de llegar a los 30$[m/s]$ en la cámara de preubas. En la salida se ocupó la condición de borde de Pressure-Outlet.
- Se ocupó el modelo Porous-Jump para simular las pantallas de la cámara de estabilización y del difusor. También se juntaron las pantallas que sostienen la honeycomb a ésta en una sola superficie Porous-Jump, ya que tiene mejor convergencia cuando las superficies son delgadas en comparación a su ancho/alto.
- Se realizaron simulaciones con 3 tamaños de elementos diferentes en la configuración general: 100$[mm]$, 50$[mm]$ y 25 $[mm]$. Se encontró que la diferencia de ΔP_{total} entre los dos últimos tamaños es muy pequeña (del 0,4 %) y por lo tanto el tamaño de elemento de 50$[mm]$ es el óptimo para simular eficientemente, se puede ver esta malla en la Figura 78. La cantidad de elementos en cada simulación se puede encontrar en la Tabla 12.

Tamaño de elemento	Cantidad de Elementos	ΔP_{total}
100 $[mm]$	1.515.065	623,3 $[Pa]$
50 $[mm]$	1.676.502	659,3 $[Pa]$
25 $[mm]$	1.738.349	655,2 $[Pa]$

Tabla 12: Datos de análisis de independencia de malla.

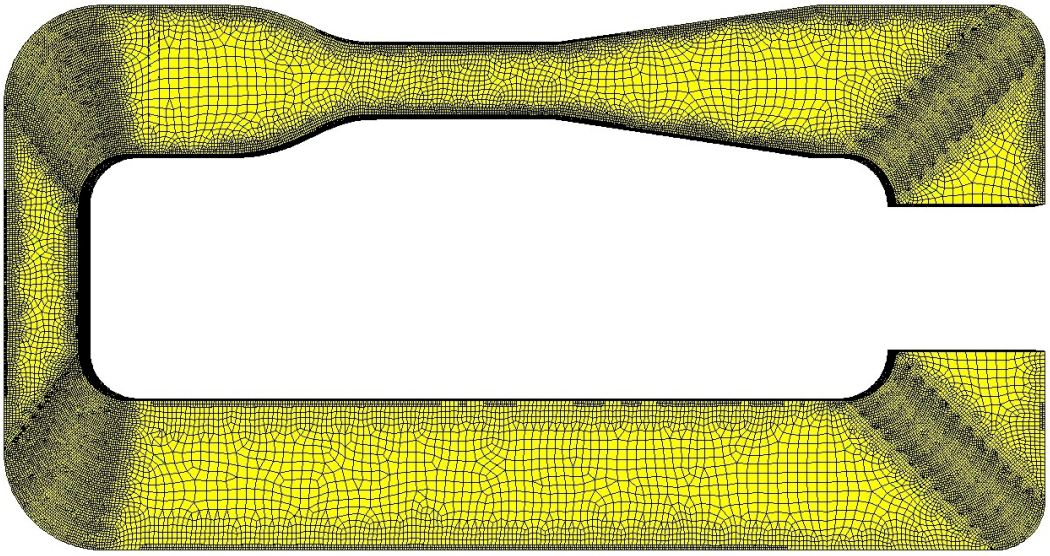


Figura 78: Malla computacional para configuración de tamaño de elementos general de 50[mm]
Fuente: Propia - Resultado Fluent

Para la convergencia de la solución entre iteraciones se tomó como criterio principal la estabilidad de la caída de presión y como criterio secundario la convergencia de los residuales. A lo largo de las iteraciones se hicieron adaptaciones (refinamientos y engrosamientos locales de elementos) para que los valores $y+$ se mantuviesen entre 30 y 300. Los gráficos de convergencia de ambos parámetros se pueden ver en las Figuras 79 y 80. El salto que se puede ver cercano a las 90 iteraciones en el gráfico de convergencia de residuales corresponde a una adaptación por valores de y+ y es normal que ocurra por tratarse de modificaciones en la malla computacional en medio del proceso del solver.

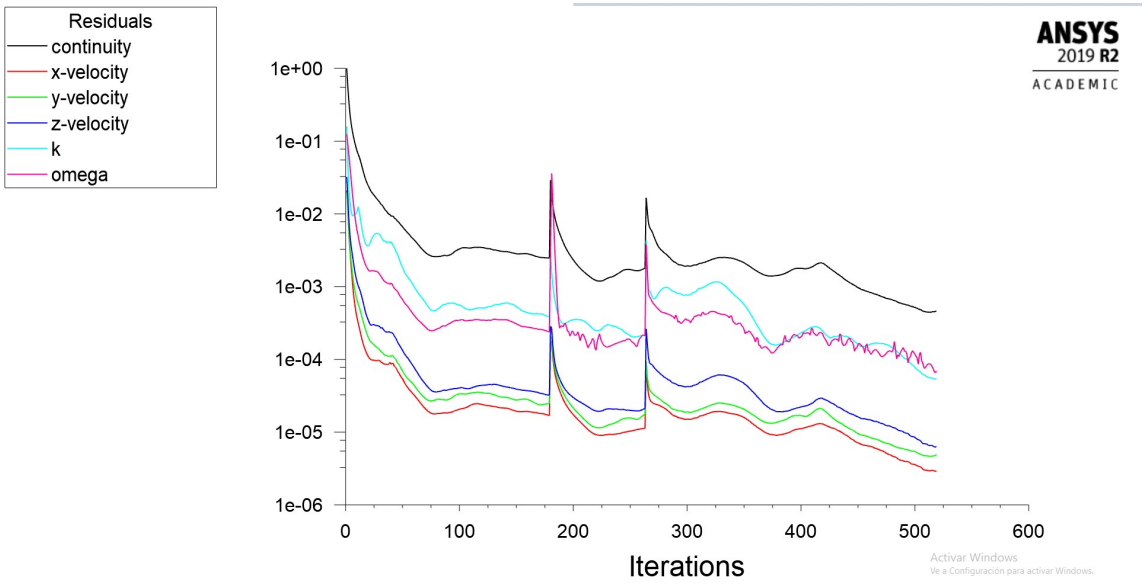


Figura 79: Gráfico de convergencia de residuales.
Fuente:Propia - Resultado Fluent

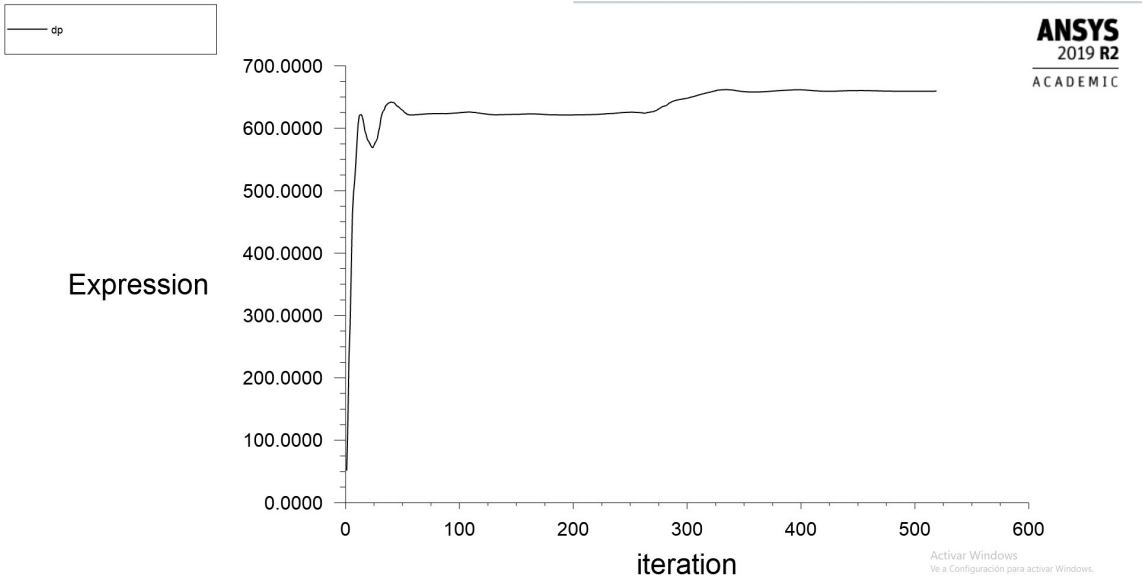


Figura 80: Gráfico de convergencia de ΔP.
Fuente:Propia - Resultado Fluent

Se presentan a continuación los gráficos de Magnitud de Velocidad, Presión Estática y Presión Total en las Figuras 81, 82 y 83. Algunas cosas que se pueden notar en estas Figuras son la poca separación de flujo, la caída de presión en las pantallas y la reducción de presión sectorial en la cámara de pruebas aeronáutica debido al efecto Venturi. La primera es sinónimo de un buen diseño de las partes del túnel de viento, mientras que el resto son comportamientos esperables de las secciones.

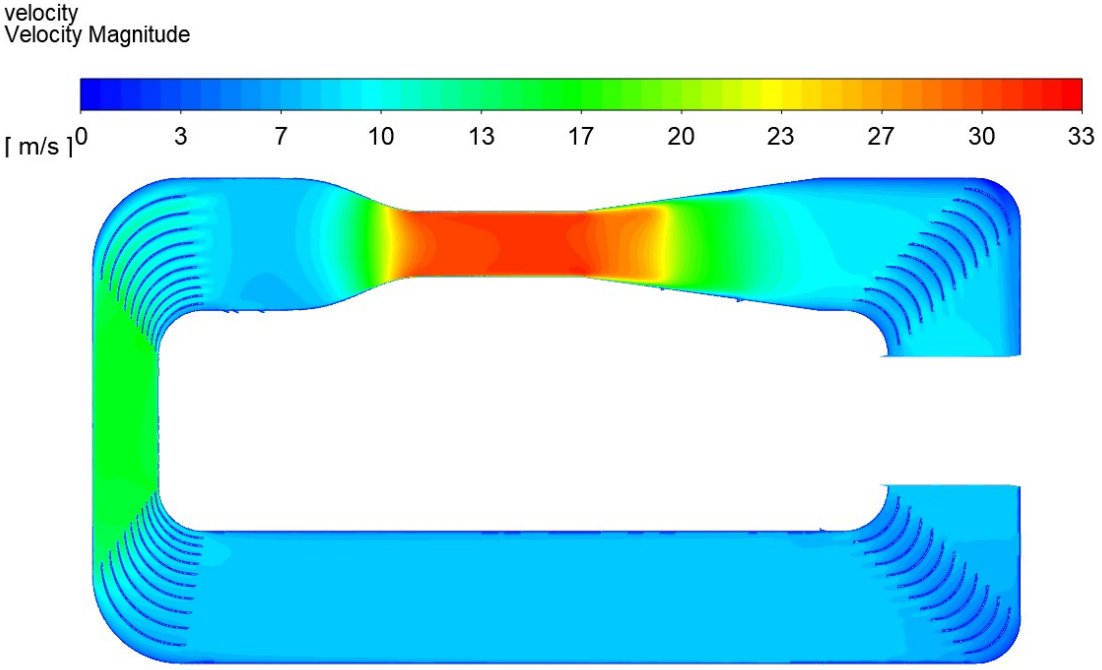


Figura 81: Magnitud de Velocidad a lo largo del túnel de viento.
Fuente: Propia - Resultado Fluent

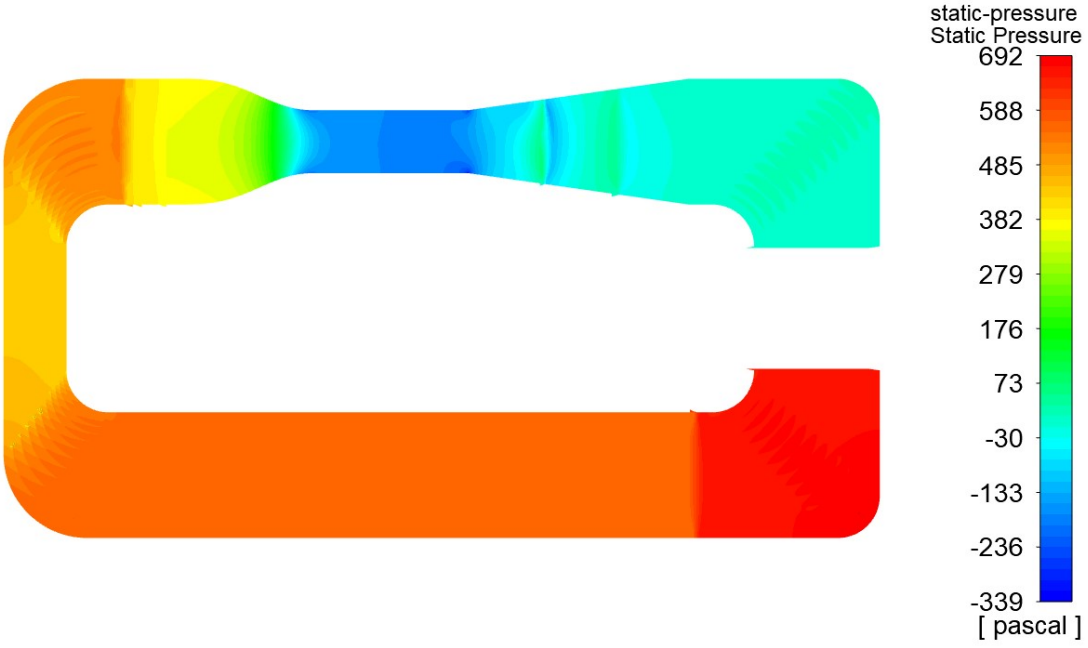


Figura 82: Presión Estática a lo largo del túnel de viento.
Fuente: Propia - Resultado Fluent

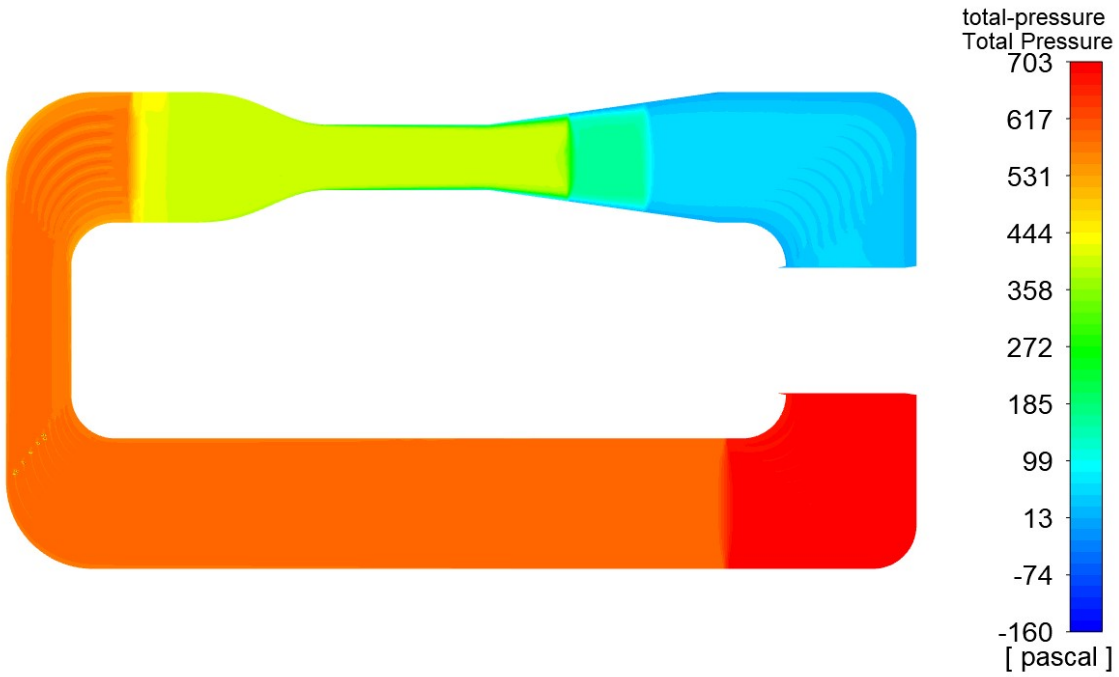


Figura 83: Presión Total a lo largo del túnel de viento.
Fuente: Propia - Resultado Fluent

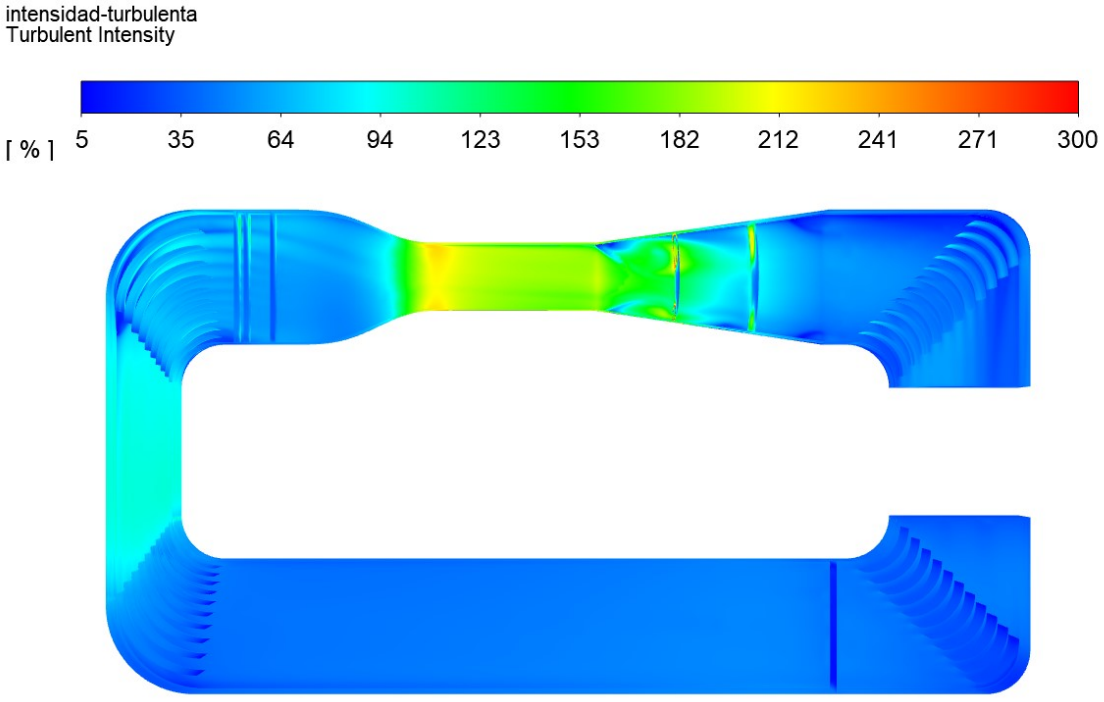


Figura 84: Intensidad Turbulenta porcentual a lo largo del túnel de viento.

