

**CONSTRUCCIÓN DE UN CÓDIGO
COMPUTACIONAL PARA EL CIRCUITO
AERODINÁMICO DE UN TÚNEL DE VIENTO**

AUTOR

TAISON ALEXANDER PARRA CHAVEZ

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA,
MECATRÓNICA E INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURAS**



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

PAMPLONA, 12/04/2019

**CONSTRUCCIÓN DE UN CÓDIGO COMPUTACIONAL
PARA EL CIRCUITO AERODINÁMICO DE UN TÚNEL DE
VIENTO**

AUTOR

TAISON ALEXANDER PARRA CHAVEZ

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:**

INGENIERO MECÁNICO

DIRECTOR:

JUAN CARLOS SERRANO

PH.D

JCSERRANO@UNIPAMPLONA.EDU.CO

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA,
MECATRÓNICA E INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURAS**



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

PAMPLONA, 12/04/2019

Dedicatoria

Este espacio es dedicado a todas la personas que me acompañaron en este proceso de formación, comenzando con mis compañeros que se volvieron mi familia, personas que estaban dispuestas a brindarte una mano o darte un consejo, de ser necesario, a esos docentes que respetan su labor y saben que enseñar es un proceso de no terminar y lo demuestran, no solo en la aula, sino en su vivir del día a día, siendo un ejemplo constante y brindando un impulso a seguir y un deseo a mejorar, a lograr metas altas y títulos grandes como los que estos poseen, en general, a mi familia que siempre estuvo y sé que estará para apoyar las decisiones tomadas en pro de mi crecimiento personal, a mi novia que me motiva a alcanzarla, igualarla y tal vez superar sus logros.

Este logro es para ti, Diomira Chavez, Alexander Parra y sobre todo Alexis Yesid Parra, pues tu meta es demostrar tu grandeza, que me dejes ver que nunca me confundí al creer que todos mis logros serían y serán superados por ti, pues en ti veo un tey, como ustedes me dicen de cariño, pero sin tanta desidia, un joven que no sufre de déficit de atención, mi hermano o como siempre lo he dicho la versión mejorada de mí.

Es dedicado a esos que siempre creyeron en el sueño de este joven, a esos que sin ser de mi familia y sin tener porqué, siempre estuvieron para brindar motivación en este caso hablo de la familia Muñoz una familia incondicional no solo para mí, sino para mi vínculo familiar.

AGRADECIMIENTOS

En este punto recapitulo y veo la cantidad de personas que, de una u otra forma, han contribuido y colaborado en este proyecto, pues creo que son muchas, pero para dar un orden agradeceré siguiendo el recorrido del proyecto.

En la realización y validación del código existen dos personas que destacan por su trabajo y entendimiento al momento de programar estos son el estudiante y futuro Ing. Mecánico Andrés Córdoba y el Ing. de sistemas Wilder Naranjo.

Para la realización del modelado de los diferentes sistemas de túneles de viento agradeceré al Ing. Mecánico (CSWE SOLIDWORKS) Sebastián Fuentes.

En la construcción y montaje de las simulaciones realizadas en ansys, se necesitó de la colaboración de dos de las personas más influyentes en ingeniería mecánica, cuando se habla de softwares y de simulaciones, pues desde mi perspectiva tienen un dominio peculiar de estos programas denotando su capacidad a la hora de dar solución a ejercicios de manera computacional uno de ellos fue mi docente y tuve el privilegio de aprender y ver su trabajo en el aula el magíster Edison Martínez, la otra persona es un estudiante, alguna vez mi compañero, el estudiante Jorge Antonio Velasco, estudiante que resalta por sus investigaciones y su trabajo con este software.

De forma general, pues estuvo en el trascurso de todo mi proyecto, mi tutor el PhD Juan Carlos Serrano.

Existen otras personas que de forma particular ayudaron en la construcción de este proyecto las nombrare en listado, estas personas ayudaron de formas muy variadas, cada uno a su manera los estudiante y próximos ingenieros Sergio Daniel Jaimes, Duvan Arley Mogollon, Gustavo Rave, el Ing. Juan Mora Gonzales.

Y ya de forma general, para llegar a este punto a mi madre y mi padre, pues son las personas que me motivan este crecimiento personal, mi ejemplo y esas personas que

siempre quiero que se sientan orgullosas del hombre que están formando y que en algún momento los representara como es debido.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción.....	16
1.1 Objetivo general.....	19
1.2 Objetivos Específicos	19
2. marco TEÓRICO.....	21
2.1 Flujo.....	22
2.1.1 Flujo laminar	22
2.1.2 Flujo turbulento.....	23
2.2 Capa límite.....	23
2.2.1 El número de Reynolds.....	27
2.2.2 Capa límite laminar	24
2.2.3 Capa límite turbulenta	26
2.3 Coeficiente de sustentación y arrastre	28
2.3.1 COEFICIENTE DE ARRASTRE	28
2.3.2 Coeficiente de sustentación	29
2.4 Ecuación de Bernoulli.....	30
2.4.1 Ecuación de continuidad.....	31
2.5 Túnel de VIENTO Y su CLASIFICACIÓN general	32
2.5.1 CLASIFICACIÓN GENERAL	33
2.5.2 De circuito abierto.....	35
2.5.3 De circuito cerrado.....	36
2.5.4 Configuración de la capara de ensayos	37
2.6 software	38
2.6.1 Python	38
2.6.2 SOLIDWORKS	39
2.6.3 Ansys.....	39
2.6.4 CFD.....	39
3. diseño del TÚNEL de viento	41

3.1.1	Cámara de pruebas	45
3.1.2	Contracción	47
3.1.3	Cámara de sedimentación	49
3.1.4	Difusor	52
3.1.5	Difusor de grande ángulo	55
3.1.6	Esquina	57
3.1.7	Transición	58
4.	CONSTRUCCIÓN de un CÓDIGO computacional para DIMENSIONAR el circuito AERODINÁMICO	60
4.1.1	Sistemas seleccionados a diseñar	60
4.1.2	Aplicativo	62
4.1.3	Códigos que componen el aplicativo	62
4.1.4	Generación de la interfaz	63
4.1.5	Muestra de interfaz y prueba	63
4.1.6	Aplicación del botón de recalcular	68
4.1.7	Comparación de datos con el código base (Excel)	71
5.	Construcción y situación del circuito de túnel de viento dimensionado con el aplicativo 72	
5.1.1	Construcción de túnel de viento	72
5.1.2	Construcción de túnel de viento en soliworks	72
5.1.3	Geometría para simulación de túnel de viento de circuito cerrado en Ansys 73	
5.1.4	Simulación de túnel de circuito soplador abierto con cámara cerrada en Ansys 74	
5.1.5	Simulación de túnel de succión de circuito abierto con cámara cerrada en Ansys 75	
5.1.6	Resultado de simulaciones generadas en ansys para túnel de circuito cerrado 77	
6.	CONCLUSIONES	81
7.	RECOMENDACIONES	83
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
9.	anexos	86
9.1.1	Encuesta	86
9.1.2	Planos en SolidWorks	90

9.1.3	Aplicativo	93
--------------	-------------------------	-----------

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. rango de velocidades de operación	34
Tabla 2. Figuras de diagrama de flujo.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 3. Datos generales del túnel	59
Tabla 4 Preguntas de la encuesta: " Más allá de un software"	88
Tabla 5 Resultados de la encuesta "Más allá de un software"	89

TABLAS DE IMÁGENES

Imagen 1. Representación de flujo laminar y flujo turbulento.....	23
Imagen 2. capa limite	25
Imagen 3. Capa limite y capa limite turbulenta	27
Imagen 4 Resistencia inducida.....	30
Imagen 5 Tubo de Bernoulli.	31
Imagen 6 Fenómeno de continuidad.	32
Imagen 7 Clasificación de túneles según la velocidad.....	35
Imagen 8 Túnel de viento de circuito abierto.....	36
Imagen 9 Túnel de viento de circuito cerrado.....	37
Imagen 10 Circuito abierto con cámara de ensayos cerrado.....	37
Imagen 11 Circuito abierto con sección de ensayos abierta	38
Imagen 12 Circuito cerrado con sección de ensayos cerrada.....	38
Imagen 13 Circuito cerrado con sección de ensayos abierta.....	38
Imagen 14. Diagrama de flujo de túnel de viento	43
Imagen 15.Tunel de viento de circuito cerrado.....	45
Imagen 16. Cámara de pruebas	47
Imagen 17. Contracción	48
Imagen 18. Coordenadas de contracción	48
Imagen 19. Colmena o panal.....	50
Imagen 20. Imagen de un cuadro de la pantalla.....	51
Imagen 21.Cámara de estabilización.....	52
Imagen 22.Equivalencia de Ángulos en difusores	53
Imagen 23. Número de telas de los difusores 1, 2, 3	54
Imagen 24. Difusor.....	55
Imagen 25. Numero de telas de difusor	56
Imagen 26. Difusor de grande Angulo	56
Imagen 27. Esquina del túnel	57
Imagen 28. Transición.....	58
Imagen 29.Clasificaciones del túnel de viento (Mochizuki y Maruta, 1996);	61
Imagen 30. Túneles de viento a diseñar	61
Imagen 31.Selección de sistema	63
Imagen 32. Ingreso de variables.....	64
Imagen 33. Resultados generales	65
Imagen 34. Detalle	66
Imagen 35.detalle con accesorios de pieza	67
Imagen 36.total del sistema.....	68
Imagen 37.Modificación de datos	69
Imagen 38.Resultados recalculados	70
Imagen 39. Total, recalculado.....	70
Imagen 40.valores del aplicativo de túnel construido en Excel	71
Imagen 41 . simulación realizada en solidwork	73

Imagen 42.Enmallado de túnel de circuito cerrado con recirculación, cámara de pruebas cerrada y detalle de las esquinas.	74
Imagen 43.Enmallado de túnel soplador con 4478140 de nodos.....	75
Imagen 44. Error de solución.....	75
Imagen 45.velocidad de Túnel de circuito cerrado sin detalles	77
Imagen 46.Velocidades de Túnel de circuito cerrado con redireccionadores en esquinas 3-4	78
Imagen 47. Turbulencia de Túnel de circuito cerrado sin detalles	79
Imagen 48. Turbulencia de Túnel de circuito cerrado con redireccionadores en esquinas 3-4	80
Imagen 49 Pregunta n°1 ¿Qué carrera estudia o ejerce?.....	87
Imagen 50 Pregunta2 ¿conoces sistemas de túneles de viento?.....	89
Imagen 51 Pregunta 6 ¿se facilita más un análisis de ejercicio de forma analítica o por medio de un software?	90
Imagen 52.Túnel de succión con cámara cerrada	91
Imagen 53.Túnel soplador con cámara cerrada.....	92
Imagen 54.Túnel cerrado con cámara cerrada	93

LISTA DE ANEXOS

Encuesta	86
Planos en SolidWorks.....	90 Error! Marcador no definido.
Aplicativo	93

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo la elaboración de una aplicación para el diseño y optimización de un circuito aerodinámico de un túnel de viento. La aplicación elaborada bajo el software Python proyecta el circuito aerodinámico de ocho configuraciones básicas de circuitos de túneles donde los parámetros de entrada son la velocidad esperada, el área de la sección transversal de la cámara de pruebas y la relación de contracción. Los circuitos tienen características como cámara de prueba cerrada/abierta, circuito aerodinámico abierto/cerrado y el ventilador del tipo succión/soplador. Una vez la aplicación determina las características del túnel de viento, el diseñador podrá realizar modificaciones a dicho circuito. Para validar la aplicación se seleccionó un túnel de viento de circuito cerrado, cámara de pruebas cerrada, relación de contracción de siete y con velocidad en la cámara de pruebas de 60 m/s. Simulaciones posteriores en SolidWorks y ANSYS del circuito y de sus componentes por separado permiten demostrar la utilidad de la aplicación para el diseño de circuitos aerodinámicos de túneles de viento.