Fuente: Propia - Resultado Fluent

Simulación Túnel de Viento sin elementos de generación de capa límite y objeto de prueba tipo "Bluff Body"

Para que un modelo se pueda simular en un túnel de viento como si estuviese en flujo libre, el efecto de las paredes debe ser mínimo. Cuando el objeto es muy grande, las mediciones tomadas en éste tienden al error. A modo de seguridad, códigos y normas limitan el tamaño del modelo a través de un parámetro llamado "Blockage Factor", el cual relaciona el área frontal del modelo versus el área transversal de la cámara de pruebas. Se recomienda que el Blockage Factor sea menor al 5 % para pruebas normales y menor al 8 % para pruebas de capa límite atmosférica [35][34]. Más arriba del 5 % en modelos normales se pueden aplicar factores de corrección, pero no se suelen ocupara arriba del 10 % por la incertidumbre del fenómeno.

Se puede ver la malla computacional en la Figura 85 Los resultados de esta simulación se pueden ver en las Figuras 86, 87, 88 y 89. Además, el ΔP_{total} en la simulación fue de 721,35$[Pa]$, aumento esperable con respecto a la simulación anterior ya que se puso un objeto obstruyente en el camino del flujo. Esto, al acoplarse con la curva del ventilador, bajaría la velocidad máxima a la cual se puede probar el modelo.

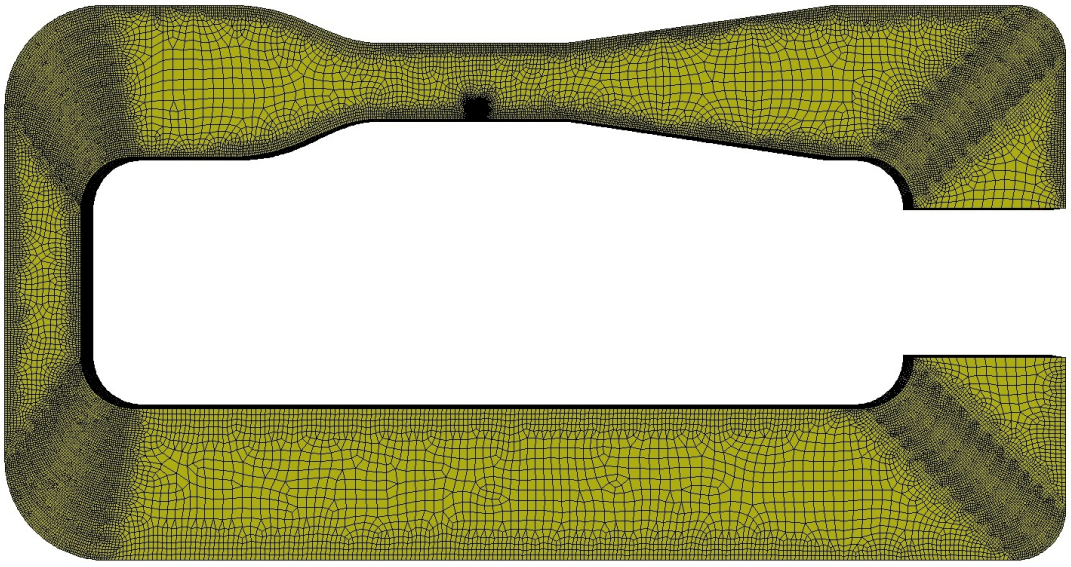


Figura 85: Malla computacional para Túnel de Viento con bloque de prueba.

Fuente: Propia - Resultado Fluent

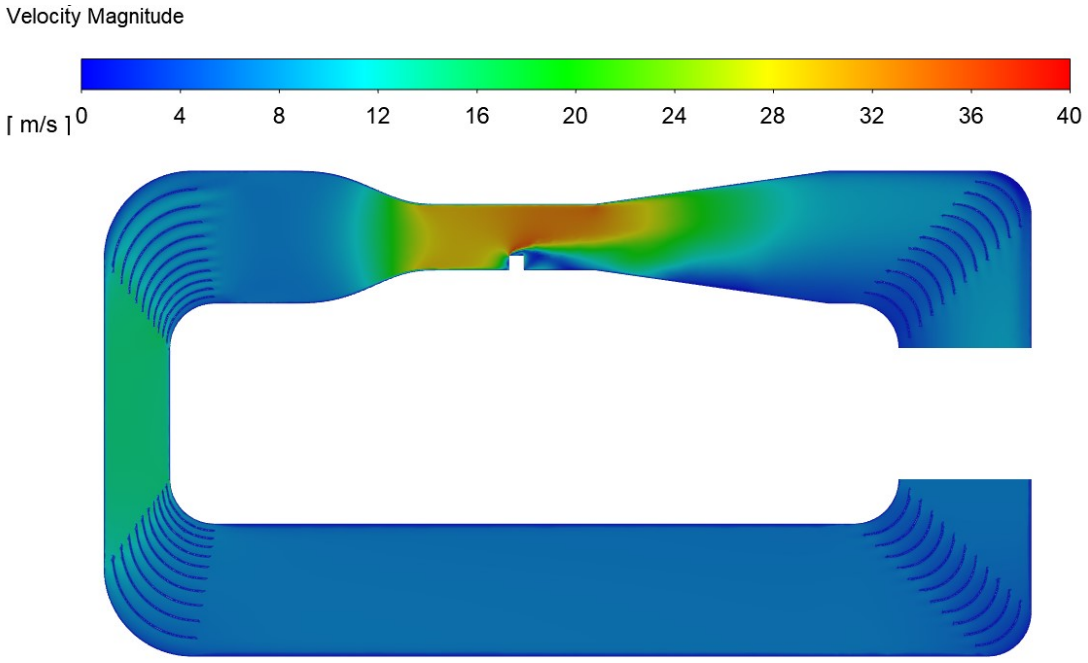


Figura 86: Magnitud de Velocidad a lo largo del túnel de viento con bloque de pruebas.

Fuente: Propia - Resultado Fluent

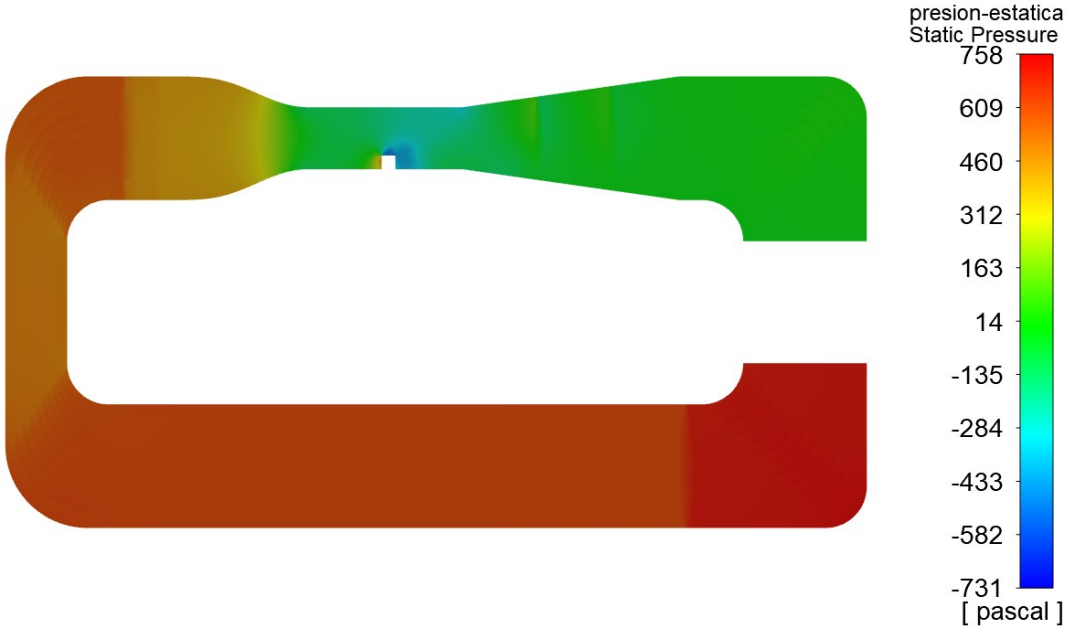


Figura 87: Presión Estática a lo largo del túnel de viento con bloque de pruebas.

Fuente: Propia - Resultado Fluent

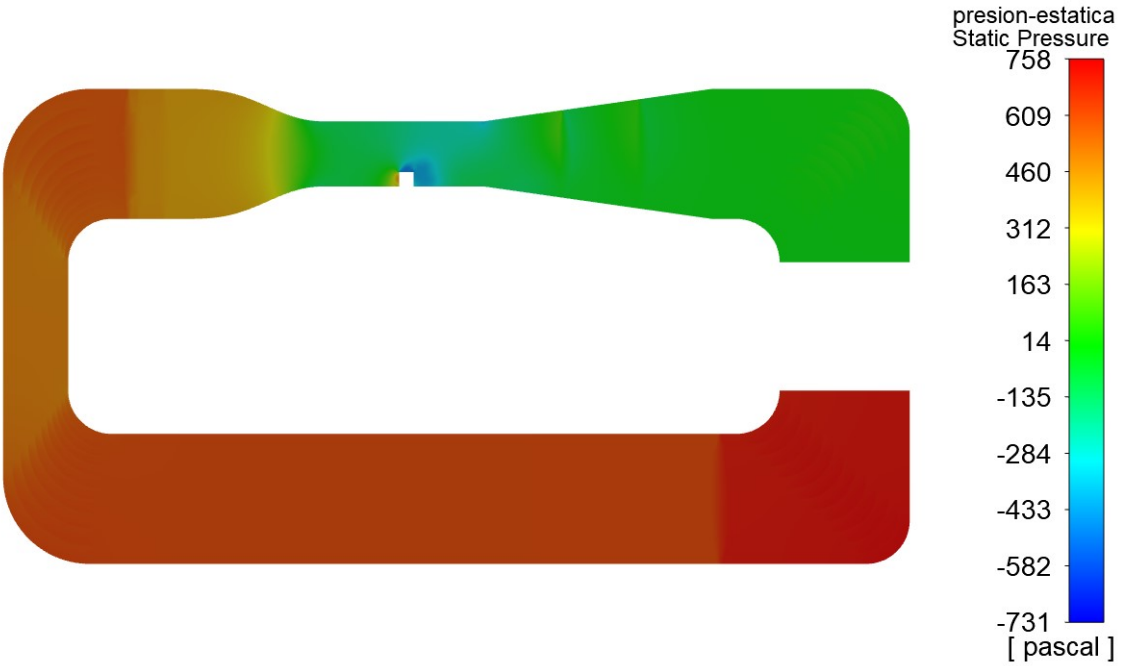


Figura 88: Presión Total a lo largo del túnel de viento con bloque de pruebas.

Fuente: Propia - Resultado Fluent

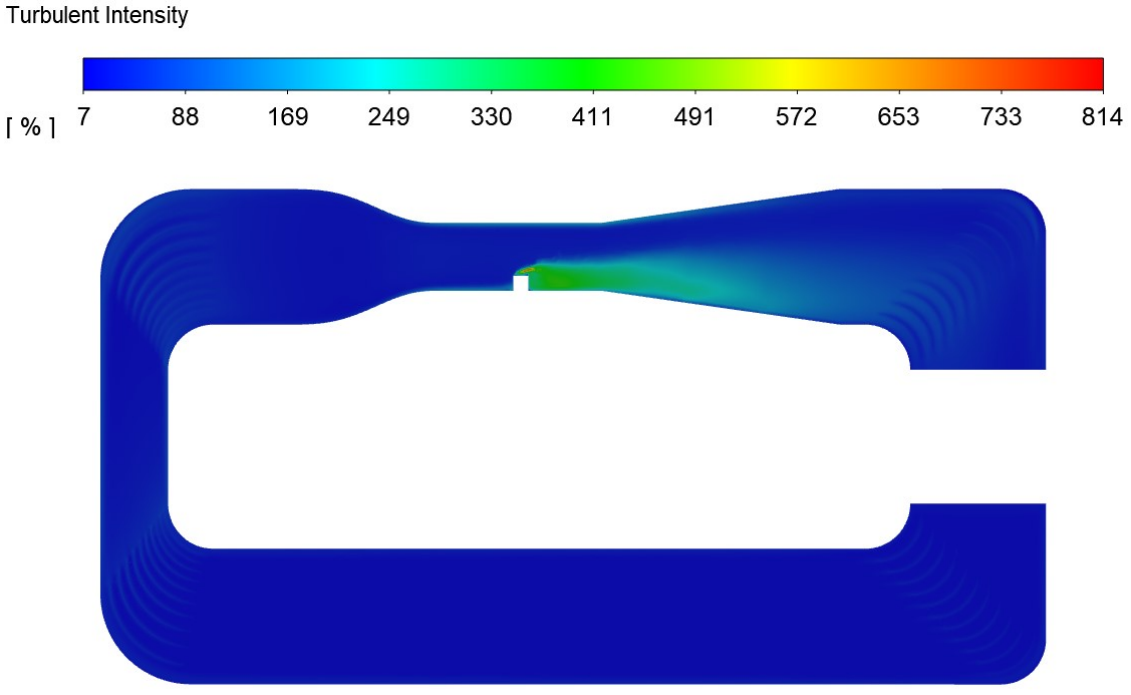


Figura 89: Intensidad turbulenta porcentual a lo largo del túnel de viento con bloque de pruebas.