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Nombre de variable
A	Área transversal del componente
$d_{pantalla}$	diámetro de la pantalla
c	velocidad del sonido
(C_a)	coeficiente de arrastre
(C_s)	coeficiente de sustentación
D_h	diámetro hidráulico
f	factor de fricción
F_A	Fuerza de arrastre
F_s	Fuerza de sustentación
h	Altura de la sección
K	Coefficiente de pérdida de presión
L	Longitud característica de la sección
M	Numero de March
M	Masa molecular
Ma	Longitud de hilo de malla
N	Tamaño de muestra
P	presión estática
p	Población de éxito
Q	Caudal en un punto característico de la sección
R	constante de gas

Re	Número Reynolds
S	superficie de sección transversal
T	temperatura del gas
TM	Tamaño de población
$U_{pantalla}$	velocidad normal de la pantalla
V	velocidad de fluido
ν	viscosidad cinemática
W	Ancho de la sección
γ	peso específico
z	Nivel de confianza
δ	Espesor flujo
κ	constante adiabática
ε	rugosidad
β	fracción de área abierta

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

El túnel de viento es una herramienta investigativa, generalmente de sección transversal circular, elíptica o rectangular, por los cuales circula viento procedente de un ventilador o aire comprimido; para analizar y medir el fenómeno físico causado por la interacción del fluido alrededor de un cuerpo sólido(Chanetz 2017).

Según Bruno Chanetz¹, el túnel de viento es un medio de investigación experimental muy conveniente, que ha superado los métodos alternativos, basado en el movimiento directo del sólido en el aire.

Este Sistema consiste, principalmente, en un pasaje en forma de túnel con un numero de secciones preestablecidas, por las cuales se hace transitar un flujo aerodinámico, el cual va a entrar en contacto con una pieza sólida, en reposo², que se encuentra posicionada en uno de los componentes del túnel, el cual lleva el nombre de cámara de ensayos, en esta se desea es visualizar dicho comportamiento final. (Chanetz 2017)

En el mundo encontramos muchos túneles ya diseñados, prototipos y hasta construidos unos de tantos es el primer túnel de viento en Perú, implementado el 23 de julio de 2008 en el laboratorio de energía de la facultad de Ingeniería Mecánica de la universidad nacional de ingeniería (UNI) de tipo abierto, ya hablaremos más adelante de estos diferentes tipos y clasificaciones, el fin de dicho túnel fue ayudar a profundizar investigaciones que venían realizando en el desarrollo de pequeños aerogeneradores para la electrificación de poblaciones rurales aisladas del país, para ser más exactos el túnel evalúa, porque aún funciona, el comportamiento mecánico y eléctrico de los aerogeneradores, así mismo mide la eficiencia e identifica y corrige fallas. (Pinilla 2008)

¹ Ingeniero de investigación en ONERA desde 1983, doctor en la Universidad de Lyon I y calificado para la investigación directa (HDR).

² La primera ley de Newton postula que todo cuerpo persevera en su estado de reposo o movimiento uniforme y rectilíneo a no ser que sea obligado a cambiar su estado por fuerzas impresas sobre él.

No podría faltar china, una potencia mundial, con sus ideas innovadoras que cada vez nos sorprenden más, pues en Shanghái en el 2018 se comenzó la construcción de un túnel viento hipersónico más rápido el mundo, el cual tendría de longitud 265 metros, que ayudaría al desarrollo de aviones espaciales, ya que este país pretende construir estos aviones en un futuro para enviar personas al espacio. En el túnel, estos aviones hipersónicos, pueden viajar hasta 25 veces la velocidad del sonido o 30.625 km/h, explica Han Guilai³, esto dejaría a este país como pionero en túneles de viento.(Vanguardia 2019)

En 2011 , en Colombia, se desarrolló el primer túnel de viento, diseñado por el profesor del departamento de física de la universidad Nacional, Roberto Martínez, según él, un túnel de viento es un dispositivo que maximiza la energía que tiene un flujo de aire, un ejemplo muy claro de la funcionalidad que este túnel lo plantea Roberto diciendo:” los vientos muy fuertes pueden dañar las estructuras, entonces es conveniente conocer la forma aerodinámica adecuada para romperlos y que exista un efecto menor sobre la estructura, así como calcular cuánto hierro y cemento de debe usa. Este túnel es pequeño, ya que la idea principal era no causar grandes pérdidas en caso de que no funcionar. Esperanza Caro, una profesora de la escuela de arquitectura y urbanismo de la facultad de artes, afirma que es muy útil para el diseño arquitectónico, pues conlleva a reducir perdidas monetarias, en caso de que la existan dando por sentado la viabilidad de un túnel de viento en la industria. El primer túnel construido en Colombia, sólo puede alcanzar una velocidad de 72 km/h, debido al tipo de motor que se integró, esta velocidad en relación a la velocidad alcanzada por el túnel de china es muy baja, aun así este valor podría mejorarse con el diseño y la implementación de nuevas hélices en el sistema (Univesia 2011)

Generalizando lo anterior, los túneles de viento se clasifican por 3 aspectos: por la circulación del fluido en su interior, por la velocidad del flujo en su interior y por la dirección del flujo, estas tres relaciones desglosan varios ítems, como los son túneles abiertos, túneles cerrados, túneles subsónicos, túneles transónicos, túnel horizontal, entre otros...

³ Investigador de la academia de ciencias de china.

El fin de este proyecto, es la construcción de un código que nos permita ver el dimensionamiento de determinados sistemas de túneles de viento, para un posteriormente realizar un análisis y estudio de viabilidad, con el fin de una futura construcción; proporcionando estimaciones de espacio y costos del proyecto pues con las dimensiones de cada uno de los componentes se puede obtener un cálculo del valor cercano de las piezas de todo el sistema. Para evidenciar la necesidad hallada en la universidad (necesidad de un sistema de túnel de viento como herramienta útil para el aula de trabajo, como para el semillero de investigación de energías renovables, permitiendo la realización de pruebas a escalas de diferentes elementos), enfocándonos en el programa de ingeniería mecánica, se realizó un estudio con un tipo de investigación exploratoria⁴ y analítica⁵; tomamos una muestra poblacional total de 190 personas, ya que en esta área tenemos una población de 340 personas promedio, con posibilidad de integración de otras carreras se utiliza la Ec. (1) tamaño de población a encuestar , con el fin de establecer el número de población necesaria para obtener una toma de datos confiables en teoría:

$$TM = \frac{\frac{z^2 * p(1 - p)}{e^2}}{1 + \left(\frac{z^2 * p(1 - p)}{e^2 N}\right)} \quad (1)$$

Donde TM representa el tamaño de la población a encuestar, Z representa el nivel de confianza, P representa la probabilidad de éxito y N el tamaño de la muestra.

Con el fin de obtener un nivel de confianza del 95% en los datos recaudados por la encuesta, un margen de error del 5% y un numero de puntuación $z=1.96$ se rempazan los valores en la Ec.(1) para determinar el tamaño de la muestra.

$$TM = \frac{\frac{(1.96)^2 * (0.5)(1 - 0.5)}{e^2}}{1 + \left(\frac{(1.96)^2 * (0.5)(1 - 0.5)}{e^2(340)}\right)}$$

⁴ Se realiza para conocer el contexto sobre un tema que es objeto de estudio.

⁵ Consiste fundamentalmente en establecer la comparación de variables entre grupos de estudio y de control.

De acuerdo a la formula anterior, se realizó una encuesta virtual, para un TM=181 personas, titulada: “más allá de un software”, para ratificar que el problema hallado es verídico, obteniendo los resultados, con un total de respuestas de 194, donde 69.1% de estas respuestas son del área de ingeniería, aproximadamente 134 personas, 13.4% del programa de arquitectura, 14.4% de la sección de diseño, participando con interés en la encuesta de otras carreras un 3.1% de la población el análisis de la encuesta será anexado para su revisión de ser necesario.

La realización de este proyecto se ha dividido en cinco capítulos donde se enseñan los aspectos más sobresalientes para el desarrollo del mismo.

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Elaborar un código para el dimensionamiento del circuito aerodinámico de un túnel de viento subsónico.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar los principales componentes y sus características de los túneles de viento subsónicos.
- Desarrollar el código mediante herramientas computacionales, para dimensionar el circuito aerodinámico de un túnel de viento.
- Simular en ANSYS el circuito aerodinámico de un túnel de viento.
- Socializar los resultados obtenidos mediante el documento de trabajo de grado.

El capítulo I, es una introducción de forma sutil, con ánimos de permitirle al lector un conocimiento general del Proyecto.

En el capítulo II, se expone toda la información teórica, para la comprensión de la importancia y alcances en referencias de estudio que puede brindar un sistema de túnel de viento, así como la evolución de nuevas tecnologías.

En el capítulo III, se presenta el diseño del sistema base de nuestro Proyecto, con la respectiva adaptación necesarias, para la utilización en los sistemas seleccionados, junto con diagramas generales que pueden evidenciar la forma de diseño, con la utilización de tres parámetros de entrada y unos valores de restricción determinados por la teoría.

El capítulo IV, permite la visualización detallada del aplicativo generado con lenguaje Python, visualizando su alcance y forma de ejecución y se explica de forma general: cómo se realizó el proceso de construcción de cada uno de los códigos que la componen.

En el capítulo V, se realizó las simulaciones, con el fin de analizar los sistemas generados por el aplicativo y ver el comportamiento de flujo determinando, si la velocidad de flujo corresponde con el parámetro inicial que solicita el aplicativo para generar las dimensiones del sistema, y la simulación de un perfil en el interior de un segmento del túnel permitiendo el análisis de la presión en la pieza.

Finalmente, se presentan conclusiones y recomendaciones, que sirven para que todos aquellos estudiantes y personas externas que requieran nuestro trabajo como fuente de consulta, puedan ejecutarlo de manera eficiente y sus resultados sean lo más aproximados a los valores reales.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

Uno de los primeros pasos para plantearse una solución a un problema, es saber sobre dicho asunto, por eso, el primer paso para la ejecución de esta tesis es la investigación, según Kurt Lewis (1890-1946, padre de la investigación-acción) el cual dice que la investigación es un proceso de originar nuevos conocimientos a partir de la recopilación, estudio, interpretación de un aprendizaje, análisis, ensayos, observación, etc.; siempre desde una comparación con un marco de referencia. En este caso y basándonos en lo anterior mencionado, en nuestro contexto podemos afirmar, que por la continua necesidad de espacios interactivos y de experimentación tanto físicos como digitales en ingeniería mecánica, hizo esencial la construcción de un código computacional didáctico de usar y ejecutar en cualquier computador, mediante el cual se visualiza el dimensionamiento a escala real del sistema (túnel de viento) y de sus componentes, así como detalles puntuales del mismo, datos que posteriormente pueden ser utilizados para un modelamiento en un software más familiarizado con simulaciones de tipo CFD⁶ como lo puede ser SOLIDWORKS o ANSYS y utilizando este análisis, poder validar de forma correcta su aplicación permitiendo una proyección de valorización en caso de construcción; evitando pérdidas monetarias, de materia prima, y tiempo, proyectando un área de uso necesario sobre la que se debería situar el proyecto en caso de una construcción en físico, la cual facilitaría realizar pruebas institucionales de diferentes proyectos de aula y de investigación que adelanta nuestra alma mater.