Fuente: Propia - Resultado Fluent

Simulación Túnel de Viento sin elementos de generación de capa límite, sin objetos de prueba y con condición de borde de Intake-Fan

La misma simulación del caso 1 se replica con la condición de "Intake-Fan". Para ello se ajustó una curva polinómica de grado 4 a la curva de presión vs velocidad de salida. Como la curva de un ventilador está definida versus el caudal entregado, se calcula la velocidad con respecto al área transversal de la entrada del primer codo. La curva resultante es la que se ve en la Figura 90 y los parámetros se pueden ver en la Ecuación 40.

$$\Delta P(v) = 4,0987v^4 - 113,36v^3 + 1106v^2 - 4694v + 8384,6 \tag{40}$$

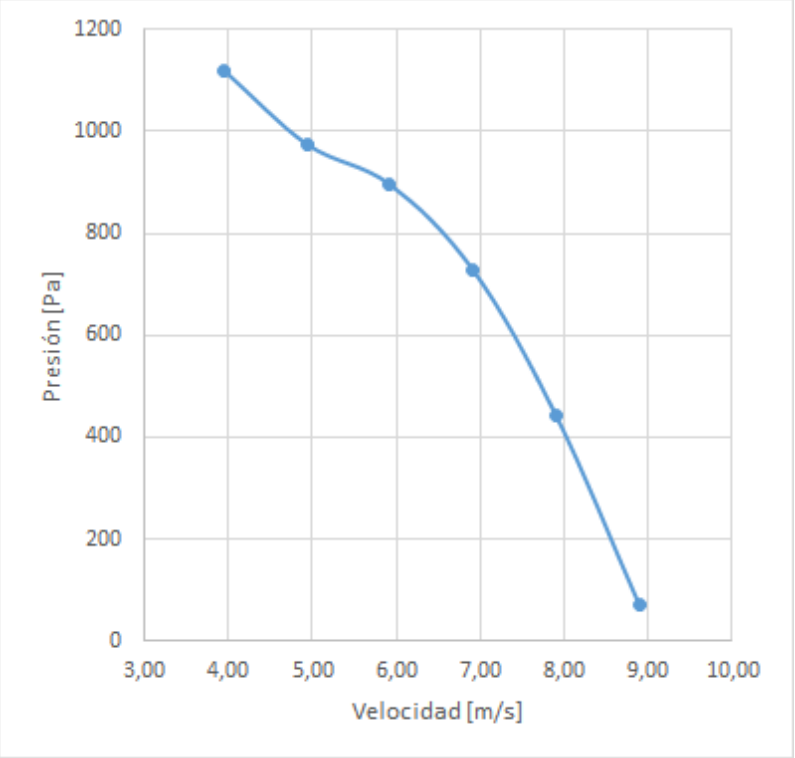


Figura 90: Curva de presión vs velocidad resultante del ventilador TGT/2-560-6/18°-5,5kW.

Se espera que el resultado de la simulación sea el punto de equilibrio entre la curva del ventilador y las pérdidas de carga del túnel. La solución se puede ver en la Figura 91, donde la velocidad en la cámara de pruebas aerodinámica resultó ser de 29,09$[m/s]$ y de 7,36$[m/s]$ en la Fetch, lo cual es cercano a las velocidades objetivo con una diferencia del 0,33 % y 1,87 % respectivamente. También se puede ver la caída de presión a lo largo del túnel en la Figura 92, arrojando resultados similares a las simulaciones anteriores con pequeños detalles.

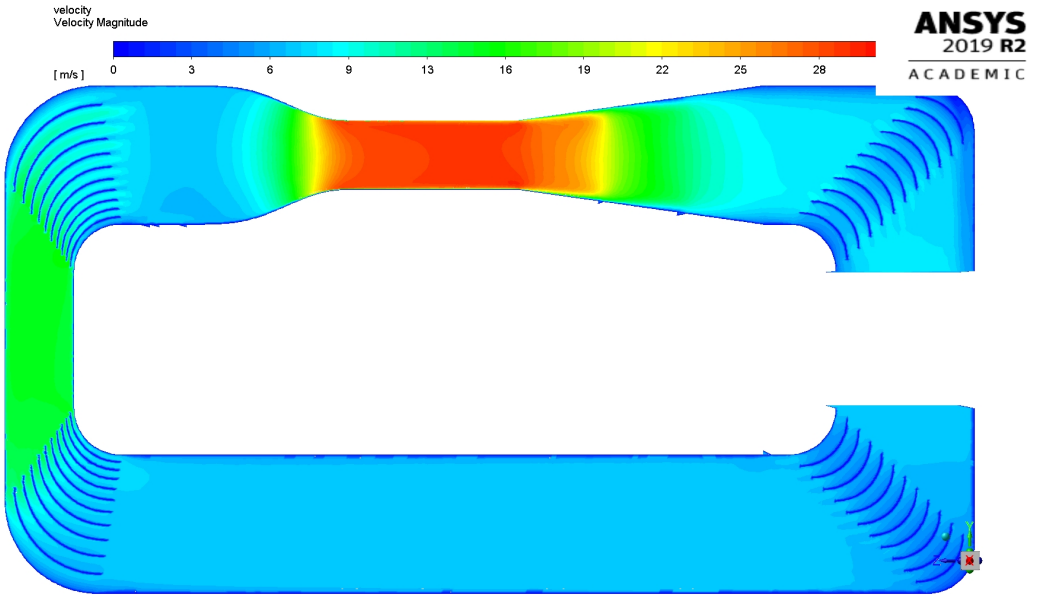


Figura 91: Magnitud de Velocidad a lo largo del Túnel de Viento con condición de borde Intake Fan.

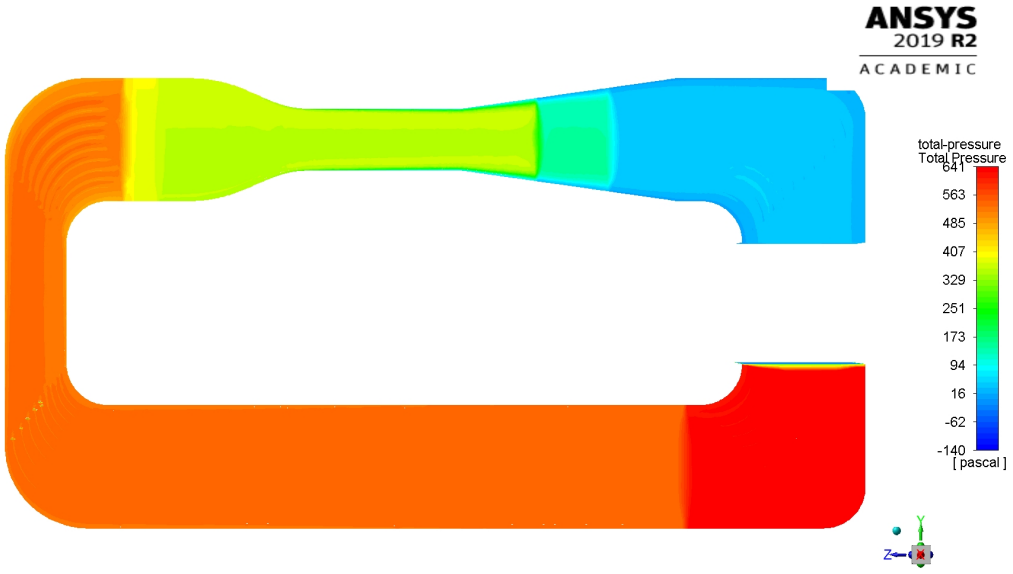


Figura 92: Presión Total lo largo del Túnel de Viento con condición de borde Intake Fan.

4.5. Capacidades y Limitaciones Dimensionales del Túnel de Viento

Las limitaciones de tamaño de modelos en el Túnel de Viento están determinadas por el Blockage Factor. Así como se explicó anteriormente, este término está relacionado con el Blockage Effect, el cual es el efecto producido por la interacción entre el modelo y las paredes del túnel a través del flujo. Este efecto tiende a variar los parámetros de valor medidos en el túnel como el coeficiente de arrastre, sustentación e incluso el parámetro α de la ley de potencia en el perfil de velocidad de capa límite atmosférica. El Blockage Factor está definido como el área del modelo que enfrenta al flujo sobre el área transversal de la cámara de pruebas.

$$B.F. = \frac{A_{modelo}}{A_{CP}} \tag{41}$$

Para reducir el Blockage Effect, algunos códigos limitan en Blockage Factor permitido al 5 %, mientras que otros permiten ir hasta el 10 % aceptando el uso de factores de corrección[34]. La norma chilena NCh 432[35] para cargas de viento limita este factor al 8 %. La simulación de un modelo con un Blockage Factor mayor al 10 % no se considera aceptable, pues se desconoce métodos precisos para calcular los correspondientes factores de corrección.

Considerando un Blockage Factor del 5 % para la cámara de pruebas aerodinámica y un 8 % para la cámara de pruebas de capa límite, un modelo perfectamente cúbico y las dimensiones del túnel de viento prototipo, se pueden determinar las dimensiones máximas del modelo para la cámara de pruebas aerodinámica y la cámara ABL, las cuales están expresadas en la Tabla 13.

Cámara de Pruebas	Dimensiones Cámara	Dimensión Máxima
Aerodinámica	375 $[mm]$	83,85 $[mm]$
ABL	750 $[mm]$	212,1 $[mm]$

Tabla 13: Dimensiones máximas para un modelo cúbico.

Tomando como ejemplo la zona de ensayos aeronáuticos, se puede caracterizar el comportamiento de una antena circular de diámetro 0,25$[m]$ que enfrente un flujo de 10,2$[m/s]$ a una escala 1:3. Como los objetos a probar resultan pequeños por las limitaciones del Blockage Factor, se recomienda un estudio sobre los factores de corrección en coeficientes de arrastre que permitirían aumentar las capacidades de prueba del túnel de viento, así como el uso de un ventilador más potente.

5. Equipos de apoyo, materiales, planos y estimación de costos

5.1. Instrumentos y equipos de apoyo

Para el Túnel de Viento se debe considerar tanto los instrumentos, el sistema de adquisición de datos, el sistema de control y la interfaz con el usuario. Debido a su bajo costo de implementación, se propone un sistema basado en Raspberry Pi 4. Los instrumentos deberán tener, en la medida de lo posible, protocolo de comunicación I2C o SPI, los cuales están incorporados de forma nativa por Raspberry.

Para el sistema de control, se cotizó un variador de frecuencia vectorial marca Metaltex modelo IF20-408-3, el cual está diseñado para una carga de 7,5HP y tiene comunicación vía Modbus RS485, el cual es un estándar común en la industria. Para controlar este elemento, el Raspberry Pi necesita un hardware complementario llamado RS422 / RS485 Serial HAT.

Al Raspberry Pi 4 se le pueden conectar monitores, teclados y mouse, casi sustituyendo un computador de escritorio. No se realizaron selección ni cotización de estos componentes por la amplia disponibilidad de ellos.

Para el resto de los instrumentos y equipos, se recomienda hacer un estudio más detallado sobre las capacidades, compatibilidad y disponibilidad.

Se hace un listado de instrumentos y equipos que se deben incluir para el Túnel de viento. Este alcance se limita a la existencia de los instrumentos y se marcará con un * si se encontró evidencia de compatibilidad con la gamma Raspberry Pi.

- Sensores de fuerza para sustentación y arrastre
- Sensores de torque
- Anemómetro de hilo caliente
- Anemómetro de 3 direcciones
- Anemómetro por Tubo Pitot*
- Termómetros*
- Strain-Gauges*

También se consideran los siguientes equipos de apoyo

- Generador de humo
- Láser vertical
- Variador de frecuencia*
- Brazo robótico

5.2. Materiales disponibles

Acero Galvanizado:

Precio por m^2	$\sim$ \$2.630
Rugosidad	61 [μm]
Espesor	0,35[mm]

Tabla 14: Tabla de datos Acero Galvanizado.

MDF RH: Tablero de fibras de madera, unidas entre sí mediante un adhesivo de Melamina Urea Formaldehído (MUF) y pigmentado de color verde en su capa media, para diferenciarlo por su característica de resistente a la humedad[36]. Se recomienda ocupar de un espesor de 18[mm] y unir a la estructura con pegamento para PVC, el cual tiene una base de goma y reducirá las vibraciones transferidas desde la estructura.[5]

Rugosidad	6,9 [μm]
Espesor	18 [mm]

Tabla 15: Tabla de datos MDF RH.

Acrílico: Material traslúcido de superficie lisa. Ideal para las secciones del túnel donde se requiera mirar hacia el interior. Las dificultades para manejar este material son conocidas: el cortado se deberá hacer preferentemente con corte láser y la unión con otras piezas de acrílico con cloroformo u otros pegamentos especiales. Por otra parte, se hace más fácil el pegado de piezas especiales, como por ejemplo, bisagras.

Precio por m^2	$\sim$ \$29.000
Rugosidad	1,5 [μm]
Espesor	6[mm]

Tabla 16: Tabla de datos Acrílico. [38]

Acero SAE 1020 / ASTM A36: Estructural. Se usará para hacer el esqueleto que sostendrá las paredes. Se podrá ocupar soldadura E6010 o la que sea conveniente. Algunos marcos estarán construidos de este material también.

5.3. Planos

Se generaron planos descriptivos de la forma y configuración de las diferentes secciones y el túnel completo. Se pueden apreciar las dimensiones finales del prototipo y los detalles más importantes. Existen muchos detalles relacionados a los métodos de unión, largos de perfiles que unen las secciones y puntos y tipos de soldadura entre otros, de los cuales no fueron definidos en estos planos para dar más flexibilidad al momento de construir. Todos los planos generados se pueden ver en el Anexo 8.4. En la Figura 93 se puede ver el plano general del Túnel de Viento prototipo.

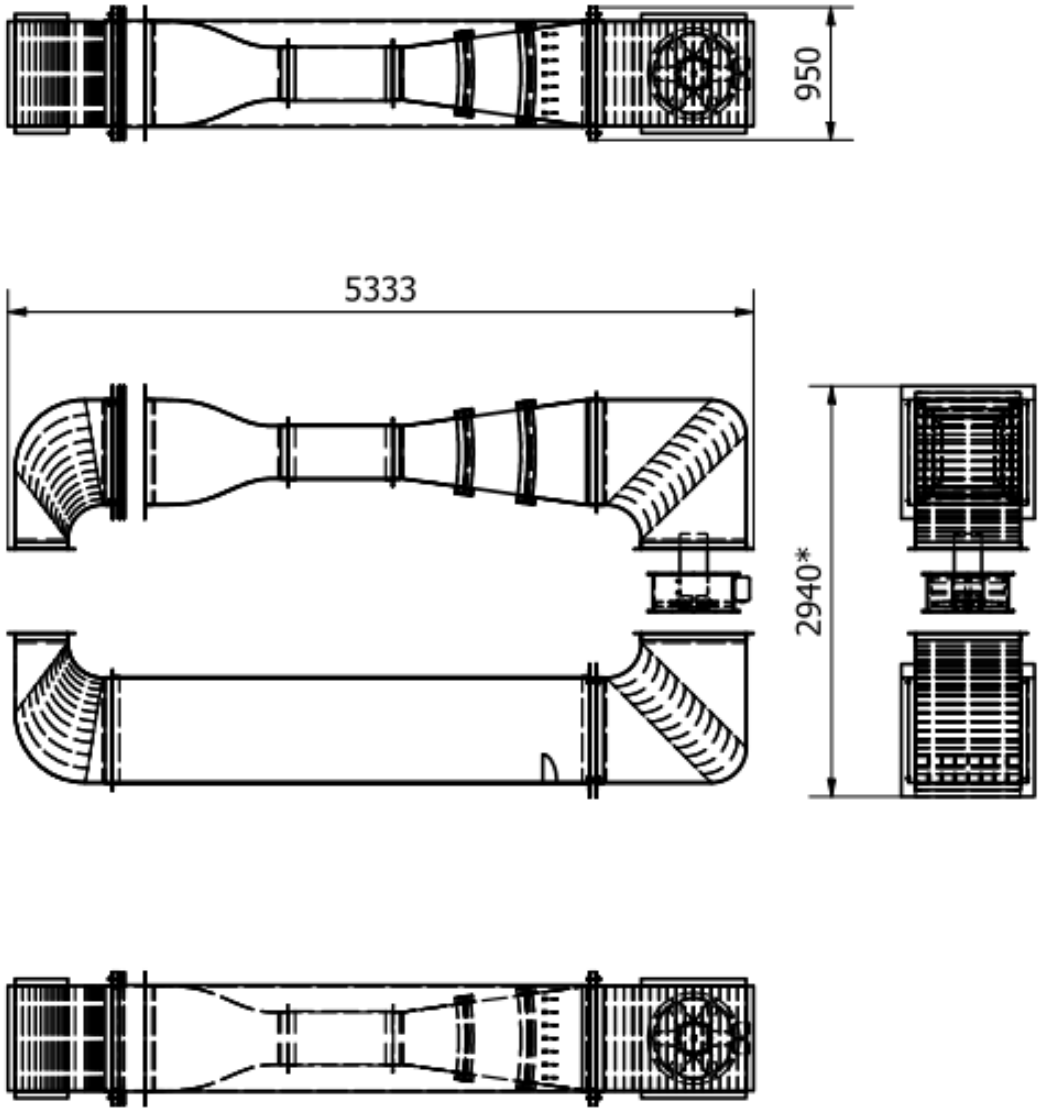


Figura 93: Plano general del Túnel de Viento.
Fuente: Propia - Inventor Professional

5.4. Estimación de costos

El alcance de la estimación de costos se limita a cotización de equipos, instrumentación, materiales y costos de construcción. Para ello se cotizaron el ventilador, el variador de frecuencia, instrumentos, perfiles y pliegos de material entre otros. El resumen de los costos de equipos, materiales e instrumentos se puede ver en la Tabla 17. Algunos materiales se calcularon en función de cuanto material neto queda en el equipo más un factor de utilización para tener en cuenta gastos imponderables como desperdicio, errores en la fabricación y elementos de unión extra que se deban construir a partir de los materiales existentes, como uniones de acrílico. Se despreciaron algunos materiales que ponderarían muy poco en el costo total como lo son las planchas para los marcos de las pantallas y las mallas filtro de las pantallas. Ningún costo está con IVA.

Ítem	**Modelo**	**Marca**	**Cant.**	**Total CLP**	**Total USD**
Acero Galvanizado	0,35 mm	Homecenter	$20m^2$	68.209	-
Perfil Tubular cuadrado	50x50x3mm	Cintac	$11m$	38.466	-
Perfil L	50x50x3mm	Cintac	$51m$	99.429	-
Acrilico	6mm transparente	Induacril	$11m^2$	387.083	-
Ventilador	TGT/2-560 6/18°-5,5kW	Soler Palau	1	857.647	-
Variador de Frecuencia Vectorial 7,5 HP	IF20-408-3	Metaltex	1	396.704	-
Strain gauge Modulo		HWHardSoft	12	-	98
Raspberry Pi 4 4GB		AGS-Tech	1	-	-
RS485 Shield for Raspberry Pi			1	-	37
Sensor Pitot Velocidad			2	-	88
Sensor Temperatura		DFRobot	1	-	5
Láser Vertical			1	24.361	-
Generador de Humo	Nebula 700	Prolok	1	21.672	-
				1.960.790	227
					177.372
				TOTAL CLP	2.138.162

Tabla 17: Resumen de costos de equipos, instrumentos y materiales para el Túnel de Viento prototipo.

Por otro lado, se cotizó con ValpClima la fabricación y montaje del Túnel de Viento prototipo. El resumen de costos se presenta en la Tabla 18.

Equipos, Instrumentos y Materiales	$2.138.162
Fabricación y Montaje	$3.010.119
Total	$5.148.281

Tabla 18: Resumen de costos total.

Costos de operación: Para el costo de operación del Túnel de Viento se considera el consumo de energía eléctrica del motor del ventilador a máxima potencia y la tarifa BT1a de Chilquinta. El resumen de resultados se pueden ver en la Tabla 19.

Potencia Ventilador	5,9[kW]
Tarifa	BT1a
Precio Energía	89,24[clp/kWh]
Precio por hora	527[clp/h]

Tabla 19: Resumen de costos de operación.

Considerando una operación con un horario de funcionamiento entre 9:00 hasta 18:00 y los paneles solares instalados en el LER, existe un ahorro potencial en los costos de operación de un 65 %, lo cual se puede apreciar en la Figura 94.

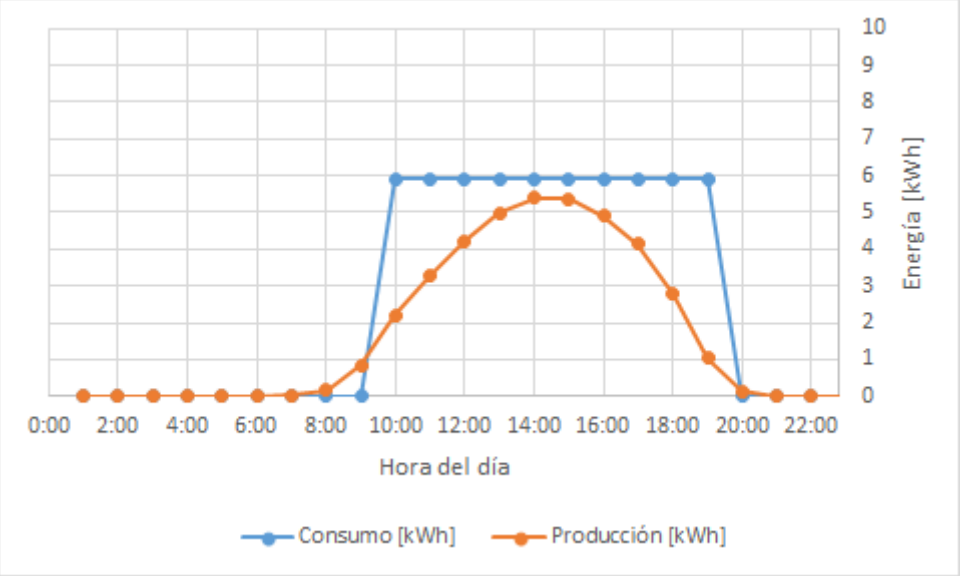


Figura 94: Generación de energía por paneles solares y consumo por el Túnel de Viento en un día promedio.

5.5. Recomendaciones constructivas generales

- Unión entre estructura y secciones: La unión se hará con pegamento con base de goma (como el neoprén o sustitutos), lo cual ayudará a reducir las vibraciones transmitidas desde la estructura a las secciones[5]. En caso de no ser posible, se podrá considerar el uso de remaches ciegos o tornillos, siempre y cuando sean recubiertos con resina plástica para asegurar una superficie suficientemente lisa.
- Unión entre codos y ventilador: La unión de estas dos secciones no debe ser sólida, sino que las partes deben estar alineadas y los espacios entre éstas deben ser sellados con bandas de goma. Esto permitirá que el ventilador no transmita vibraciones hacia las secciones. Otro aspecto importante es que el ventilador no debe compartir la misma estructura que el resto del túnel y los apoyos del ventilador, dentro de lo posible, deben estar aislados de los apoyos del túnel de viento.
- Se recomienda que en la estructura para sostener el túnel, se construya con carril en el cual se apoyen las honeycomb y las pantallas. Esto permitirá que las pantallas

se desacoplen fácilmente del sistema. Se podrá tomar como referencia el sistema de desacople que se ve en el Túnel de Viento de Termofluidos.

6. Conclusiones

Se propone el diseño de un Túnel de Viento de circuito cerrado con dos cámaras de prueba, una para estudios de capa límite atmosférica y la otra para pruebas aerodinámicas. El diseño se basó en recomendaciones hechas por instituciones y expertos en el diseño de túneles de viento e investigaciones sobre secciones en específico. Además, se optimizó el diseño para disminuir simultáneamente las pérdidas de carga, la complejidad constructiva y el espacio utilizado, teniendo en consideración las limitaciones del LER y manteniendo una buena calidad del flujo en las cámaras de prueba. Para asegurar esto, se hicieron simulaciones numéricas con ANSYS Fluent a través de las diferentes iteraciones y versiones del Túnel de Viento.

- Se estudiaron los Túneles de Viento en existencia y las diferentes tecnologías y aplicaciones que tienen. Se determinó que el concepto tras el diseño del Túnel de Viento del Politécnico de Milano es idóneo para la propuesta, salvo que es muy largo. Por ello se trabajó con variantes de este diseño.
- Se diseñaron los componentes para el Túnel de Viento prototipo. En especial se ajustaron los siguientes:
  - **Difusor de gran ángulo** con dos pantallas internas de sección esférica, llegando a un ángulo de 16,2°. Se diseñó y simuló un difusor que se adaptase a las dimensiones del ventilador existente del LER, pero la poca homogeneidad del flujo, gran pérdida de carga y poco caudal del ventilador lo hacen una opción inviable.
  - **Codos de Expansión** con razón de área 1:2, los que permitieron un túnel más corto sin incurrir en grandes pérdidas de carga ni dejar un flujo aguas abajo poco homogéneo.
  - **Codos Normales** que permitieran un mejor ajute a un ventilador más grande que la sección angosta de los Codos de Expansión.
  - **Cámara de Desarrollo de Capa Límite - Fetch:** Se probaron distintas configuraciones que demostraron que es posible generar un perfil a escala de la capa límite atmosférica a través del uso de espiras. Se dejaron ecuaciones que permitieran dimensionar **Elementos de Rugosidad** para otros perfiles no estudiados.
- Se generaron planos que presentan las dimensiones generales de las diferentes secciones y su configuración, además de proponer una idea del método de ensamble de las secciones. En el capítulo de Recomendaciones Constructivas Generales se detallan algunas ideas sobre los métodos de unión y cimientos, entre otros. Las dimensiones resultantes del Túnel de Viento sin contar la estructura que lo sostiene son:
  - Largo: 5.333 $[mm]$
  - Ancho: 950 $[mm]$
  - Alto*: 2.940 $[mm]$

  *Donde la altura reportada podría variar dependiendo del ventilador escogido.
- Se seleccionaron los materiales para la construcción y se estimó su costo. Se escogió y

cotizó el ventilador con un variador de frecuencia que cumpliera con las capacidades de presión/caudal de diseño y comunicación con una estación de trabajo. Para la parte de instrumentación, se propone un sistema basado en Rapsberry Pi, con la ventaja de reducidos costos de componentes. Se seleccionaron algunos instrumentos para el sistema para dar una idea de los costos, se deberá hacer un estudio más detallado en esta parte para determinar todos los componentes necesarios y su compatibilidad entre sí. El costo total estimado es de $5.148.281 , a lo cual se deberá dejar en el presupuesto un 30 % para tomar en cuenta costos imprevistos.

- Se propuso una disposición del Túnel de Viento en el LER, a la cual se le debe considerar también la estructura que lo sostendrá, mesa de control y adquisición y datos y zonas de seguridad.

7. Trabajos a Futuro

Cada sección, cada elemento, cada borde del túnel de viento puede ser optimizado para mejorar la calidad de flujo y disminuir las pérdidas de carga. Por ello, se propone un listado con los elementos con más potencial que pueden ser mejorados.

Difusor - Configuración de pantallas: Se pueden estudiar más configuraciones de pantallas para el control de crecimiento de capa límite en el difusor.

Difusor - Configuración de placas divisoras: Algunos estudios sugieren el uso de placas divisoras, similar a como se estudió previamente, pero con subdivisiones más pequeñas. La sustitución de pantallas por placas divisoras abriría la opción para hacer estudios con materiales que se desprenden tanto en la cámara de pruebas aerodinámica como en la de capa límite atmosférica.

Codos: El número de álabes en los codos aún se puede optimizar, así como también la disposición de los álabes en los codos expansivos.

Zona de desarrollo de capa límite: Se necesita un estudio más en detalle de cómo simular una zona con múltiples elementos de rugosidad. La bibliografía estudiada solo da algunas recomendaciones. Mientras que las simulaciones dieron buenos resultados, revelaron problemas de ajuste entre los efectos esperados y los resultados.

Configuración de Pantallas: Las pantallas y honeycombs se podrían utilizar no solo para homogeneidad de flujo, sino que para generar perfiles con características especiales. Se propone el estudio de pantallas y honeycomb construídas con formas fractales.

Configuración de instrumentos, DAQ y ajuste remoto de velocidad del flujo: Se propuso y cotizaron algunos instrumentos y controladores con supuesta compatibilidad con Raspberry Pi 4. Se requiere de un estudio más detallado sobre la disponibilidad de estos sensores y su compatibilidad, pues esto podría aumentar considerablemente los costos. Existen otros sensores que no se les encontró compatibilidad directa con dicho sistema, se deberá estudiar métodos de comunicación entre estos dispositivos o alternativas de instrumentos.

Subsistemas: Se deberán definir los subsistemas que constituyen el Túnel de Viento más allá del cuerpo principal. Algunos de estos sistemas son: Mesa giratoria para los modelos de la Fetch con control de giro externo y análogo, cortes especiales en el acrílico para los instrumentos, sistema de desacople de los componentes de prueba aeronáutica para transformación simplificada a circuito abierto, estructura que sostiene al cuerpo.

Ventilador: Se recomienda realizar un análisis de las capacidades de escalamiento del Túnel de Viento más en detalle, especialmente antes de las decisiones de compra para el Túnel de Viento tamaño real.

Referencias

[1] NASA Glenn Research Center - The Beginner's Guide to Aeronautics
https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/index.html

[2] Aerolab - Open Circuit Wind Tunnel
https://www.aerolab.com/products/open-circuit-wind-tunnels/

[3] Michigan State Unviersity - Closed Circuit Wind Tunnel. Turbulent Shear Flows Lab
https://www.egr.msu.edu/tsfl/TSFL%20Facilities%20Closed%20Loop.htm

[4] University of Ontario, Canadá - Climatic Wind Tunnel
http://ace.uoit.ca/testing-chambers/climatic-wind-tunnel.php

[5] De Almeida, O. et al. (2018) Low Subsonic Wind Tunnel - Design and Construction. *Journal of Aerospace Technology and Management. Universidad de Uberlândia.* Vol. 10.

[6] Alianza FiiDEM - Centro de Formación e Innovación para la Resiliencia de la Infraestructura Energética (LemAT) - Túnel de Viento
http://www.alianzafiidem.org/noticia31.html

[7] Politécnico de Milán, Italia - GVPM Polimi Wind Tunnel
http://www.windtunnel.polimi.it/facility/

[8] Western University - Alan G. Davenport Wind Engineering Group - BLWT2
http://www.blwtl.uwo.ca/Public/BLWT2.aspx

[9] ITER - Túnel de Viento Instituto Tecnológico y de Energías Renovables
http://www.iter.es/portfolio-items/tunel-de-viento/

[10] Universidad de la República, Uruguay - Túnel de Viento Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental
https://www.fing.edu.uy/imfia/eolodinamica/tunel/general.html

[11] Barlow, J., Rae, W. y Pope, A. (1999) Low-Speed Wind Tunnel Testing. Nueva York, John Wiley & Sons Inc.

[12] University of Cranfield - 8x4 Atmospheric Boundary Layer Wind Tunnel https://www.cranfield.ac.uk/facilities/8x4-atmospheric-boundary-layer-wind-tunnel

[13] The Von Karman Institute for Fluid Dynamics - Low Speed Wind Tunnel L-2B https://www.vki.ac.be/index.php/research-consulting-mainmenu-107/facilities-other-menu-148/low-speed-wt-other-menu-151/60-low-speed-wind-tunnel-l-2b

[14] Lubitz, W. D. y White, B. R. (2004) Atmospheric Boundary Layer Wind Tunnel Applications in Wind Turbine Siting. *Department of Mechanical and Aeronautical Engineering*, University of California, Davis.

[15] Calautit, J. K. et al. (2014) A validated design methodology for a closed-loop subsonic wind tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.* Vol. 125. pp. 180-194.

[16] Dommelen R. (2013) Design of an Atmosferic Boundary Layer Wind Tunnel. *Master Thesis (Master of Science of Building Physics and Services)*. Eindhoven. University of Technology, Department of Built Environment.

[17] Pritchard, P.J. y Mitchell, J.W. (2011) Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics. Nueva Jersey, John Wiley & Sons Inc.

[18] Poinsot, T. y Veynante, D. (2005) Theoretical and Numerical Combustion. Philadelphia, R.T. Eduards Inc.

[19] Parsons, R. (1993) ASHRAE handbook-fundamentals. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, Atlanta.

[20] Idelchik. I.E. (1969) Memento des pertes de charge: Coefficients de pertes de charge singulières et de pertes de charge par frottement. Eyrolles Editeur, Paris.

[21] Hernández González, M. et al. Design Methodology for a Quick and Low-Cost Wind Tunnel. En: Ahmed, N. (2013) Wind Tunnel Designs and Their Diverse Engineering Applications. Rijeka, InTech.

[22] Javed, K. y Ali, M. (2010) Design and Construction of subsonic wind Tunnel focusing on two dimensional contraction cone profile using sixth order polynomial. *University of Lahore, Pakistan.* Punjab Pakistan.

[23] Rahmat, N.A. et al. (2018) Experimental Study on Effect of Spires on the Lateral Nonuniformity of Mean Flow in a Wind Tunnel *Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences and Green Asia Strategy.* Vol. 5, N°1, pp. 1-15.

[24] Counihan, J. (1969) An Improved Method of Simulating an Atmospheric Boundary Layer in a Wind Tunnel. *Atmospheric Environment.* Vol.3, N°2, pp. 197-214.