⁶ La Dinámica de Fluidos Computacional o CFD, es el área de conocimiento que trata sobre la simulación numérica de flujos fluidos, transferencia de calor y fenómenos relacionados tales como reacciones químicas, combustión, Aero acústica etc

Las pruebas de CFD junto con los experimento- físicos nos permiten compara los resultados, en el primero nos permite visualizar el fluido mediante algunas aproximaciones computacionales; ya con el experimento y algunas aproximaciones nos permite tener un conocimiento mejor del fenómeno físico estudiado y minimizar el error al combinar experimento numérico con el físico.

2.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS FLUIDOS

Una sustancia en fase líquida o gaseosa se conoce como fluido. la diferencia entre un sólido y un fluido se hace con base en la capacidad de la sustancia para oponer resistencia a un esfuerzo cortante (o tangencial) aplicado que tiende a cambiar su forma. La característica más notoria de un fluido es su deformación de manera continua bajo la influencia de un esfuerzo cortante sin importar lo pequeño que sea. Mientras en los sólidos el esfuerzo es proporcional a la deformación, en los fluidos el esfuerzo es proporcional a la razón de deformación. La velocidad del fluido disminuye con la profundidad debido a la fricción entre las capas del mismo, llegando a cero en la placa inferior recordar que el esfuerzo se define por unidad de área y se determina cuando se divide la fuerza entre el área sobre la cual actúa (CENGEL 2006)

2.1.1 Flujo laminar

Se denomina como flujo laminar, al tipo de movimiento que describe un fluido cuando este es ordenado o está en armonía, es decir, se mueve en forma de láminas paralelas sin entremezclarse, este fluido también es considerado como un fluido aerodinámico, eso significa que cada partícula que compone el fluido sigue una trayectoria suave, llamada línea de corriente. Este tipo de flujo es apreciable en fluidos con bajas velocidades o viscosidades altas, también cuando se cumple que el número de Reynolds es inferior a 2100. El perfil de velocidad de este tipo de flujo tiene forma de parábola, donde la velocidad máxima se ubica en el eje del ducto y en sus paredes o extremos esta es igual a cero.(PINEDAMAIGUA 2010)

2.1.2 Flujo turbulento

Se denomina como flujo turbulento, al movimiento de un fluido que se da en forma caótica, es decir, las partículas se desplazan de forma errática, generando habitualmente vórtices en el fluido imposibilitando predecir el comportamiento de una partícula en lapsos de tiempos prolongados, este tipo de flujo suelen tener número de Reynolds grandes, valores mayores a 4000 son considerados como flujos turbulentos, este tipo de flujo es más comúnmente desarrollado debido a que la naturaleza tiene tendencia al desorden y en términos de fluidos esto significa turbulencia.

La turbulencia se puede originar, ya sea por presencia de paredes en contacto con el fluido o por la diferencia de velocidades entre capas del fluido, estos flujos se pueden desarrollar tanto en conductos lisos como rugosos. (PINEDAMAIGUA 2010)

En la Imagen 1, se representa el comportamiento del flujo laminar y turbulento denotando lo anterior mencionado pues el flujo laminar se visualiza de una manera ordenada mientras los vectores en el flujo turbulento no siguen una trayectoria fija.

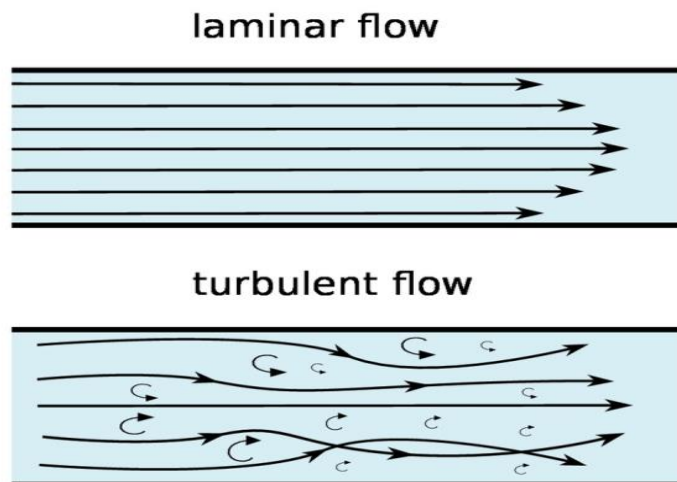


Imagen 1. Representación de flujo laminar y flujo turbulento.

2.2 CAPA LÍMITE

Ludwig Prandtl (1904), demostró que cuando un cuerpo está sumergido en un fluido, se obtienen dos regiones de flujo principalmente:

- a) Capa límite, consiste en una capa o película muy delgada adyacente a la superficie del cuerpo que está en contacto con el fluido, en esta capa la viscosidad tiene un papel preponderante **Imagen 2**.
- b) El fluido que está por fuera de la capa límite, donde los efectos de la viscosidad suelen ser menos relevantes.

Existen otros tipos de flujos cerca del final del cuerpo o borde de fuga, estos pueden causar una separación en la capa límite de la superficie del cuerpo generando vórtices, a causa de estos flujos se producen cambios en la distribución de presión originando arrastre de presión. La teoría de la capa límite define la geometría que deberían tener los cuerpos para evitar la separación y generación de vórtices , Osborne Reynolds (1914) demostró que el mecanismo de separación de la capa límite y el arrastre de los cuerpos están relacionados con los regímenes de flujo.(ZEVALLOS 2008)

2.2.1 Capa límite laminar

Zona delgada en contacto con el sólido, en donde los efectos de inercia y viscosos tienen incidencia sobre el comportamiento del flujo, el cual posee una velocidad de corriente libre aguas arriba del borde de ataque, existe una distribución de velocidad constante y paralela a la placa, el flujo de aguas abajo del borde de ataque, cambia al formarse una capa delgada sobre la placa, en esta capa se observa una desaceleración de flujo desde su velocidad de corriente libre hasta una velocidad cero en la superficie de la placa, esto sucede debido a la fricción; sobre esta capa delgada de flujo se forman otras capas, cada una de las cuales tiene menos fricción que la anterior, es decir, mayor velocidad; esto sucede hasta una pequeña capa, donde no afecta la fricción, permitiendo un flujo libre. Al conjunto de estas capas de velocidad variable se le denomina capa límite y la distancia generada por dichas capas se le denomina espesor de capa límite.(PINEDAMAIGUA 2010) ,(Rivera 2017)

La Imagen 2 representa la capa límite, mostrando variables fundamentales como: espesor de capa límite, el comienzo del flujo libre y el inicio del borde de ataque.

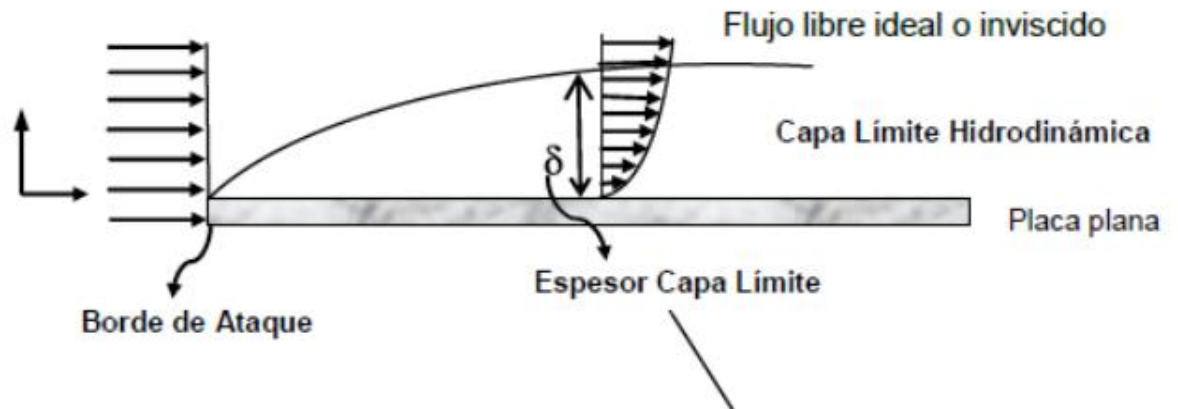


Imagen 2. capa limite

El perfil de velocidad variable es creado gracias a la fricción viscosa que trata de detener el movimiento de flujo, este fenómeno explica el mecanismo por el cual son generadas las pérdidas por fricción viscosa sobre la placa y la generación de los esfuerzos cortantes transmitidos desde la placa al resto del fluido. (ZEVALLOS 2008)

En palabras más generales, la capa límite es la distancia medida desde el cuerpo sólido hasta donde la velocidad difiere en un 1% de la velocidad de flujo libre; el espesor de esta capa en flujo laminar, (Rivera 2017)

Si se considera la capa límite en una placa plana horizontal, esta estará determinada por la Ec.(2) denominada Espesor flujo laminar representada por δ

$$\delta = 4.64 \sqrt{\frac{\nu L}{V}} \quad (2)$$

Donde L [m] es la longitud característica medida como la distancia medida desde el borde de ataque del fluido. De la Ec.(2) se deduce que entre mayor sea el número de Reynolds, la capa límite laminar será más delgada y esta relación es inversamente proporcional al esfuerzo cortante.

2.2.2 Capa límite turbulenta

Después de haberse desarrollado la capa límite laminar a cierta distancia, aguas abajo, comienzan a presentarse desestabilización al flujo laminar anteriormente constituido a este fenómeno de desestabilización del flujo se le denomina transición de capa límite y ocurre en una distancia crítica denominada (L_{CR}) o Reynolds crítico (Re_{CR}) el punto de transición es dependiente del número de Reynolds esta transición sucede en un rango.

Este rango es. $Re_L = 3 \times 10^5$ y $Re_L = 10^6$ Sucedida esta transición, las moléculas del fluido comienzan a desordenarse, provocando un crecimiento en el espesor de la capa límite a esta se le denomina capa límite turbulenta, este espesor de la capa de límite turbulento viene dado por la siguiente Ec.(3) en esta.(ZEVALLOS 2008)

$$\delta = \frac{0.376L}{Re^{0.2}} \quad (3)$$

En este tipo de capa los mecanismos de flujo se propagan mucho más rápido por mezclas intensivas de pequeñas masas de aire entre zonas donde se desarrolla la capa límite y la zona del fluido, las características y parámetros no pueden ser determinadas por medio de la viscosidad, como en la capa límite, debido a los mecanismos de mezcla continua, pues estos provocan características diferentes, por esto se utiliza el método de viscosidad aparente. la capa límite turbulenta tiene una estructura de doble capa, esto sucede, ya que entre la superficie de la placa plana y la capa límite turbulenta existe una delgada capa laminar denominada sub-capa límite laminar como se muestra en la Imagen 3. (ZEVALLOS 2008)

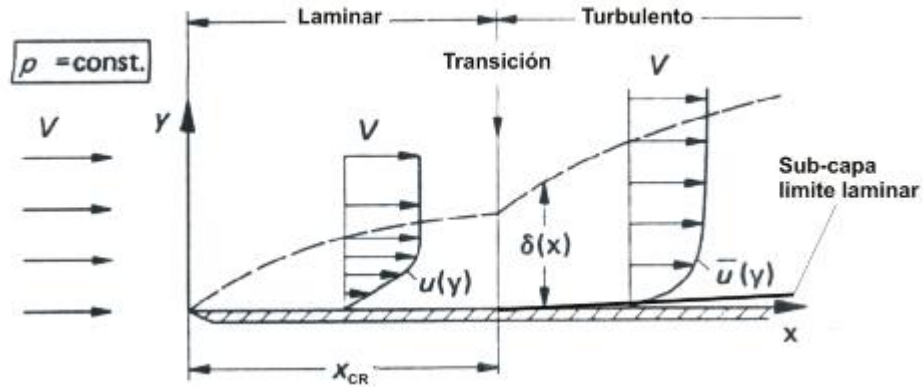


Imagen 3. Capa limite y capa limite turbulenta

2.2.3 El número de Reynolds

Este es un número adimensional, comúnmente utilizado para estudiar la similitud dinámica de los flujos sobre un cuerpo y sus modelos a escala. El número de Reynolds, nos permite sintetizar la similitud dinámica de flujo, en esta se debe cumplir la ley física fundamental que compara las fuerzas inerciales y las fuerzas de fricción del flujo (ZEVALLOS 2008).