[25] Irwin, H.P.A.H. (1981). The Design of Spires for Wind Simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.* Vol. 7, pp. 361-366.

[26] Song, P. (2017) Simulation of Atmospheric Boundary Layer in an Open-Loop Wind Tunnel Using Spire-Roughness-Element Technique. Ontario, Canada. *Electronic Theses and Dissertations, University of Windsor.* N°7299.

[27] University of Porto - Airborne Wind Energy Project
`http://www.upwind.pt/`

[28] American Society of Civil Engineers. (2017) Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-16). Reston Virginia. *American Society of Civil Engineers (ASCE).*

[29] Reinke, N. (2017). A spatially optimized wind tunnel. *Institute of Physics, University of Oldenburg.*

[30] Shojaee, S. M. N., Uzol, O. y Kurç, Ö. (2014) Atmospheric boundary layer simulation in a short wind tunnel. *International Journal of Environmental Science and Technology. Islamic Azad University.* Vol. 11, pp. 59-68.

[31] Mehta, R.D. y Bradshaw, P. (1979) Design rules for small lowspeed wind tunnels. *The Aeronautical Journal (Cambridge University Press).* Vol. 83, N°827.

[32] Medium - Shh. Here are the Exact Dimensions of a McDonald's Straw https://medium.com/@rbullwinkle/shh-here-are-the-exact-dimensions-of-a-mcdonalds-straw-766cdfd0d2d7

[33] Scheiman, J. (1981) Considerations for the Installation of Honeycomb and Screens To Reduce Wind-Tunnel Turbulence. Hampton Virginia. *National Aeronautics and Space Administration Scientificand Technical Information Branch*

[34] Chang-Koon, C y Dae-Kun, K. (1998) Wind tunnel blockage effects on aerodynamic behavior of bluff body. *Wind and Structures An International Journal*. Vol. 1, N°4, pp 351-364.

[35] NCh 432-2010 (2010). Diseño estructural - Cargas de viento / Structural Design - Wind Loads. Santiago. *Instituto Nacional de Normalización (INN-Chile).*

[36] Masisa - Tableros desnudos MDF RH http://www.masisa.com/chi/producto/mdf-rh/

[37] Rolleri, A. y Roffael, E. (2006) Rugosidad de tableros de fibra de densidad media (MDF) usando método de contacto y no contacto. *Bosque (Valdivia).* Vol. 27, N° 1, pp. 72-77.

[38] Morales, R. et al. (2014) Estudio Experimental de la Reducción de Fricción en la Conducción de Fluidos usando Surfactantes. *Ingeniería mecánica tecnología y desarrollo* Vol. 4, N°6, pp. 205 -217.

8. Anexos

8.1. Anexo: Fetch

En ese anexo se muestran algunas iteraciones intermedias que se hicieron en el estudio de la Fetch. La Figura 95 muestra una gran perturbación provocada por las espiras que incluso llega hasta el techo del túnel de viento, lo que podría provocar variaciones imprevistas. Es por ello que se decidió dimensionar las espiras con una altura menor, el resultado se ve en la Figura 96.

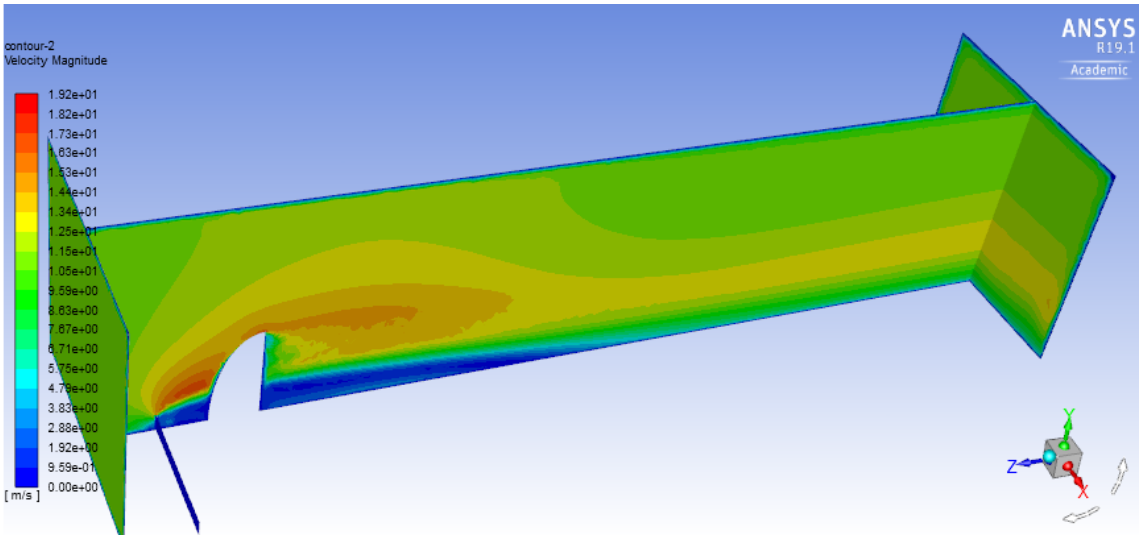


Figura 95: Simulación Fetch con espira de gran tamaño.
Fuente: Propia - Resultado Fluent

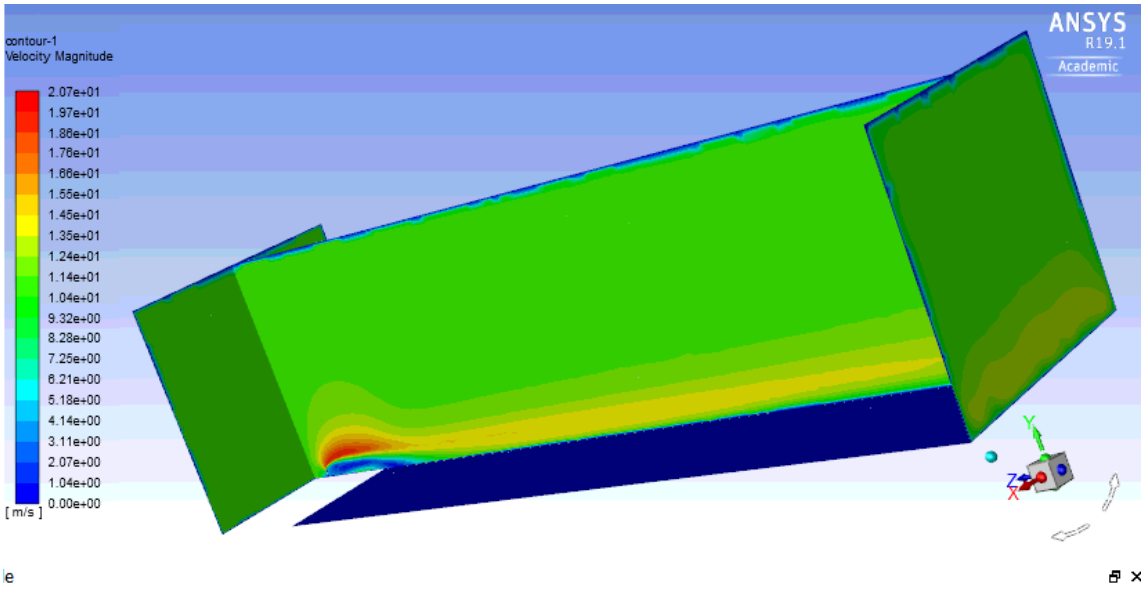


Figura 96: Simulación Fetch con espiras más pequeñas.
Fuente: Propia - Resultado Fluent

Se hizo una simulación con elementos de rugosidad dimensionados con las ecuaciones propuestas en los capítulos anteriores, a pesar de que no se cumpliese con los rangos de aplicabilidad de las ecuaciones. Las Figuras 97 se muestra que la perturbación hecha por los elementos de rugosidad, apenas visible, es despreciable para el caso.

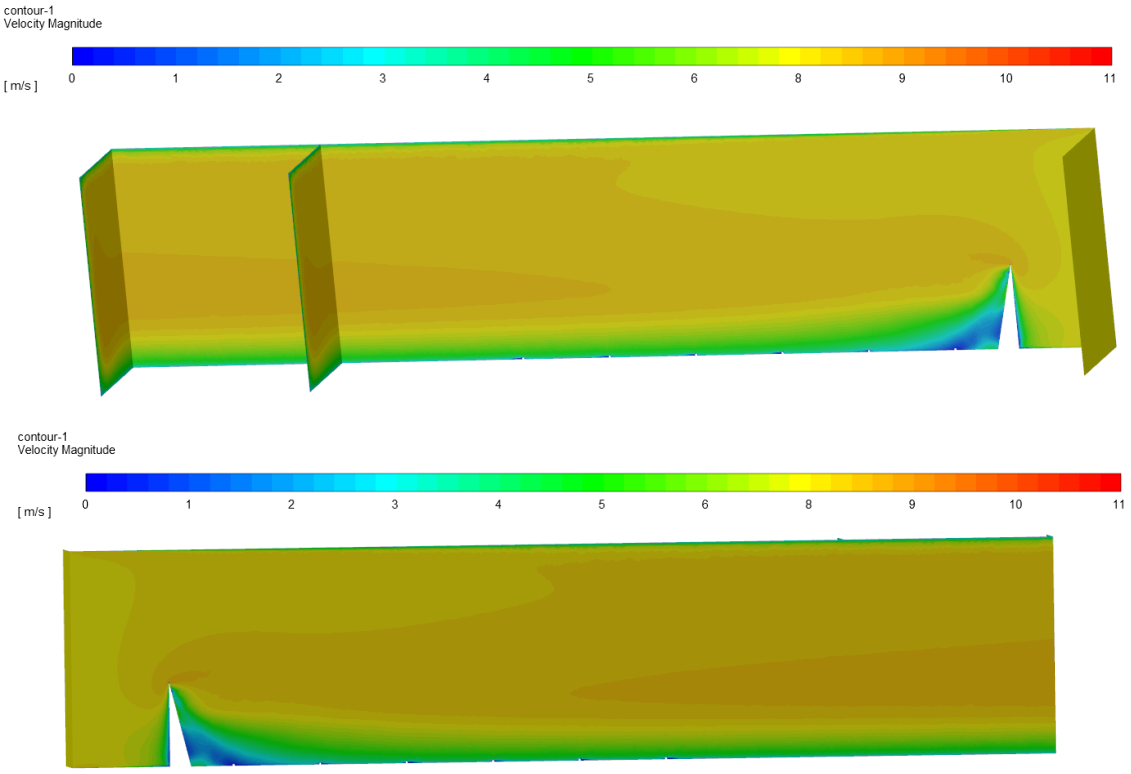


Figura 97: Simulación Fetch con Elementos de Rugosidad
Fuente: Propia - Resultado Fluent

8.2. Anexo: Código EES para el cálculo de las dimensiones de Espiras y Elementos de Rugosidad en la Fetch.

```
$keyboard us

alpha=1/6.5 {Exponente de la Ley de Potencia para la capa límite}
delta=alto*0.3 {Altura de la capa límite, recomendado: 30% de la altura de la Fetch}
alto=0.75[m] {Altura de la Fetch}

h=1.39*delta/(1+alpha/2){Ecuación para encontrar la altura de la espira para una determinada altura de capa límite}

b/h=0.5*(psi*(alto/delta)/(1+psi))*(1+alpha/2) {ecuación para relacionar la altura de la espira con el ancho de la base, se ocupan adicionalmente los parámetros psi y beta calculados abajo}

psi=beta*((2/(1+2*alpha))+beta-(1.13*alpha/(1+alpha))*(1+alpha/2))/(1-beta)^2
beta=(delta/alto)*alpha/(1+alpha)
w=h/4 {largo de la espira}

D=0.25[m]{Espaciamiento de los elementos}
k_max=h-delta {Altura máxima recomendada de los elementos de rugosidad}
k_min=delta/16 {Alura mínima recomendada de los elementos de rugosidad}

D=l+k
k/delta=exp(2/3*ln(D/delta)-0.1161*sqrt(2/Cf+2.06)) {ecuacion valida para 30<delta*D^2/k^3<2000 (denominado aquí como "factor"), propuesta por Irwin 1981}
factor=delta*D^2/k^3
Cf=0.136*(alpha/(1+alpha))^2 {Relación de Gartshore para el Coeficiente de fricción de superficie}

largo_necc=6*h {Largo necesario para el desarrollo de la capa límite}
```

$$\alpha = \frac{1}{6.5}$$

$$\delta = \text{alto} \cdot 0.3$$

$$\text{alto} = 0.75 \quad [\text{m}]$$

$$h = 1.39 \cdot \left[\frac{\delta}{1 + \frac{\alpha}{2}} \right]$$

$$\frac{b}{h} = 0.5 \cdot \psi \cdot \left[\frac{\frac{\text{alto}}{\delta}}{1 + \psi} \right] \cdot \left[1 + \frac{\alpha}{2} \right]$$

$$\psi = \beta \cdot \left[\frac{\frac{2}{1 + 2 \cdot \alpha} + \beta - \left(1.13 \cdot \left[\frac{\alpha}{1 + \alpha} \right] \cdot \left[1 + \frac{\alpha}{2} \right] \right)}{(1 - \beta)^2} \right]$$

$$\beta = \frac{\delta}{\text{alto}} \cdot \left[\frac{\alpha}{1 + \alpha} \right]$$

$$w = \frac{h}{4}$$

$$D = 0.25 \quad [\text{m}]$$

$$k_{max} = h - \delta$$

$$k_{min} = \frac{\delta}{16}$$

$$D = l + k$$

$$\frac{k}{\delta} = \mathbf{exp}\left[2 / 3 \cdot \mathbf{ln}\left(\frac{D}{\delta}\right) - 0.1161 \cdot \left(\sqrt{\frac{2}{Cf} + 2.06}\right)\right]$$

$$factor = \delta \cdot \frac{D^2}{k^3}$$

$$Cf = 0.136 \cdot \left[\frac{\alpha}{1 + \alpha}\right]^2$$

$$largo_{necc} = 6 \cdot h$$

8.3. Anexo: Cotizaciones Importantes

S&P Chile SpA
Av. Oceánica N°9692, Pudahuel - Santiago de Chile
Teléfono: 2 2306 3000 - Email : asistentecomercial.scl@solerpalau.cl

Fecha **27-09-2019**
N°Cotización **240536**

Ver. Anterior:
Creado por:

Proyecto:

Cliente: TRACTEBEL ENGIE

Atención: Diego Larrain

Email: diego.larrain@tractebel.engie.com

Teléfono:

Designación	Cantidad	Modelo	Descripción	Potencia Motor (KW)	V	Caudal (m^3/h)	Presión (mmca)	RPM	Vel. descarga (m/seg)	Nivel Sonoro (dB)	Valor Unitario	Valor Total
Equipo a pedido	1	TGT/2-560-6/18°-5,5kW	Extractor helicoidal tubular de accionamiento directo.		380						$ 1.225.210	$ 1.225.210

Condiciones Generales	
1. Forma de pago :	Contado. Transferencia electrónica.
2. Plazo de entrega :	Bajo pedido, 12 semanas aprox.
3. Validez oferta :	15 Días .
4. Exclusiones :	Accesorios no cotizados no están incluidos.
5. Observaciones :	Equipos puestos en nuestras bodegas. Despachos previa confirmación, puestos sobre camión.
6. Pagos con transferencia :	Cuenta Corriente **Banco Santander N°6569746-7** Rut **76.186.451-3** **S&P Chile SpA** Envíar copia de transferencia al mail **psutter@solerpalau.com**

Neto	$ 1.225.210
Descuento	30%
Sub Total	$ 857.647
19 % IVA	$ 162.953
Total	$ 1.020.600

Patricio Sutter García
Ejecutivo de Ventas Área HVAC
22306 3053
psutter@solerpalau.com

ZonaIndustrial
NETWORKING Y AUTOMATIZACIÓN

Zona Industrial SpA
RUT: 76059273-0
Mateo de Toro y Zambrano 1491
La Reina, Santiago
Teléfono: 229479301

COTIZACIÓN ZI-22916

Detalles de la Empresa

Universidad Técnica Federico Santa María
81668700-4

Contacto: diego cristobal larrain
Teléfono: .
Email:
diego.larrain.12@sansano.usm.cl

Detalles de la oferta

Fecha: 02/12/2019 11:21:20
Válido Hasta: 16/12/2019
Forma de Pago: Transferencia Bancaria BCI
Plazo de Pago: Crédito a 30 días
Moneda: CLP WEB (CLP)
Envío: Retiro en el Local sin costo

Detalles de Contacto

Vendedor: Alberto Medina
Teléfono: 22947 9301
Email: alberto@zonaindustrial.cl

Linea	Descripción	Valor Unitario	Cantidad	Subtotal
1	[IF20-408-3] Variador Frecuencia Vectorial IF20 7,5HP 380V Trifásico, Marca: Metaltex. Peso: 0,000 por importacion tiempo de entrega entre 8 a 12 dias Stock Disponible: 0 Ficha Técnica	CLP $ 396.704	1	CLP $ 396.704

Sub Total	CLP $ 396.704
I.V.A. 19%	CLP $ 75.374
Total a Pagar	CLP $ 472.078

Términos y Condiciones de esta oferta

- Productos en garantía se revisará previo cambio para determinar causa de falla.

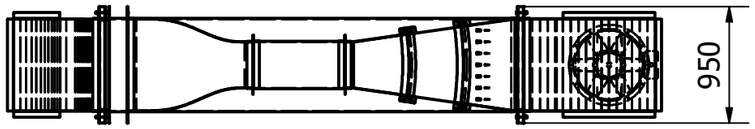
- Se acepta devolución de dinero hasta 10 días posterior a la emisión de la factura.

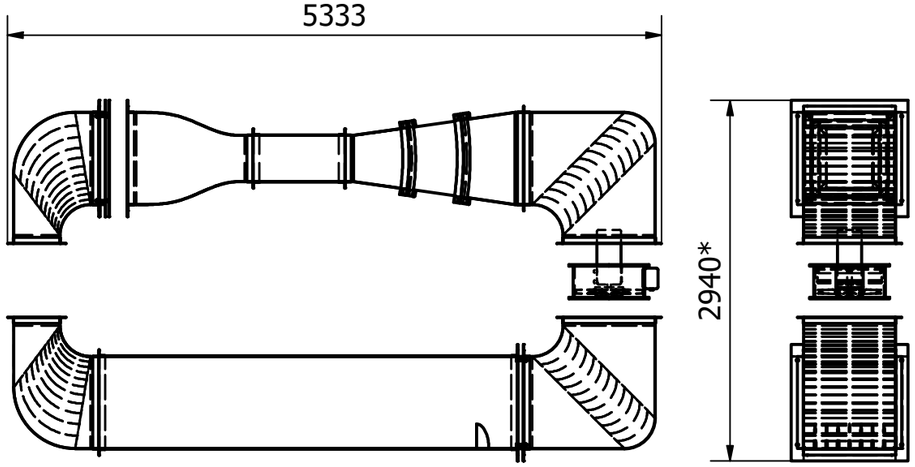
- Se acepta cambio de producto hasta 30 días posterior a la emisión de la factura.

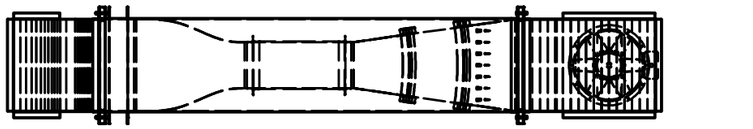
- Producto Importado bajo pedido no tiene cambio ni devolución.

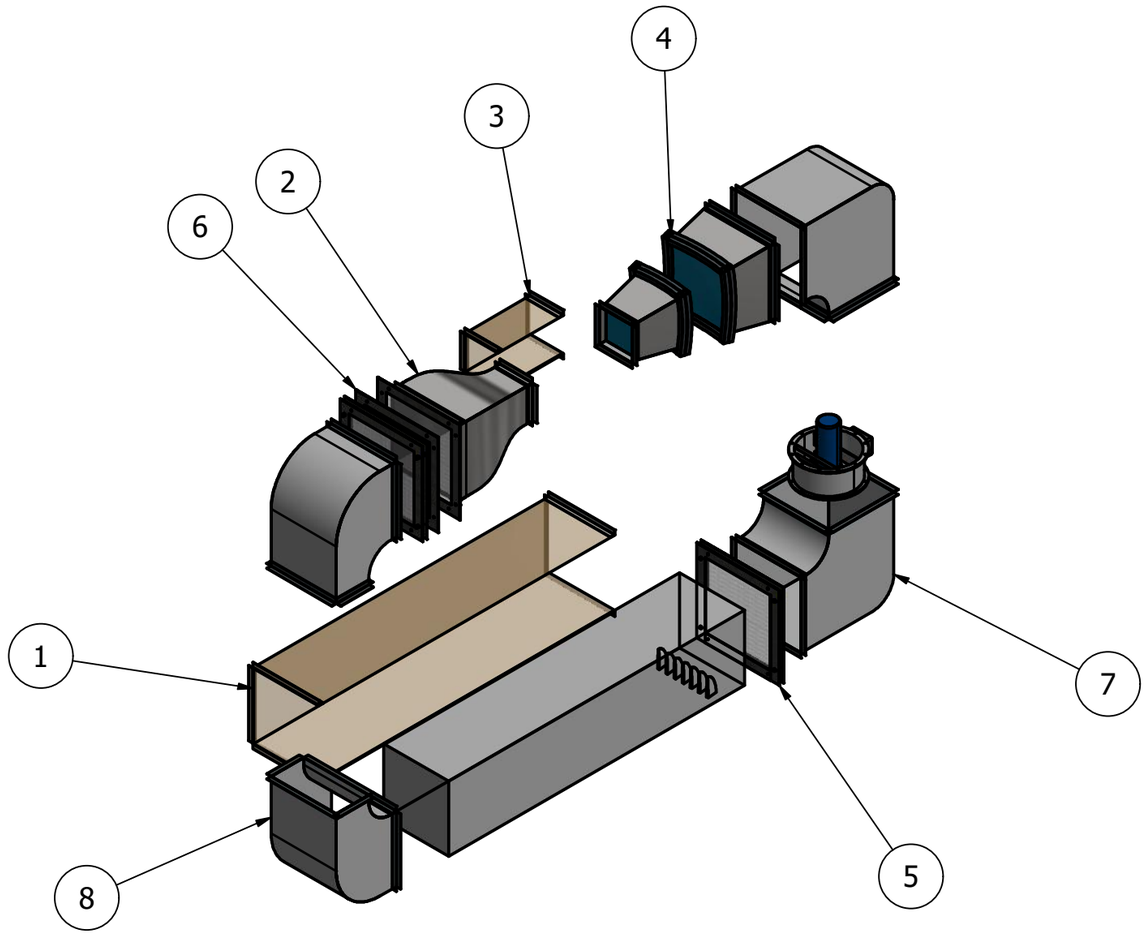
- Para cualquier condición de cambio, se exige empaque original y producto en impecable estado, el que será revisado previo al cambio.

8.4. Anexo: Planos









ITEM	CANT	PARTE
1	1	Cámara de Desarrollo de Capa Límite
2	1	Contracción
3	1	Cámara de Pruebas Aerodinámica
4	1	Difusor
5	2	Honeycomb
6	2	Pantalla
7	2	Codos Normales
8	2	Codos de Expansión

LISTA DE PARTES

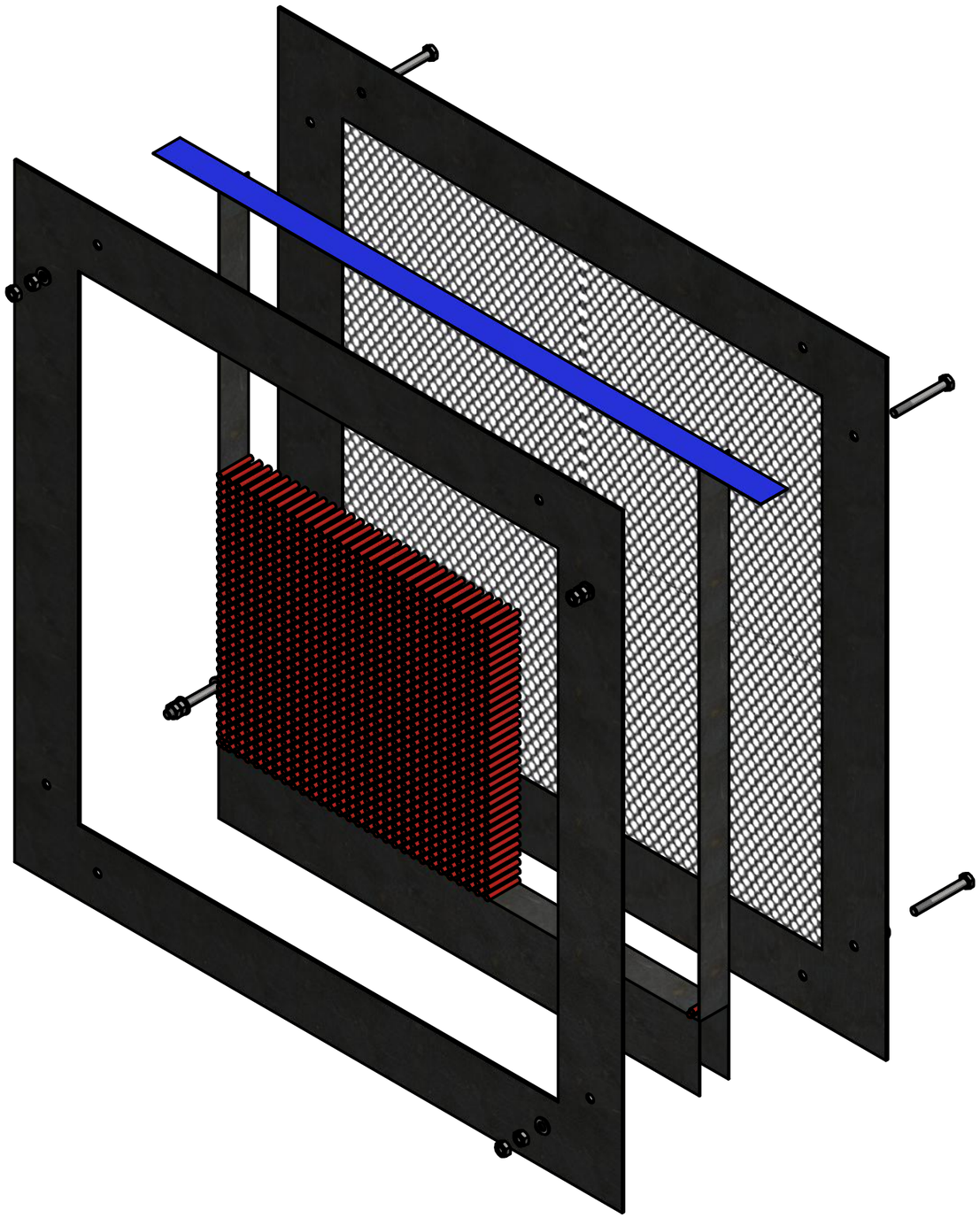
CARACTERISTICAS ESPECIALES

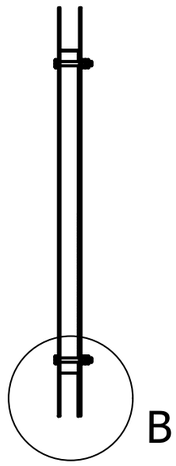
- * La altura del Túnel de Viento dependerá del tamaño del ventilador. La altura actual propuesta considera el ventilador seleccionado sin zona de transición circular/cuadrada.
- Las uniones entre secciones se harán apernadas, cuidando de no estorbar la apertura de las puertas de las cámaras de prueba.

Diseñado por	Revisado por	Aprobado por	Fecha aprobación	Fecha Emisión	
Diego Larrain				06-12-2019	

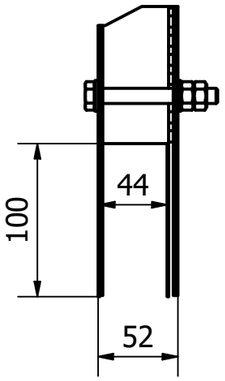
UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

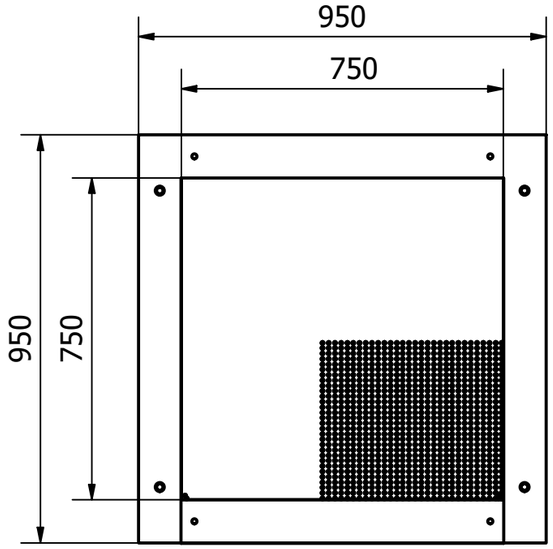
Tunel de Viento Atmosférico	Edition	Sheet
		1 / 1





B (1:4)





CARACTERISTICAS ESPECIALES

- Marcos formados por planchas de 1 mm.
- Bombillas tipo Mc'Donald de 49 mm de largo, ver informe.
- Pantallas Mesh N°3.
- Las pantallas se ocupan para fijar las bombillas en su lugar.
- Los pernos deben dejar espacio para que la Honeycomb entre en rieles para montaje/desmontaje simple.
- Las bombillas deben llenar el área transversal, se presentan solo una porción.

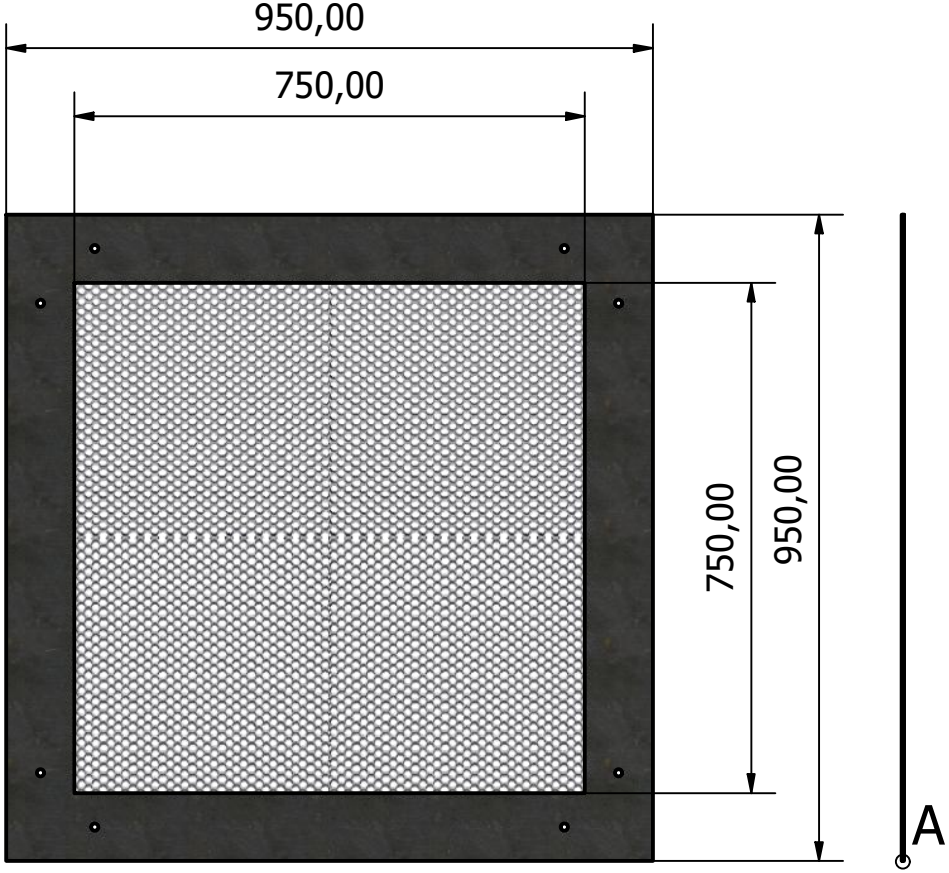
CANT	PARTE
1	Marco Bombillas
2	Pantalla
8	Tuercas M10
4	Pernos M10
8	Arandelas M10
1	Placa de Apriete
~12.700	Bombillas

LISTA DE PARTES

Diseñado por	Revisado por	Aprobado por	Fecha aprobación	Fecha Emisión	
Diego Larrain				04-12-2019	

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Honeycomb	Edition	Sheet
		1 / 1



A (2:1)



CARACTERISTICAS ESPECIALES

- Marcos formados por planchas de 1 mm.
- Lado de los marcos en contacto con la Mesh deben ser enchapados en madera.
- Pantallas Mesh N° 10 (excepto en Honeycomb).
- Fijación de pantallas por pernos.