La expresión de la ecuación de Reynolds para un fluido que circula por el interior de una tubería circular recta se representa por la Ec.2

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas fricciopn}} = \frac{\rho V^2 / d}{\mu V / d^2} = \frac{\rho V d}{\mu} = \frac{V d}{\nu} \quad (4)$$

Donde Re representa el número de Reynolds, ρ [kg/m^3] representa la densidad del fluido, V [m/s] es la velocidad característica del fluido, d [m] es el diámetro de la tubería, μ [pa^*s] es la viscosidad dinámica del fluido, ν representa la viscosidad cinemática finalmente el diámetro, d , es reemplazado por D_h

$$Re = \frac{V D_h}{\nu} \quad (5)$$

Para un fluido que circula por el interior de una tubería cuya sección recta no es circular la expresión de Reynolds tiene en cuenta el diámetro hidráulico como se observa en la Ec.3

La similitud mecánica se considera valida, cuando el número de Reynolds es similar en puntos semejantes del modelo a escala con el cuerpo real o prototipo, esta relación fue planteada por Osborne Reynolds (1883), y se denominó el principio de similitudes.

El principio de similitud, tiene su importancia cuando se desea conocer las fuerzas que se originan sobre el objeto de prueba, estas fuerzas se originan por la distribución de presión y el esfuerzo cortante del flujo que actúa sobre el objeto de prueba. el componente de la fuerza paralelo al flujo principal que trata de impedir el movimiento del objeto de prueba, se denomina fuerza de arrastre y la componente perpendicular a esta fuerza se le denomina fuerza de sustentación, estas dos últimas fuerzas son directamente proporcionales a sus coeficientes adimensionales denominados coeficiente de arrastre (C_a) y coeficiente de sustentación (C_s) estos coeficientes son dependientes del número de Reynolds y su expresión es visualizada en la Ec. (6). (ZEVALLOS 2008)

$$C_{A=f_1}(Re); \quad C_{S=f_2}(Re) \quad (6)$$

2.3 COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN Y ARRASTRE

2.3.1 COEFICIENTE DE ARRASTRE

Se denomina fuerza de arrastre, a la resistencia que se opone al movimiento de un cuerpo; la aplicación más familiar en la que se requiere este estudio es en la industria de transporte este fenómeno frecuentemente es nombrado como la resistencia al viento, en este tipo de industria este coeficiente está definido por la siguiente Ec.(7) (PINEDAMAIGUA 2010):

$$F_A = C_A \left(\frac{\rho V^2}{2} \right) A \quad (7)$$

Donde F_A representa el coeficiente de arrastre y $A [m^2]$ representa el área de la superficie.

La sustentación es una fuerza ocasionada por el fluido en dirección perpendicular a la dirección del movimiento del cuerpo, su aplicación más importante en la industria es para la construcción de aeronaves denominadas aeroplanos, la geometría de esta es tal que produce una fuerza de sustentación cuando el fluido pasa sobre y bajo su superficie. (PINEDAMAIGUA 2010).

2.3.2 Coeficiente de sustentación

También denominada fuerza de empuje, la magnitud de esta fuerza es dependiente de la condiciones y comportamiento del flujo alrededor del cuerpo por lo tanto también es importante la geometría del cuerpo y el posicionamiento relativo del mismo con respecto a la fuerza de contacto. la Ec.(8) se representa su expresión algebraica y la Imagen 4 muestra el comportamiento del flujo alrededor de 3 diferentes cuerpos (FLUIDOS 2007)

$$F_s = C_s \left(\frac{\rho v^2}{2} \right) A \quad (8)$$

Donde en la Ec.(8). F_s representará la fuerza de sustentación y $C_s [N]$ es el coeficiente de sustentación

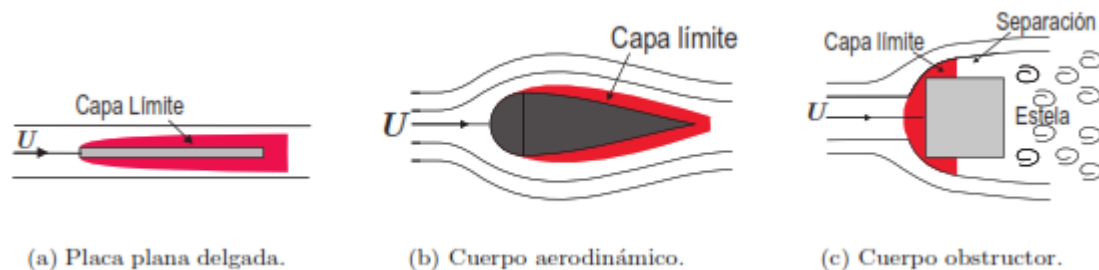


Imagen 4. Flujo alrededor de diferentes cuerpos

Este fenómeno es mejor apreciable en la Imagen 5, donde se observa la oposición al avance en el eje x representado por la fuerza de resistencia inducida y en el eje y, se visualiza la fuerza de sustentación tendiendo a elevar el objeto de prueba.

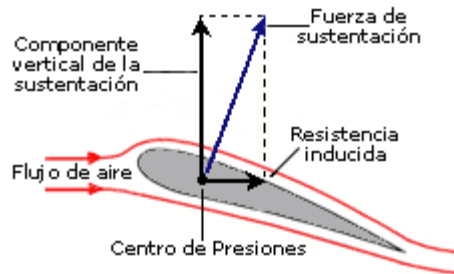


Imagen 5 Resistencia inducida.

2.4 ECUACIÓN DE BERNOULLI

Esta ecuación asume que el flujo del fluido es incompresible, no viscoso, además, afirma que la energía de un sistema de fluidos se conserva a lo largo del flujo, existen tres tipos de energía que están presente sobre un fluido como lo son: la energía cinética, energía potencial, energía de flujo. Si se asume dos puntos a lo largo de una trayectoria de flujo, las magnitudes de energía de un punto pueden variar con respecto al otro, pero la sumatoria de la energía siempre será la misma. Para su cálculo se utiliza la Ec.(9) (ZEVALLOS 2008).

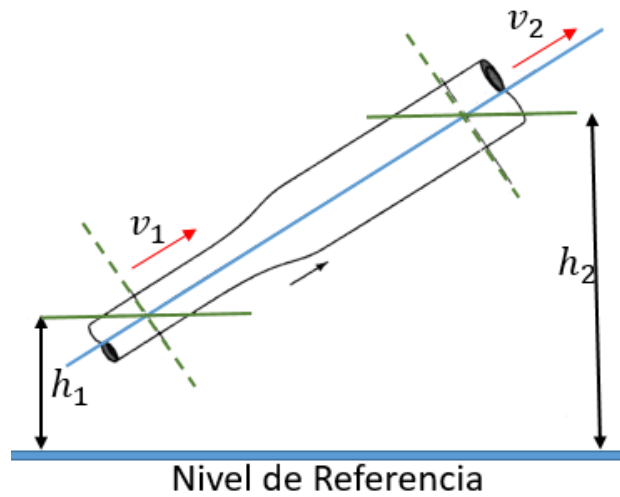


Imagen 6 Tubo de Bernoulli.

$$\frac{P_1}{\gamma} + h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (9)$$

Donde P_1 [Pa] representará la presión estática a la que está sometido el fluido en el punto 1, P_2 [Pa] representará la presión estática a la que está sometido el fluido en el punto 2, γ [N/m^3] representa el peso específico del fluido, h_1 [m] representa la altura sobre el nivel de referencia 1, h_2 [m] representa la altura sobre el nivel de referencia 2 y g [$9.81\text{m}/\text{s}^2$] el valor de la aceleración de la gravedad.

2.4.1 Ecuación de continuidad

Este es un caso particular del principio de conservación de la masa y se basa principalmente en que el caudal (Q) [m^3/s] a de permanecer constante a lo largo de toda la trayectoria, este valor es el resultado del producto de la superficie de una sección del conducto por la velocidad del fluido en este mismo punto, si escogemos dos puntos de una misma tubería debería cumplirse el siguiente postulado Ec.(10) (CENGEL 2006)

$$Q_1 = Q_2 \quad \text{o} \quad S_1 * V_1 = S_2 * V_2 \quad (10)$$

Donde $S_1 [m^2]$ representará la superficie de la sección transversal en el punto 1 y $S_2 [m^2]$ representará la Superficie de la sección transversal en el punto 2, en la Imagen 7. Se visualiza lo postulado propuesto en la teoría por la ecuación.

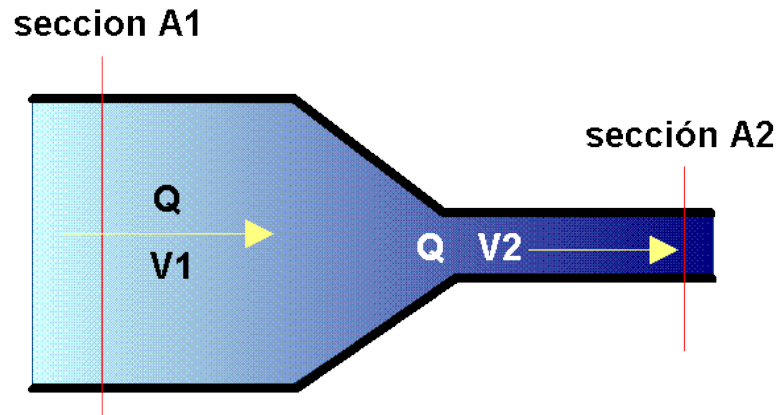


Imagen 7 Fenómeno de continuidad.

De la ecuación anterior, se despeja la velocidad o el área según la necesidad del usuario recordando que la sección transversal del objeto sería igual al área o su base por la altura. Si se desea conocer la velocidad en un punto y se tienen los demás datos como las áreas y la velocidad en un punto distante del mismo sistema se puede determinar por medio de la Ec.(11):

$$V_2 = V_1 * \frac{A_1}{A_2} \quad (11)$$

2.5 TÚNEL DE VIENTO Y SU CLASIFICACIÓN GENERAL

En 1871 el británico Frank Wenham (1824-1908), construyó el considerado y propiamente dicho, primer túnel de viento ante la sociedad aeronáutica de Gran Bretaña que básicamente estaba constituido por un cilindro horizontal en el que circulaba aire que era impulsado por una turbina a vapor.

A partir de esto en las primeras décadas del siglo XIX, todos los esfuerzos se centraron en construir túneles más grandes y potentes, ya que aparecieron nuevas innovaciones como el avión y los autos o mejorar las armas todo esto cada vez más grandes...más potentes.

Es difícil predecir o acertar quién fue el creador exacto del primer túnel viento, la gran mayoría de ellos eran sólo horizontales, pero se podría afirmar que el primer túnel vertical haya sido construido por la NASA en Virginia; este túnel mide aproximadamente unos seis metros de alto y su velocidad máxima de menos de 100km/h (HURRICANE FACTORY, 2017).

Esta herramienta ha tenido una evolución importante con experimentadores especializados, los cuales realizaron contribuciones esenciales como, por ejemplo, la máquina de humo construida por Étienne-Jules Marey (Francia, 1899), que permitió la realización de las primeras visualizaciones de flujos de fluido (Chanetz 2017, 583) (Chanetz 2017, 583) (Chanetz 2017, 583). Posterior a este análisis, se comenzó a incluir el término de calidad de flujo el cual tuvo como pioneros a “Nikolai Zhukovsky (Rusia, 1902), Thomas Stanton (Gran Bretaña, 1903), Dimitri Riabouchinsky (Rusia, 1905), Gustave Eiffel (Francia, 1909). Túneles de viento de succión...Tiempo después llegó la inclusión del difusor dentro del sistema del túnel de viento” este dispositivo proviene de la ley de Bernoulli, que establece que la presión y la velocidad varían inversamente. De hecho, al reducir la velocidad, el difusor aumenta la presión del aire que sale de la sección de prueba.

2.5.1 CLASIFICACIÓN GENERAL

Los túneles de viento se clasifican por 3 aspectos: por la circulación del fluido en su interior, por la velocidad del flujo en su interior y por la dirección del flujo, estas tres relaciones desglosan varios ítems, como los son túneles abiertos, túneles cerrados, túneles subsónicos, túneles transónicos, túnel horizontal, entre otros (DIAZ, 2005).

La Tabla 1. Muestra las escalas de velocidad más comunes utilizadas para túneles de viento, las cuales se relacionan con el número de Mach, este número es adimensional y representa la relación de la velocidad del objeto entre la velocidad del sonido como lo muestra la Ec.(12) (CENGEL 2006).

$$M = \frac{V}{c} \quad (12)$$

Donde c se puede determinar mediante la Ec.(13)

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (13)$$

TIPO	
De baja velocidad	Mach<0.6
Subsónicos	0.6<Mach<0.85
Transónicos	0.85<Mach<1.2
Supersónicos	1.2<Mach<5
Hipersónicos	5<Mach

Tabla 1. rango de velocidades de operación

Donde c , representa la velocidad del sonido cuyo valor es de 346 m/s en el aire a temperatura ambiente al nivel del mar, γ la constante adiabática, R es constante del gas, T [K] temperatura del gas y M la masa molecular del gas; recordar que la Ec.(13), representa la velocidad del sonido es bueno recordar que en caso dado de ser menor de 0.3 el resultado de la Ec.(12) el fluido analizado se categorizaría como incompresible (CENGEL 2006).

Según Luis Iberri, alcanzando valores superiores a 0.85 Mach, las ondas de choque perturban considerablemente el flujo, volviéndose mucho más complicado el estudio aerodinámico en túneles de viento y la obtención de resultados considerables, en la Imagen 8 se visualiza parámetros esenciales del sistema que varían dependiendo de la velocidad de flujo.


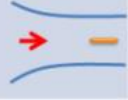


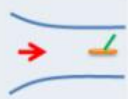
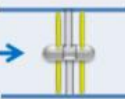


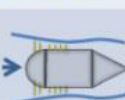



Régimen de Velocidad	Flujo Típico (Modelo)	Sección de Entrada	Radio de Compresión	Motor o sistemas de motor
Subsónico (M= 0 - 0.7)			1.0+	
Transónico (M= 0.7 - 1.2)			1.1	
Supersónico (M= 1.2 - 5)			2 (M = 2)	
Hipersónico (M > 5)			20 (M = 5)	

Imagen 8 Clasificación de túneles según la velocidad

2.5.2 De circuito abierto

Según Montes and Cardona⁷, un circuito abierto es donde el flujo de aire que circula por su interior describe una trayectoria recta, penetra en el circuito desde el exterior a través de la sección de entrada, que suele albergar la zona de acondicionamiento de flujo. Llega al cono de contracción donde pierde presión y gana velocidad, entrando posteriormente en la cámara de ensayo. A continuación, circula a través del difusor y la sección del propulsor, para regresar finalmente al exterior por medio de la sección de salida. Para una mejor visualización de lo escrito aquí, podemos observar la Imagen 9.

⁷ MONTES, SANDRA MILENA MEJÍA URQUIJO, and LINA JOHANNA CARDONA. 2016. “Automatización De Un Túnel De Viento Para Estudios De Comportamiento De Vuelo De Insectos

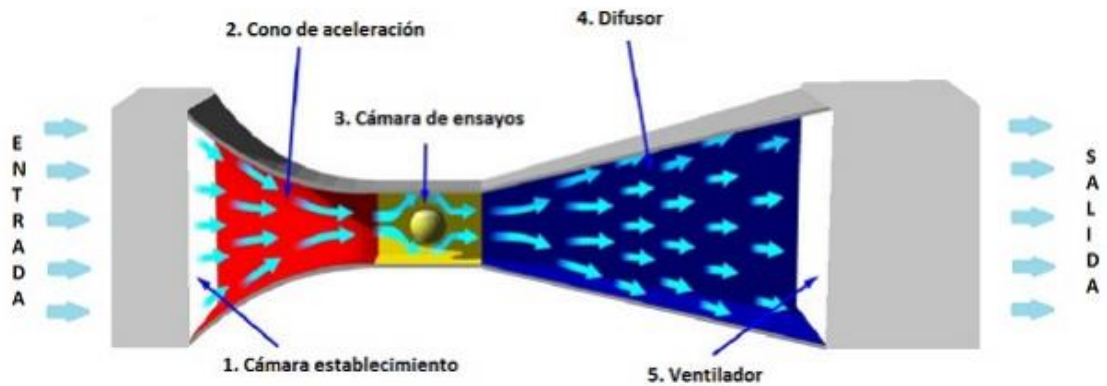


Imagen 9 Túnel de viento de circuito abierto

En este tipo de sistema se despliega un segundo aspecto esencial, como lo es la dirección de flujo, pues dependiendo la posición y tipo de ventilador, se puede definir el sistema como uno de succión o en su defecto soplador.

2.5.3 De circuito cerrado

En el circuito cerrado, el flujo describe en su movimiento una trayectoria cerrada por el interior del túnel, circulando de forma continua por el circuito de retorno, con poco o ningún contacto con el exterior. Para minimizar pérdidas es necesario controlar muy bien las direcciones del viento. Para una mejor visualización de mismo podemos observar la siguiente imagen.

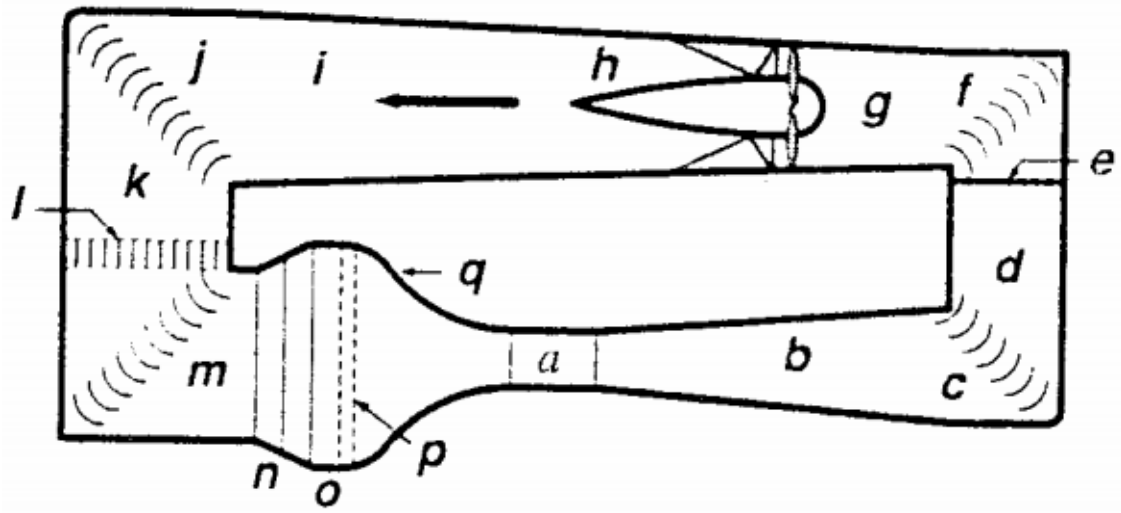


Imagen 10 Túnel de viento de circuito cerrado

2.5.4 Configuración de la capara de ensayos

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

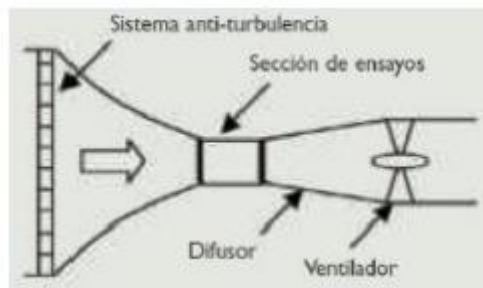


Imagen 11 Circuito abierto con cámara de ensayos cerrado

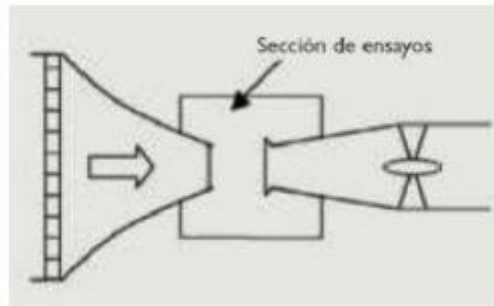


Imagen 12 Circuito abierto con sección de ensayos abierta

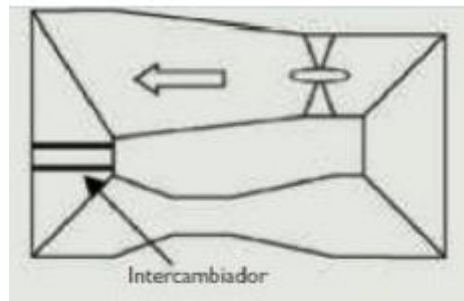


Imagen 13 Circuito cerrado con sección de ensayos cerrada

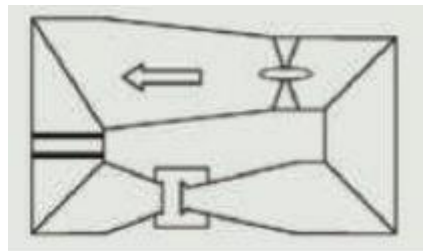


Imagen 14 Circuito cerrado con sección de ensayos abierta

2.6 SOFTWARE

2.6.1 Python

Python, es un lenguaje de programación robusto y sin complicaciones que ofrece el poder y la complejidad de los lenguajes compilados tradicionales junto con la facilidad de uso (y algo más) de secuencias de comandos más simples e idiomas interpretados, en este lenguaje se construyó y ejecutó el código de este proyecto, este software, es libre con un sin números de alcances siendo un sistema apropiado para la ejecución de lo deseado(Core Python Programming - Wesley Chun - Google Libros n.d.).

2.6.2 SOLIDWORKS

SolidWorks, proporciona soluciones totales a problemas geotécnicos-estructurales relacionados con el diseño práctico de túneles, taludes, taludes de roca con análisis estéreo-gráfico, suelo blando, cimientos, excavaciones, infiltración y análisis dinámico. El entorno de trabajo fácil de usar y práctico permite a los ingenieros geotécnicos y estructurales producir resultados altamente confiables junto con un diseño racional y resultados de alta calidad. A diferencia del software existente comúnmente disponible, SolidWorks proporciona el concepto innovador de modelado, análisis, compilación y presentación de resultados y generación de informes utilizando la última tecnología en desarrollo de software para los ingenieros en ejercicio. Los ingenieros se beneficiarán de poder analizar varios casos simultáneamente, verificar errores de diseño y escapar de tareas repetitivas en el proceso de diseño (Soilworks | Geotechnical Solutions for Practical Design n.d.).