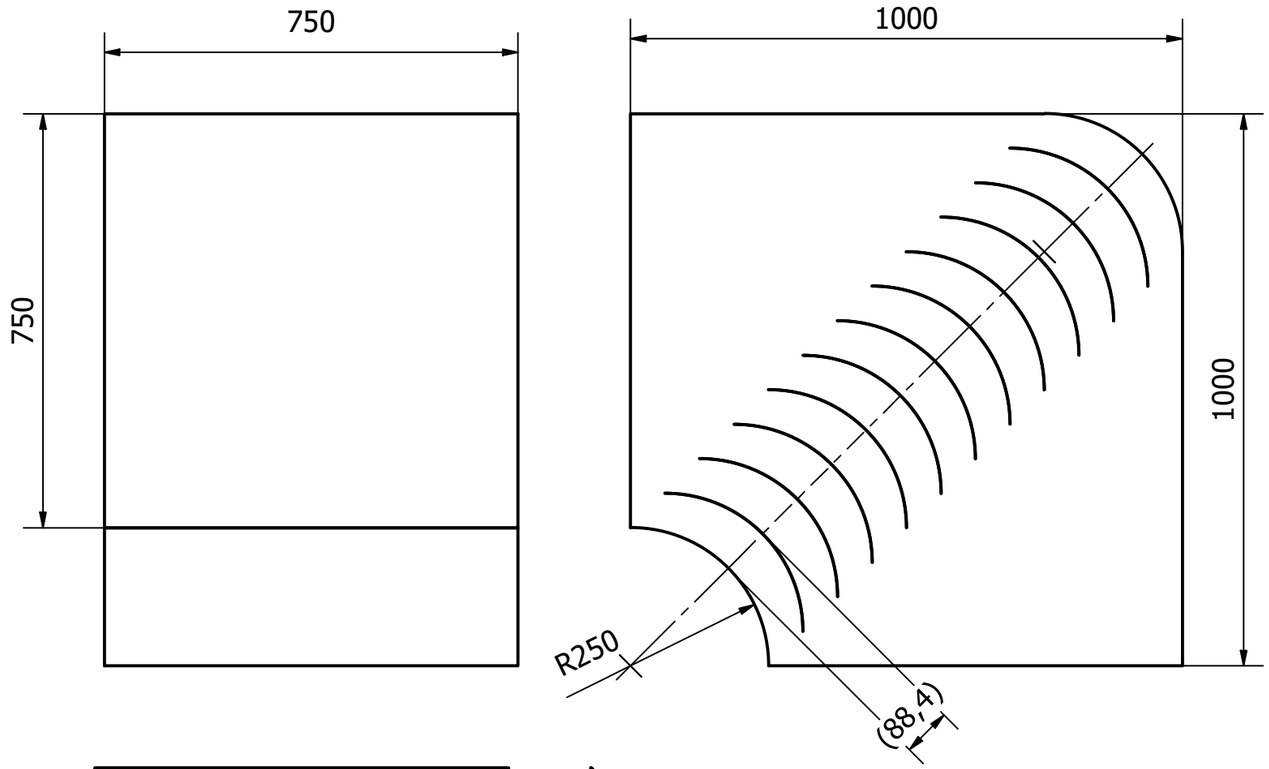
CANT	PARTE
2	Marco Pantalla
1	Mesh N°10

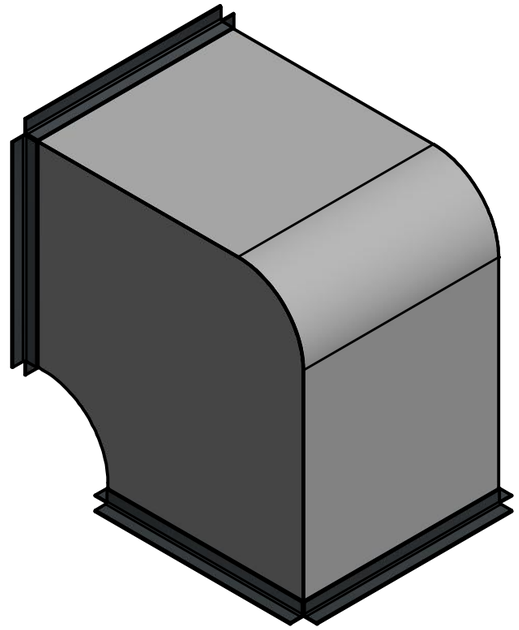
LISTA DE PARTES

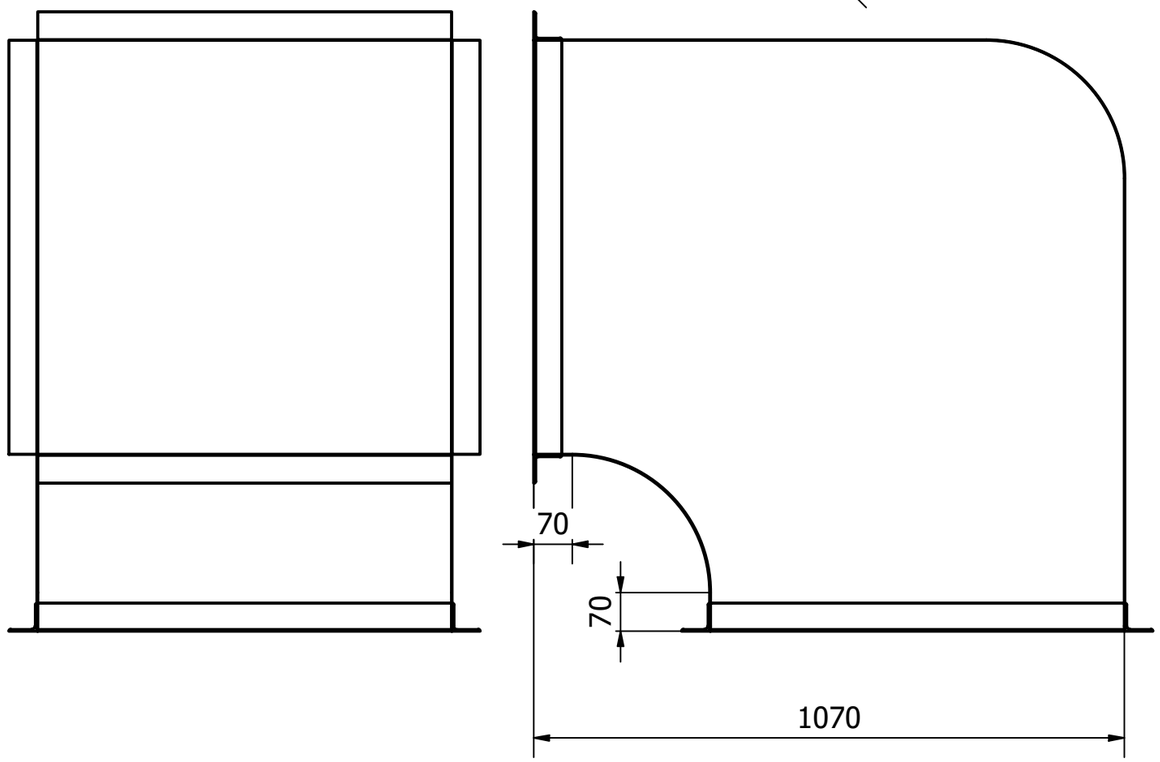
Diseñado por	Revisado por	Aprobado por	Fecha aprobación	Fecha Emisión
Diego Larrain				05-12-2019

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Pantalla	Edition	Sheet
		1 / 1







CARACTERISTICAS ESPECIALES

- 11 Álabes Deflectores internos equiespaciados
- Radio de álabe: 250 mm
- Pestaña de 70 mm para unir los perfiles.
- Uniones con perfiles L de 2" x 1/8"

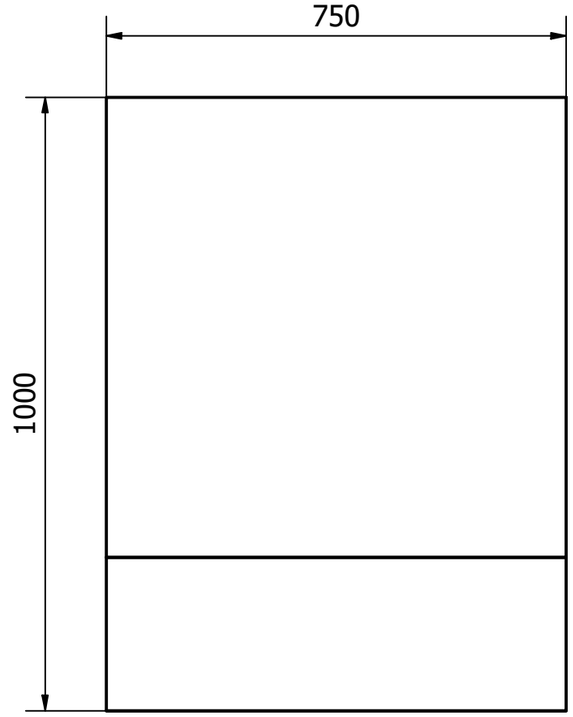
1	Hojalatería Codo Normal
8X750 mm	AISC - L 2 x 2 x 1/8
11	Álabes Deflectores 250 mm
CANT	PARTE

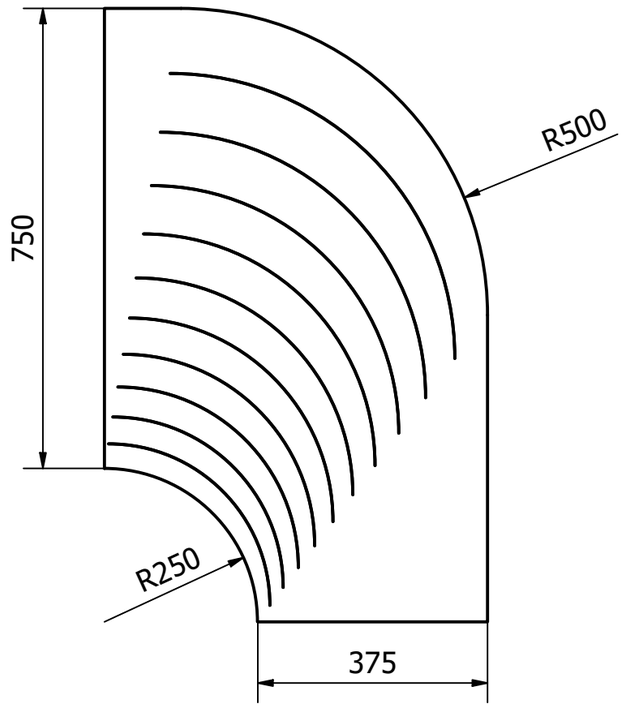
LISTA DE PARTES

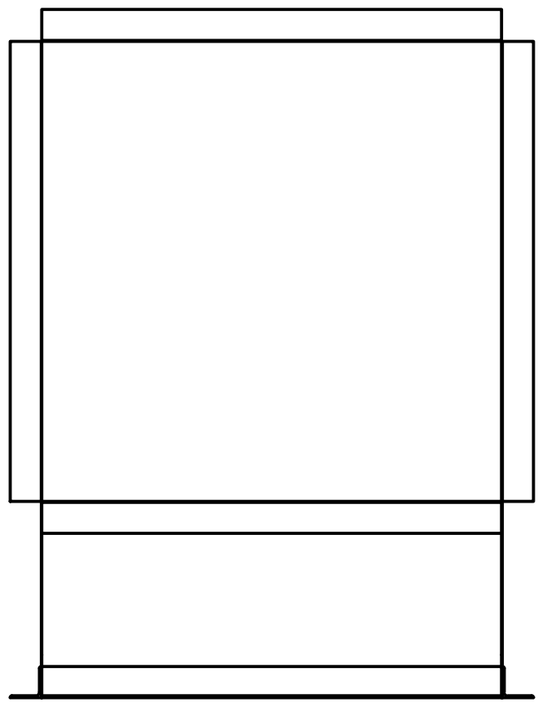
Diseñado por	Revisado por	Aprobado por	Fecha aprobación	Fecha Emisión	
Diego Larrain				02-12-2019	

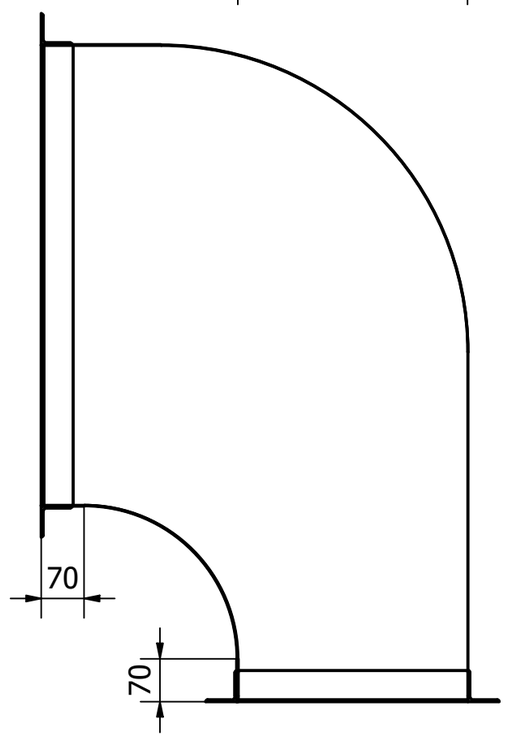
UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

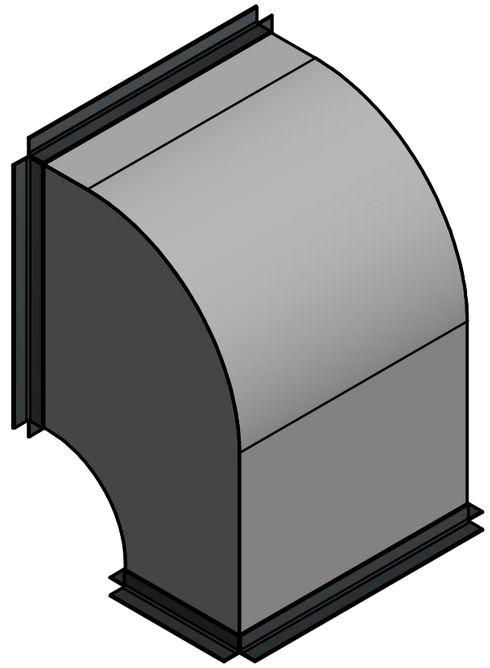
Codo Normal 11 Álabes	Edition	Sheet 1 / 1











CARACTERISTICAS ESPECIALES

- 10 Álabes Deflectores internos
- Radio de álabe interior: 250 mm
- Radio de álabe exterior: 500 mm
- Uniones con perfiles L de 2"
- Pestaña de 70 mm para adherir los perfiles
- Espaciamientos Horizontales: 20 - 22 - 24 - 27 - 30
  33 - 36 - 40 - 44 - 48 mm
- Espaciamientos Verticales: 40 - 44 - 49 - 54 - 59
  65 - 72 - 79 - 87 - 96 mm

1	Hojalatería Codo Expansión
6X750 mm	AISC - L 2 x 2 x 1/8
2x375	AISC - L 2 x 2 x 1/8
10	Álabes Deflectores de diferente radio
CANT	PARTE

LISTA DE PARTES

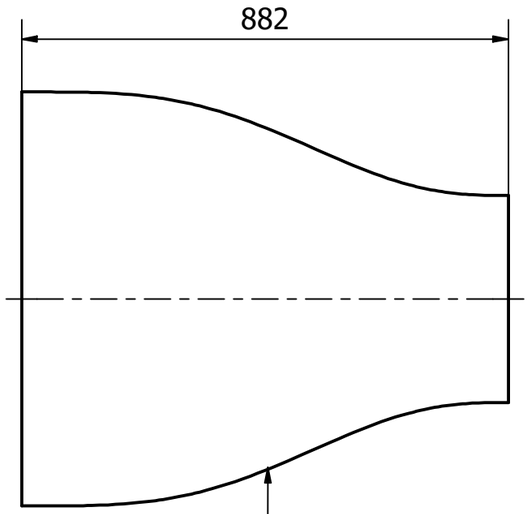
Diseñado por	Revisado por	Aprobado por	Fecha aprobación	Fecha Emisión	
Diego Larrain				03-12-2019	