2.6.3 ANSYS

Ansys, es un ecosistema de programas CAE para diseño, análisis y simulación de partes por elementos finitos FEA, incluye las fases de preparación de meshing ó malleo , ejecución y post proceso, el programa ejecuta análisis de piezas sometidas a fenómenos físicos usadas en ingeniería y diseño mecánico , puede resolver problemas físicos sometidos a esfuerzos térmicos, fluidos, vibración y aplicaciones específicas. Las aplicaciones ANSYS CFX, Fluent, Icepak, Polyflow, usadas para problemas de fluidos, tiene herramientas de modelado, malleo y simulación en una interface moderna que da cabida a una amplia gama de resolución de problemas. ANSYS CFX se integra con la plataforma Ansys Workbench de forma bidireccional para compartir información de modelado y mallas. Por ejemplo, un escenario de flujo puede ser usado como fronteras en un problema de diseño estructural. Fluent, un programa CFD o de análisis de fluidos para una gama de aplicaciones en el modelado y simulación de flujos que incluye turbulencia , reacciones o efectos térmicos (ANSYS plataforma de solucion CAE n.d.).

2.6.4 CFD

Es el análisis del sistema que puede implicar flujo transferencia de calor y fenómenos asociados. esta técnica tiene una gran gama de campos de aplicación el objetivo es

proporcionar una visualización del comportamiento y fenómeno producto de un flujo, con esta herramienta se desea visualizar el comportamiento del flujo a lo largo de nuestro sistema (Jos and Guzm 2013).

CAPÍTULO III

3. DISEÑO DEL TÚNEL DE VIENTO

El diseño de un código que nos permita el dimensionamiento de un túnel de viento de baja velocidad, es un proyecto de investigación ejecutado en el programa de ingeniería mecánica de la universidad de pamplona. El diseño del túnel de viento es complejo debido a las variadas características que lo conforman tanto del área de ingeniería mecánica como de fluidos, aunque la teoría nos brinda pautas de mejoras de diseño y construcción (BRADSHAW; PANKHURST, 1964; ECKERT; NIORT; JOPE, 1976; MEHTA; BRADSHAW, 1979; BARLOW; RAE; PAPA, 1999; CATTAFESTA; BAHR; MATHEW, 2010). El diseño de las diferentes secciones que componen el túnel de viento se realizaron en base a los resultados y análisis de las investigaciones anteriores o en su defecto con las especificaciones dadas por el documento guía (Miguel Angel Gonzalez et al. 2013).

Esta sección del documento, describe de forma general el diseño de un túnel de viento, este diseño está condicionado por ciertas variables, como lo son tamaño total de la instalación, el presupuesto del fabricante, los costos operativos y de mantenimiento, la calidad de flujo, el caudal, la caída de presión y el ruido de fondo; estos son factores cruciales para el diseño.

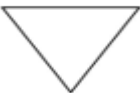



La calidad del flujo facilita la medición de datos aerodinámicos, por lo tanto la uniformidad de flujo al igual que la turbulencia deben ser valores bajos, la potencia del ventilado debe ser tal que compense las pérdidas de presión y proporcione el caudal necesario (SERRANO n.d.).

Para el diseño del túnel de viento, se generó un diagrama de flujo en base al propuesto por Cattafesta Bahr; Mathew 2010, dicho diagrama se visualiza en la Imagen 15, los requisitos de restricción para el diseño son : velocidad en la sección de prueba $V_{scprueba}$, relación de

contracción n , altura o ancho de sección de prueba w \ddot{O} h , dispositivos para el control de flujo (paletas de esquinas, panal y pantallas).

La literatura nos muestra variados tipos y tamaños de túneles de viento actualmente en funcionamiento, cada uno con características singulares ventajas y desventajas únicas. El túnel de viento escogido para el diseño como elemento base de diseño. es un sistema de circuito cerrado de recirculación y de baja velocidad, con criterios generales de diseño como sección de prueba o cámara de prueba cerrada con una sección transversal cuadrada una calidad de flujo baja en la cámara de pruebas (baja turbulencia) y una relación de contracción mayor de 6 definida por el usuario.

Tabla 2.Figuras de diagrama de flujo

FIGURA	SIGNIFICADO
	Indica un paso en el que se combinarán diversos conjuntos en uno solo.
	Un proceso ya definido previamente
	Indica variable de entrada o salida según su necesidad
	Representa cualquier tipo de dato en el diagrama de flujo.

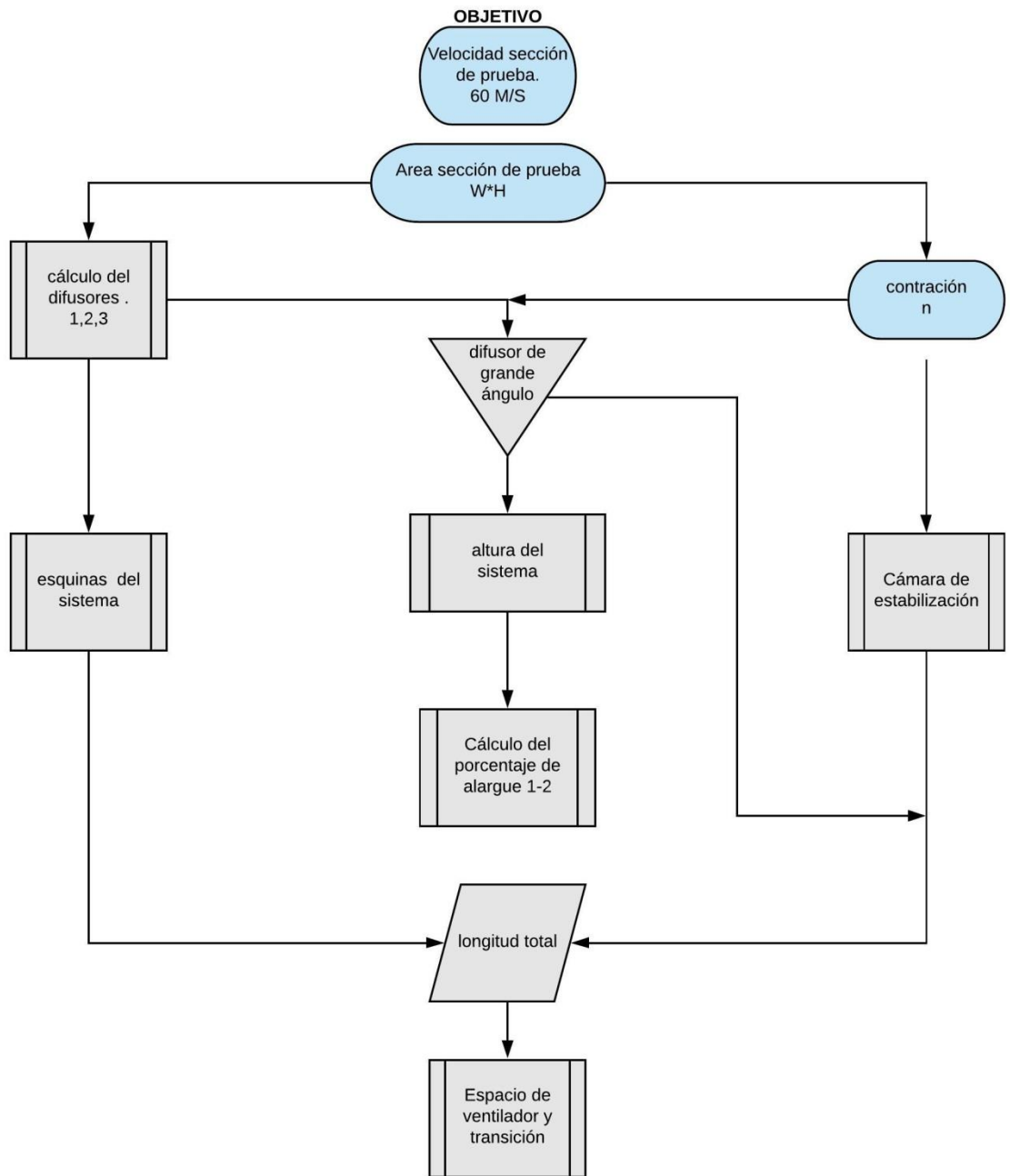


Imagen 15. Diagrama de flujo de túnel de viento

Una descripción de la trayectoria de flujo se plantearía de la siguiente forma comenzando en la sección de prueba y realizando el recorrido en dirección de las manecillas del reloj a través del circuito del túnel de viento, Imagen 16 .

La sección de pruebas o cámara de pruebas es seguida por el difusor uno, su diseño y uso es con el fin de proporcionar recuperación de presión, este elemento está conectado al difusor dos por una sección de área constante que afecta a la esquina uno y dos y el denominado alargue izquierdo, el difusor dos a su vez está sujeto a una transición trasversal de cuadrada a circular que permite un flujo constante entre el difusor y el ventilador, siendo este último elemento nombrado el único componente de sección transversal circular del sistema, se utiliza otra sección de transición, que permita conectar el ventilador con el difusor tres, el flujo saliente de esta sección entra a la esquina tres y cuatro las cuales tienen un área de sección transversal constante junto con el alargue derecho. Al salir el flujo de la esquina cuatro encuentra un difusor de grande Ángulo el cual aloja una pantalla, posterior a esto ingresa a la cámara de estabilización, la cual aloja elementos estabilizadores de flujo como lo son el panel y las telas o pantallas, finalmente el flujo llega a la contracción, la cual es dependiente de la relación entre el área de la cámara de pruebas y el área de la contracción denominada relación de contracción, este elemento que aprovecha este flujo laminar y lo acelera para que llegue nuevamente a la sección de prueba de la forma más laminar posible siendo uno de los elementos críticos a la hora del diseño; finalmente, el flujo termina el circuito en la sección de prueba. Los valores utilizados en el trabajo como criterio de diseño, son los elementos de color diferente e ingresados en una variable de inicio dentro del diagrama de flujo Imagen 15, bajo estos tres parámetros esenciales y con restricciones proporcionadas por la teoría se realizó el dimensionamiento total del sistema calculando a su vez el factor de pérdida en cada uno de los componentes.

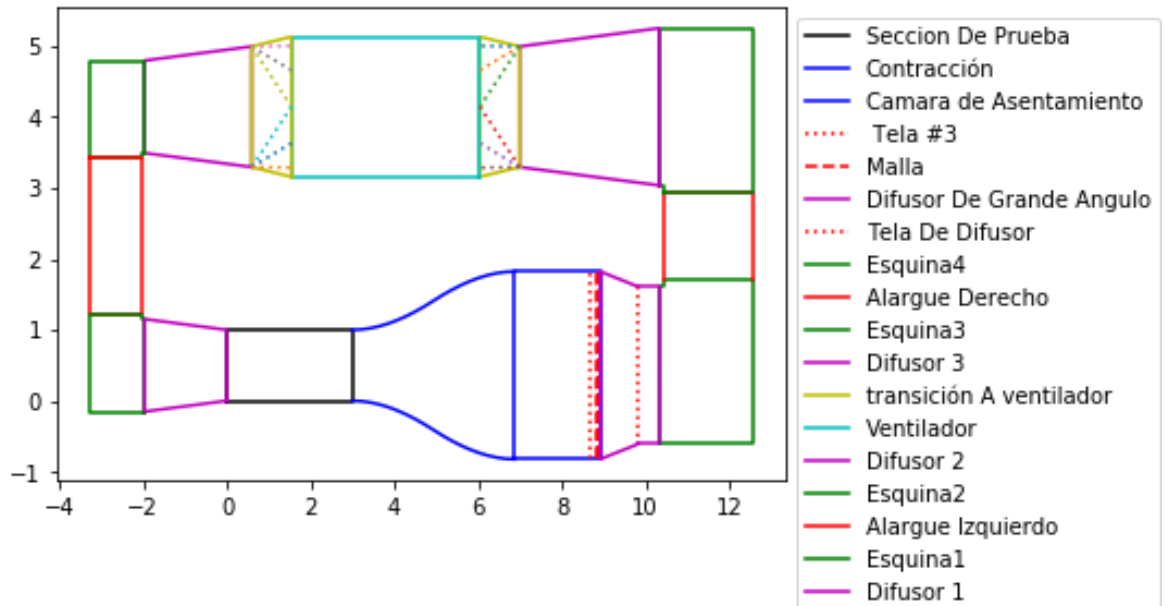


Imagen 16. Túnel de viento de circuito cerrado

3.1.1 Cámara de pruebas

El tamaño de la cámara de pruebas es definido de acuerdo a las especificaciones principales del sistema, que incluyen la velocidad de funcionamiento y la calidad de flujo, con el fin de conocer el tamaño máximo del objeto, este debe ser el 10 % del área de la sección transversal de la cámara de pruebas, para evitar correcciones de bloqueo no lineales, la forma de la sección transversal es dependiente del tipo de aplicación pues si se trata de aplicaciones civiles o industriales en el mayor de los casos se recomienda una sección transversal cuadrada, sin embargo, si su aplicación en la aeronáutica es más recomendable una sección rectangular. Para el cálculo de su longitud en este caso se decidió por la Ec.(14) (Miguel Angel Gonzalez et al. 2013).

$$L = 3 * D_h \quad (14)$$

Donde D_h representa el diámetro hidráulico y este se calcula con la Ec.(15) donde w es el ancho de la sección transversal y h su altura.

$$D_h = \frac{2 * w * h}{w + h} \quad (15)$$

Para el cálculo de pérdida de presión en este segmento del sistema, es considerado como una sección de conducto constante con acabados de superficie estándar, sin embargo, en algunos casos las paredes de la cámara pueden ser ligeramente divergentes con el fin de compensar el crecimiento de capa límite, esta pequeña modificación puede evitar errores de corrección, es decir, las pérdidas en esta sección son las que pueden existir por fricción , el cálculo del coeficiente de pérdida de presión esta dado por la Ec.(16).

$$K_{TS} = f_{TS} \frac{L_{TS}}{D_{TS}} \quad (16)$$

Donde f_{TS} representa el factor de fricción, L_{TS} el valor de la longitud y D_{TS} el diametro hidráulico y el valor f_{TS} está definido por la Ec.(17) , siendo ε el valor de la rugosidad, la Imagen 17 nos muestra la cámara de pruebas.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 * \log_{10} \left[\frac{6.9}{Re} + \frac{(\varepsilon/D_h)^{1.11}}{3.7} \right] \quad (17)$$

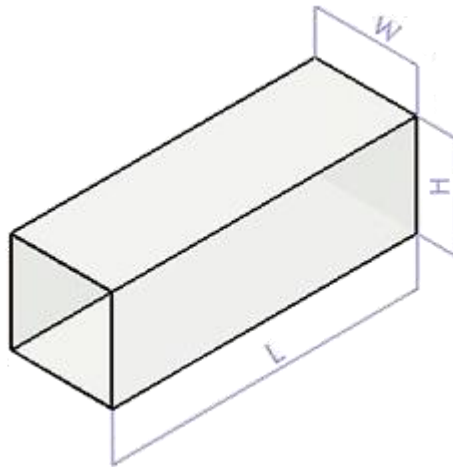


Imagen 17. Cámara de pruebas

3.1.2 Contracción

Este es considerado el elemento más crítico dentro del sistema, pues el que tiene mayor impacto en la calidad de flujo resultante en la cámara de pruebas, su objetivo es acelerar el flujo proveniente la cámara de sedimentación y dirigirlo hacia la cámara de pruebas, disminuyendo la no uniformidad, turbulencia y atenuaciones de aceleración de flujo. Estos valores son dependientes de la relación de contracción (Miguel Angel Gonzalez et al. 2013).

Una relación de contracción entre 4.0 y 6.0 puede ser suficiente, con un buen diseño de la forma, la turbulencia de flujo y los niveles de uniformidad pueden alcanzar un 2.0% que es aceptable para muchas aplicaciones dichos niveles disminuirán un 0.5% con la implementación de una tela o pantalla en la cámara de estabilización, la relación de contracción es un valor que influye fuertemente en las dimensiones globales de un túnel si se quisiera obtener una mejor calidad de flujo como es el caso de fines aeronáuticos donde la calidad de flujo debe ser menor del 0.1% se utilizan relaciones de contracción entre 8.0 y 9.0 (Miguel Angel Gonzalez et al. 2013).

Cuando se dan valores del orden de 12° a las variables α y β , véase la Imagen 18, la contracción tienen una longitud razonable y un buen comportamiento dinámico de flujo, con respecto a la forma del contorno siguiendo las recomendaciones de p. Bradshaw y R

meta (1979), se utilizan dos segmentos de curvas polinómicas de tercer grado como se ve en la Imagen 19 (Miguel Angel Gonzalez et al. 2013).

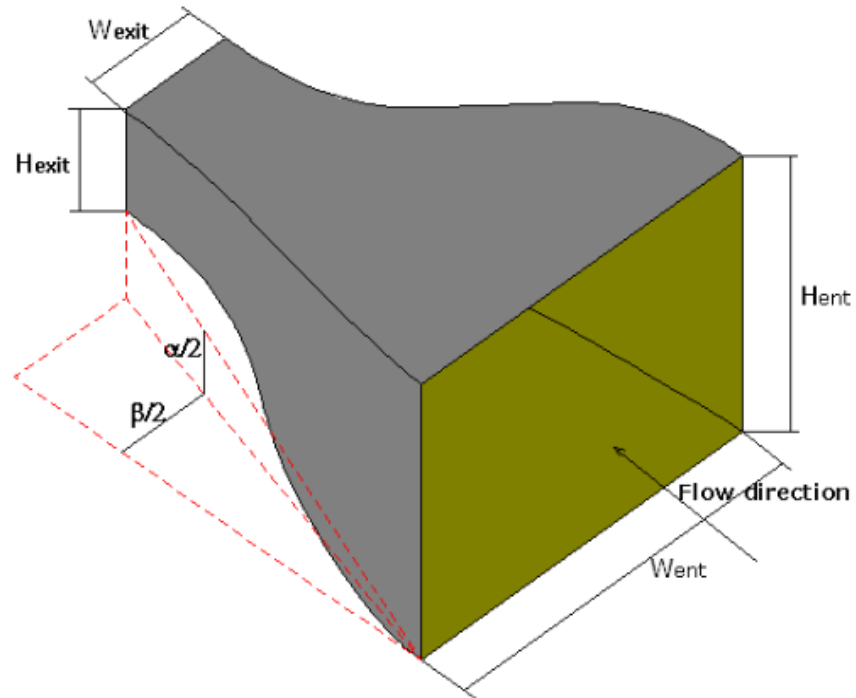


Imagen 18. Contracción

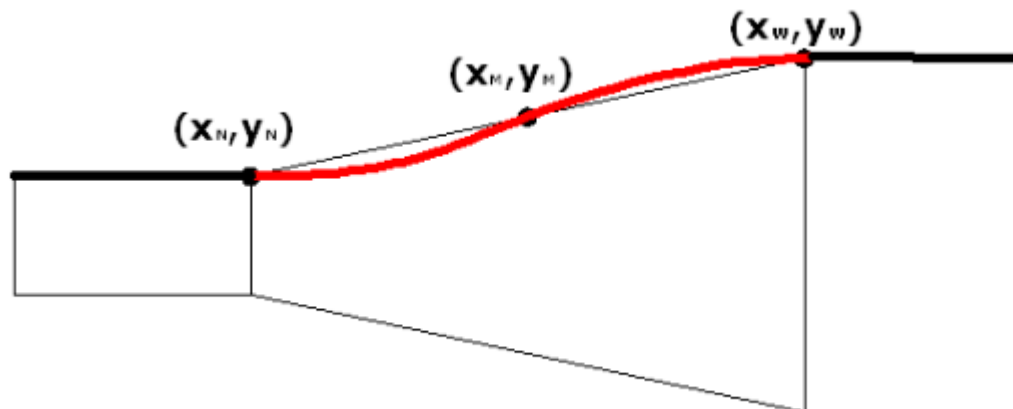


Imagen 19. Coordenadas de contracción

Como se indica en la Imagen 19, las condiciones requeridas para definir el polinomio que comienza en el extremo superior ancho son las coordenadas (x_w, y_w) el punto donde la línea cruza el estrecho de conexión generalmente es el 50% coordenadas (x_m, y_m) y en la parte inferior encontramos las últimas coordenadas (x_n, y_n) en consecuencia los polinomios son los de la ecuaciones (18),(19).

$$y_1 = a_w + b_w * x + c_w * x^2 + d_w * x^3 \quad (18)$$

$$y_2 = a_n + b_n * x + c_n * x^2 + d_n * x^3 \quad (19)$$

La condición de que el punto de conexión este en el 50% de las coordenadas se muestra en la Ec.(20).

$$[(x_m, y_m) = ((x_w, x_n) + (y_w, y_n))] \quad (20)$$

El coeficiente de pérdida para la contracción está dado por la Ec.(21), donde f_{CT} es el factor de fricción de la contracción, L_{CT} su longitud y D_{CT} el diametro hidráulico.

$$K_{CT} = 0.32 f_{CT} \frac{L_{CT}}{D_{CT}} \quad (21)$$

3.1.3 Cámara de sedimentación

Es un elemento que alberga ciertos dispositivos los cuales facilitan una mejor calidad de flujo como lo son las telas o pantallas y colmenas o panales, estos dispositivos pueden ser instalados con el fin de aumentar la uniformidad del flujo o reducir el nivel de turbulencia, en la entrada de la contracción mediante una pérdida relativa de presión, sin embargo, tal pérdida de presión solo será una pequeña parte de la general (Miguel Angel Gonzalez et al. 2013).

Para el caso de la colmena el tamaño de la longitud oscila alrededor de 20 veces el tamaño de la celda y se ubica con una separación de 10 veces el tamaño de la celda, en la entrada del flujo proveniente del difusor de grande Angulo, en la Imagen 20 se visualiza la colmena y la perdida producida por esta sección se visualiza en la Ec.(22) (SERRANO n.d.).

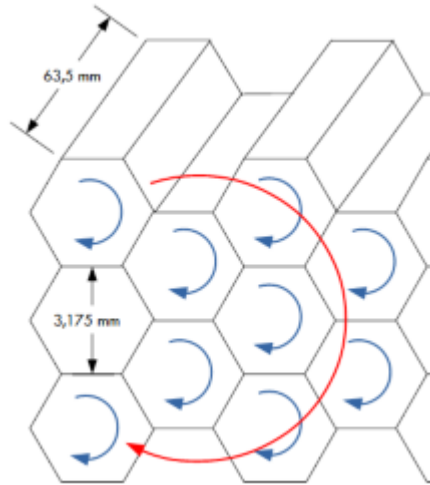


Imagen 20. Colmena o panel

$$K_{HC} = 0.2 \frac{D_{TS}}{D_{SC}} \quad (22)$$

Donde D_{SC} el diámetro hidráulico en la cámara de estabilización.