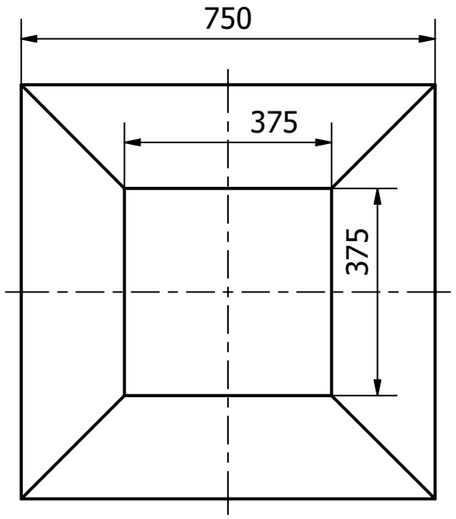
UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

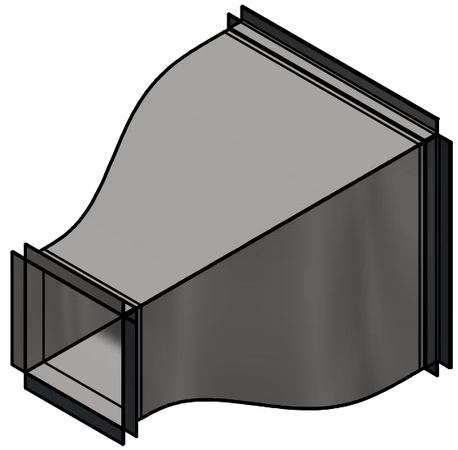
Codo-Expansión

Edition

Sheet 1 / 1



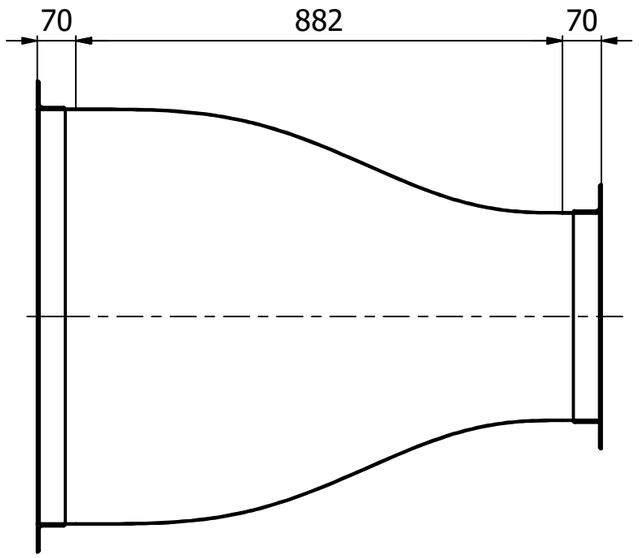


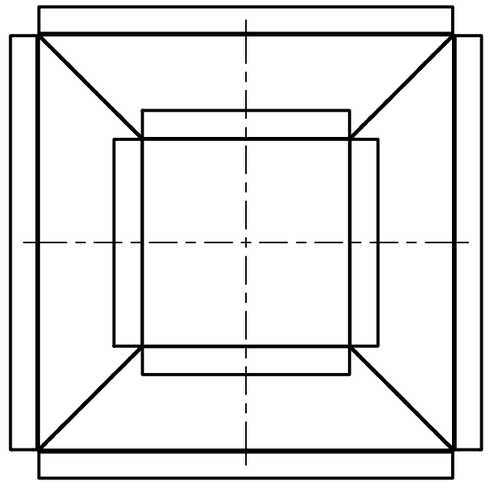


$$\frac{375}{2}+t^3\frac{625}{114354828}-t^4\frac{625}{44827092576}+t^5\frac{125}{9884373913008}-t^6\frac{625}{156924320242915008}$$

CARACTERISTICAS ESPECIALES

- Uniones con perfiles L de 2"
- Pestaña de 70 mm para adherir los perfiles



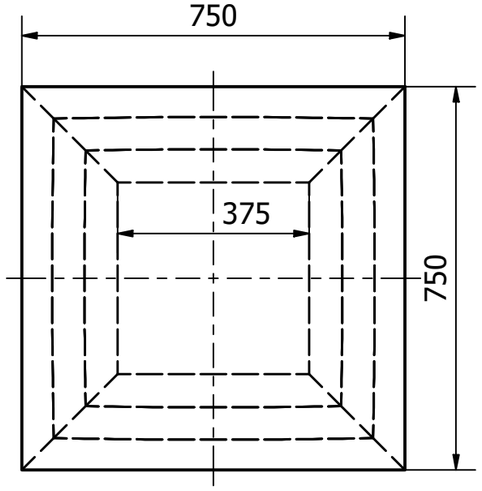


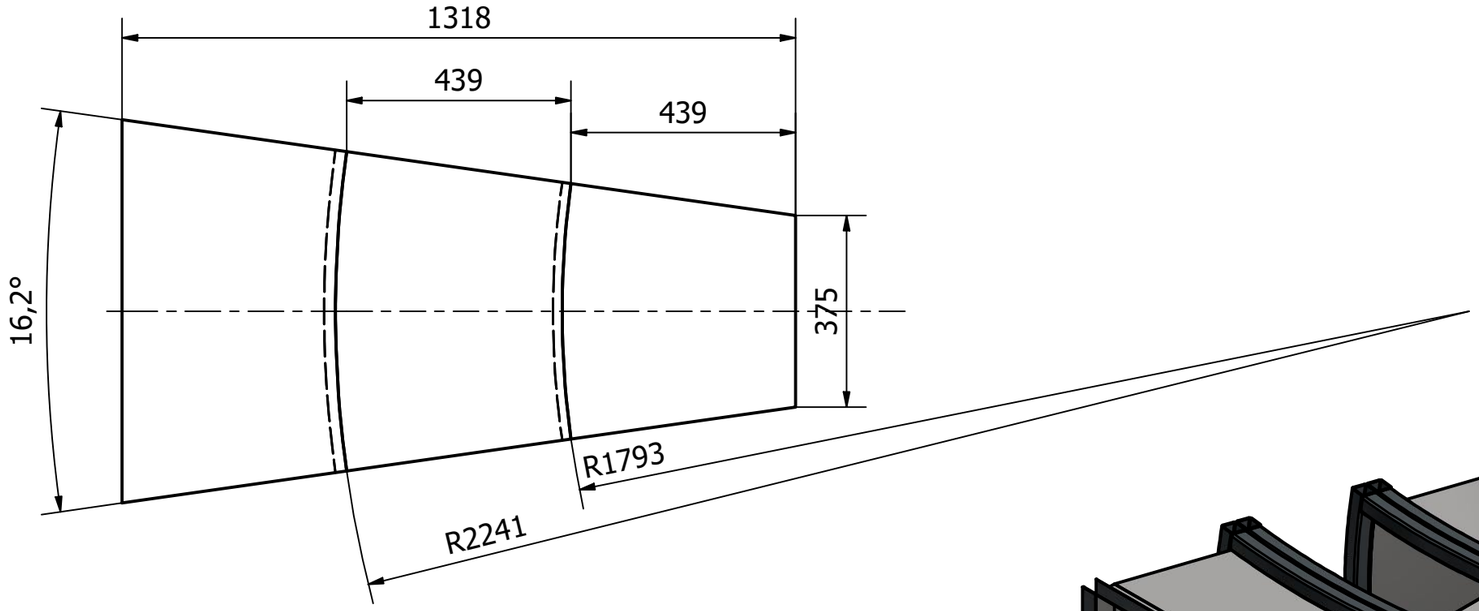
4	Hojalatería Contracción
8X750 mm	AISC - L 2 x 2 x 1/8
CANT	PARTE
LISTA DE PARTES	

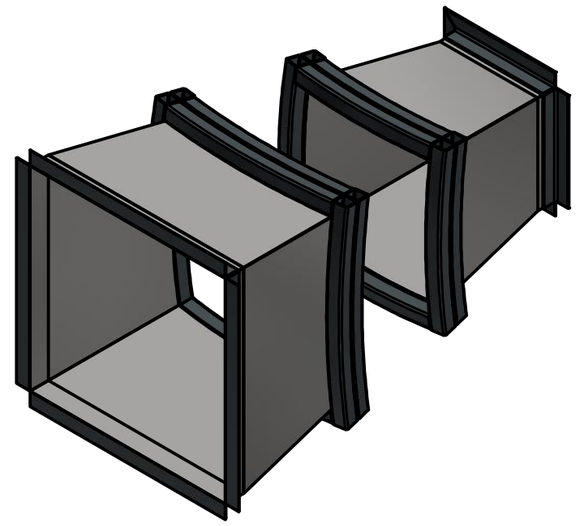
Diseñado por	Revisado por	Aprobado por	Fecha aprobación	Fecha Emisión	
Diego Larrain				02-12-2019	

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

	Edition	Sheet
Contracción		1 / 1

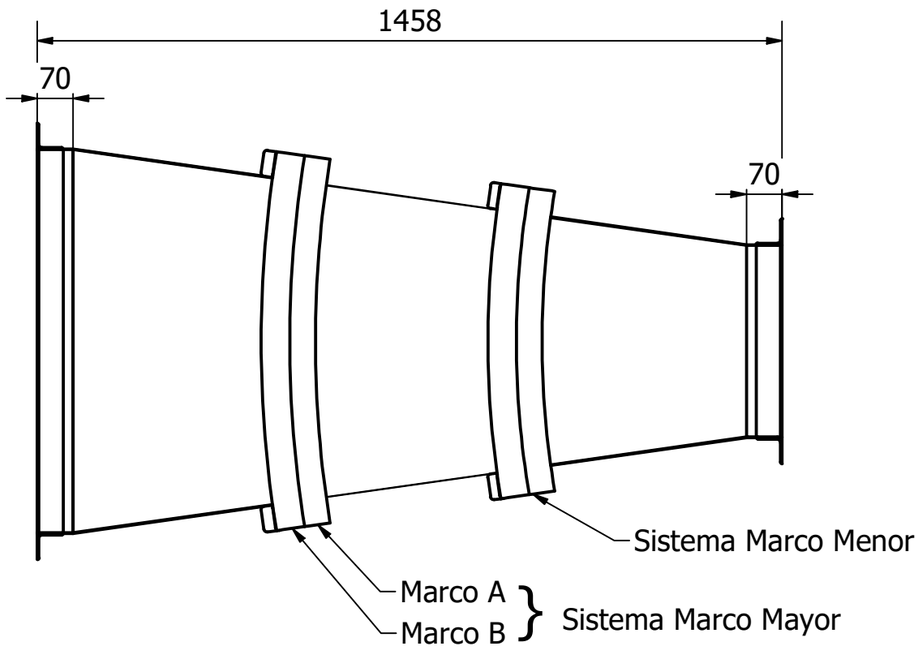






CARACTERISTICAS ESPECIALES

- Pestaña de 70 mm para unir los perfiles.
- Uniones con perfiles L de 2" x 1/8"
- Sistemas de Marco: Los marcos están unidos al cuerpo de la sección, la pantalla va entre los marcos A y B, los cuales irán enchapados en madera para no dañarlas.
- Los marcos se apretarán a través de pernos, uniendo las secciones.
- Las uniones para formar los marcos deberán ir soldadas.
- La curvatura de los marcos debe ser tal que permitan la forma de la figuras superiores.
- Pantalla Marco Menor: Mesh N°10.
- Pantalla Marco Mayor: Mesh N°12.



CANT	PARTE
1	Sistema Marco Inferior
1	Sistema Marco Superior
1	Hojalatería Sección Difusor Mayor
1	Hojalatería Sección Difusor Intermedia
1	Hojalatería Sección Difusor Inferior
4x375mm	Perfil L 2"x1/8"
4x750mm	Perfil L 2"x1/8"
1	Difusor Superior

LISTA DE PARTES

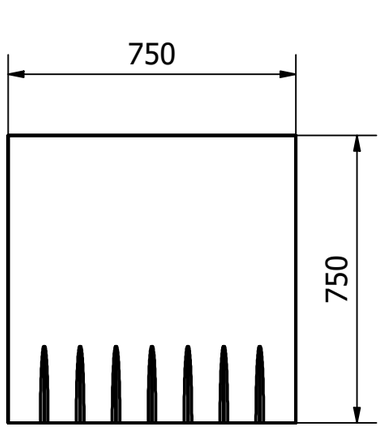
Diseñado por	Revisado por	Aprobado por	Fecha aprobación	Fecha Emisión	
Diego Larrain				03-12-2019	

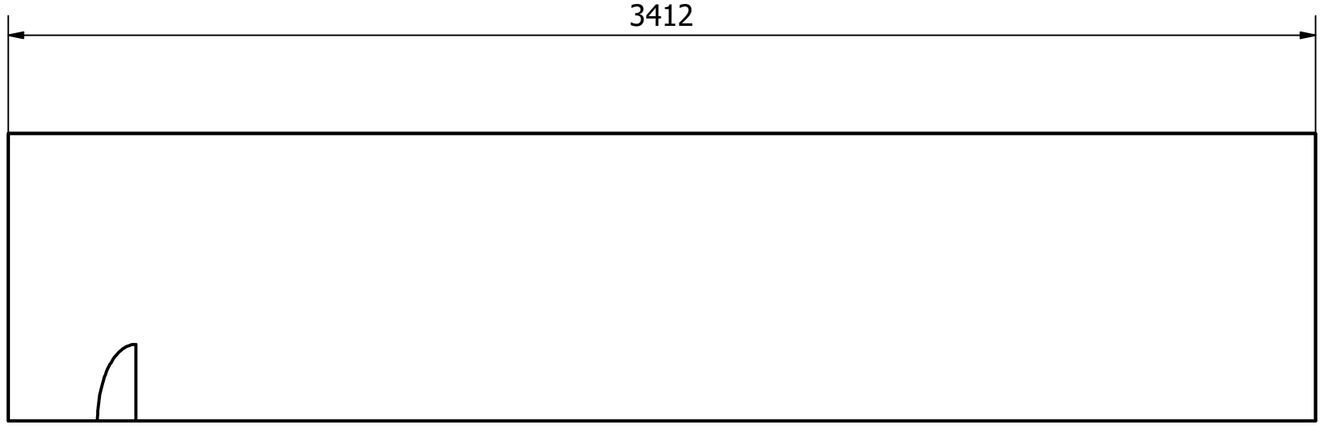
UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

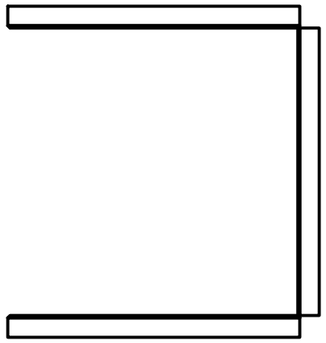
Difusor

Edition

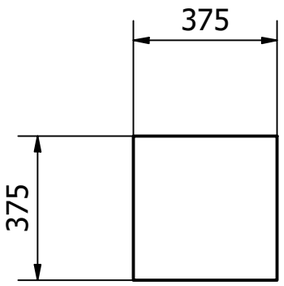
Sheet 1 / 1

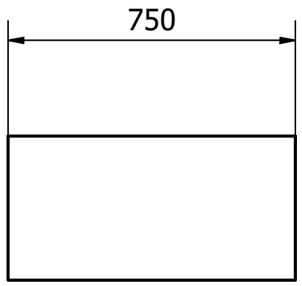


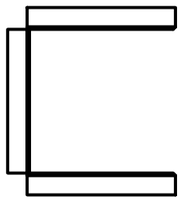


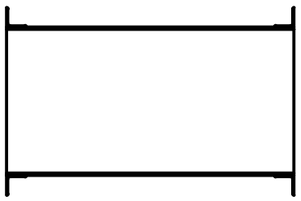












CARACTERISTICAS ESPECIALES

- Los perfiles L se unen directamente al acrílico.
- Uniones con perfiles L de 2" x 1/8".
- Espiras en el dibujo sólo para referencia.

PARTS LIST	
CANT	PARTE
4x375mm	Perfil L 2"x1/8"
4x750mm	Perfil L 2"x1/8"
1	Cámara de Pruebas - Acrílico Transparente
1	Fetch - Acrílico Transparente

Diseñado por	Revisado por	Aprobado por	Fecha aprobación	Fecha Emisión	
Diego Larrain				03-12-2019	

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

	Edition	Sheet
Cámaras de Prueba		1 / 1