Las pantallas, son elementos esenciales a la hora de reducir turbulencias longitudinales, sin embargo, si se utilizan entre dos y tres pantallas pueden atenuar niveles de turbulencia hasta en dos direcciones con un valor de 0.15% el coeficiente de perdida de presión dinámica local es de 80% con respecto a la local con la utilización de un alambre de 0.5 mm de diámetro, si se quiere mejorar la calidad del flujo es conveniente la utilización de colmena y pantalla, en la Imagen 21 se visualiza un cuadro de la pantalla y para el cálculo de pérdidas. Se utiliza la Ec.(23) (Miguel Angel Gonzalez et al. 2013).

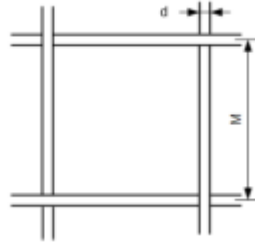


Imagen 21. Imagen de un cuadro de la pantalla

$$K_{SN} = 6.5 \frac{1 - \beta}{\beta^{5/3}} \left(\frac{U_{pantalla} d_{pantalla}}{V} \right)^{-1/3} \left(\frac{D_{TS}}{D_{SC}} \right)^4 \quad (23)$$

Donde β es la fracción de área abierta, $U_{pantalla}$ es la velocidad normal de la pantalla y $d_{pantalla}$ es el diámetro de la pantalla; esta expresión es válida para velocidades entre $0 < U_{pantalla} < 20$, para calcular β se utiliza la Ec.(24), y este valor debe ser mayor del 57%, donde Ma es la longitud se centró hasta el siguiente centro del alambre en la malla como se visualiza en la Imagen 21. Imagen de un cuadro de la pantalla (MEHTA.1895).

$$\beta = 1 \frac{d}{Ma} \quad (24)$$

La cámara de estabilización se diseñó con 5 telas y una colmena, como se visualiza en la Imagen 22 y la Ec.(25) define la pérdida general para esta sección.

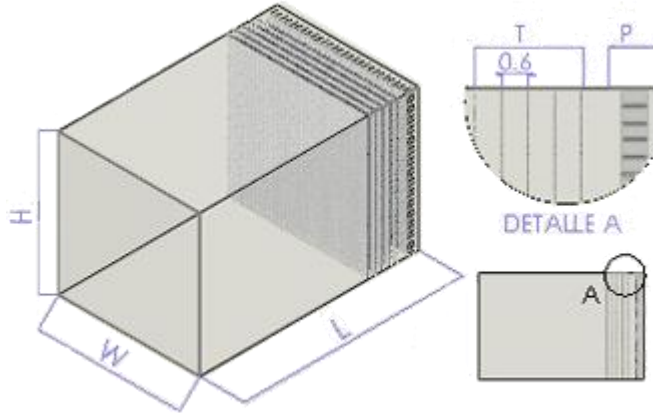


Imagen 22. Cámara de estabilización

$$K_{SN} = f_{SC} \frac{L_{SC}}{D_{SC}} \left(\frac{D_{TS}}{D_{SC}} \right)^4 \quad (25)$$

3.1.4 Difusor

Es un componente diseñado con el fin de recuperar la caída de presión estática y disminuir la velocidad de flujo de una forma eficiente (BRADSHAW; PANKHURST, 1964). El flujo a través de este elemento, es dependiente de su geometría y esta es definida por una relación de A_e y A_i el área del difusor debe aumentar gradualmente para evitar la separación de flujo, pues esto generaría turbulencia, evitando la formación de un flujo laminar en la sección de prueba, siendo esto un conflicto, por tal motivo, el ángulo de apertura del difusor no debe exceder 5° (si se desea una buena estabilidad de flujo), pero si el fin es mejorar la recuperación de presión entonces este no debe exceder un Angulo de 10° y la relación de área no puede ser mayor de 2.5 (MEHTA, 1977). Todos estos parámetros se deben al diseño base recomendado por (MEHTA, 1977).

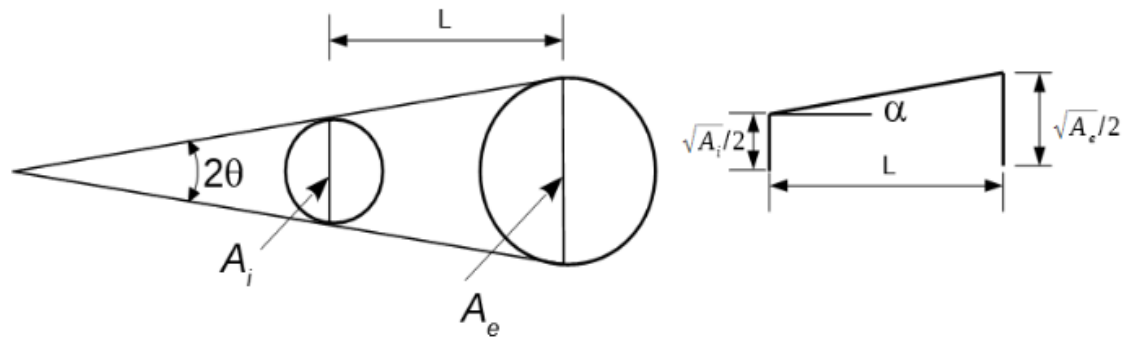


Imagen 23. Equivalencia de Ángulos en difusores

La Ec.(26), nos permitiría conocer el ángulo, pero como en nuestro caso lo que necesitamos es la longitud, pues ya tenemos un ángulo preestablecido, despejamos dando paso a la Ec.(27) un poco más útil, pues con esta calculamos la longitud de todos los difusores. La Ec.(28) representa las pérdidas en este elemento.

$$\tan\theta = \frac{\sqrt{A_e} - \sqrt{A_i}}{\sqrt{\pi}L} \quad (26)$$

$$L = \frac{\sqrt{A_e} - \sqrt{A_i}}{\sqrt{\pi} \tan\theta} \quad (27)$$

$$K_D = \left[\frac{f_D}{8 \tan(\alpha/2)} + 0.6 \tan(\alpha) \right] \left(1 - \frac{D_i^4}{D_e^4} \right) \left(\frac{D_{TS}}{D_i} \right)^4 \quad (28)$$

Donde f_D , es el coeficiente de fricción, que es el promedio del factor de fricción en la entrada y salida del difusor, D_i y D_e son los diámetros hidráulicos en la entrada y salida del difusor respectivamente y α es el ángulo. de inclusión entre las paredes opuestas (SERRANO n.d.).

(MEHTA; BRADSHAW, 1979), propone un diagrama que facilite la validación del diseño en base al ángulo y la relación de contracción, el diseño de este debe estar a la izquierda de la curva correspondiente en dirección del punto rojo señalado en la gráfica.

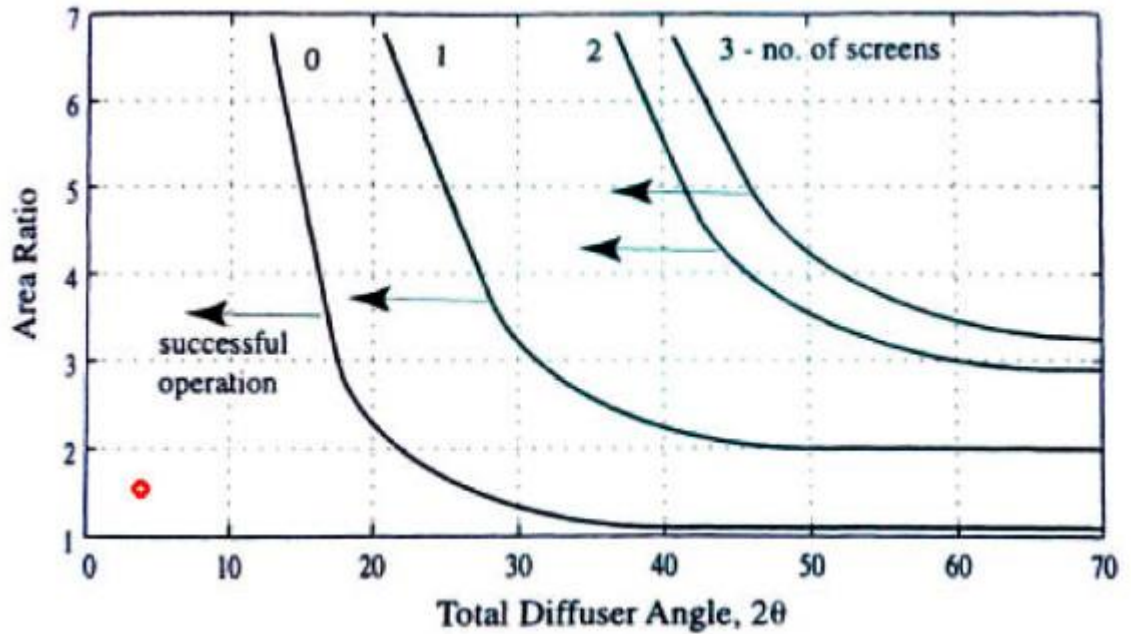


Imagen 24. Número de telas de los difusores 1, 2, 3

De la Imagen 24. Número de telas de los difusores 1, 2, 3 podemos verificar que no es necesario la utilización de ninguna tela en los difusores del 1, 2 y 3, en la imagen 25 vemos la forma de un difusor sencillo.

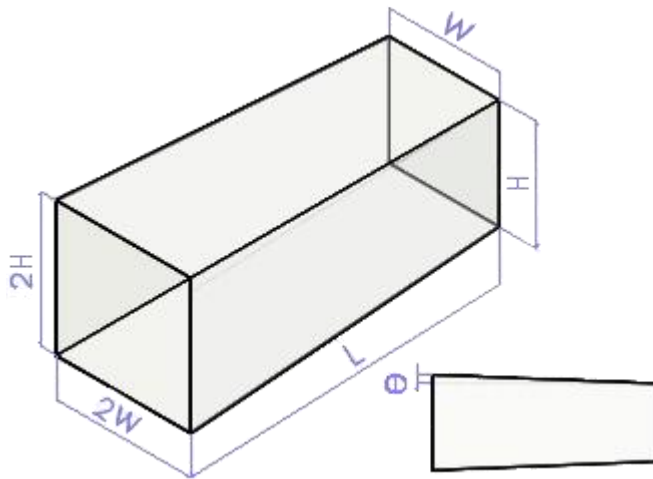


Imagen 25. Difusor

3.1.5 Difusor de grande ángulo

Es un componente esencial si se desea minimizar la longitud total del túnel y lograr una buena relación de contracción, en este elemento la relación de áreas tiene un crecimiento extravagante generando una separación de flujo y con el fin de evitar este fenómeno Mehta, 1977 recomienda la utilización de una pantalla o tela en la entrada del difusor, se debe tener en cuenta que la pantalla es una fuente importante del aumento de la caída de presión. Los parámetros esenciales para el cálculo de este difusor son su relación de áreas y el ángulo.

Mehta, 1977 realizó una investigación con 56 sistemas diferentes que utilizaban el difusor de grande ángulo y generó un diagrama que contiene la relación del área versus el ángulo con líneas que indican el número de pantallas necesarias para funcionar de manera óptima, dado a que la relación de nuestro proyecto no es mayor de 3 y nuestro ángulo elegido es 30 de la figura siguiente se puede determinar la necesidad de utilizar una sola pantalla, esta contó con las mismas características de las utilizadas en la cámara de estabilización.

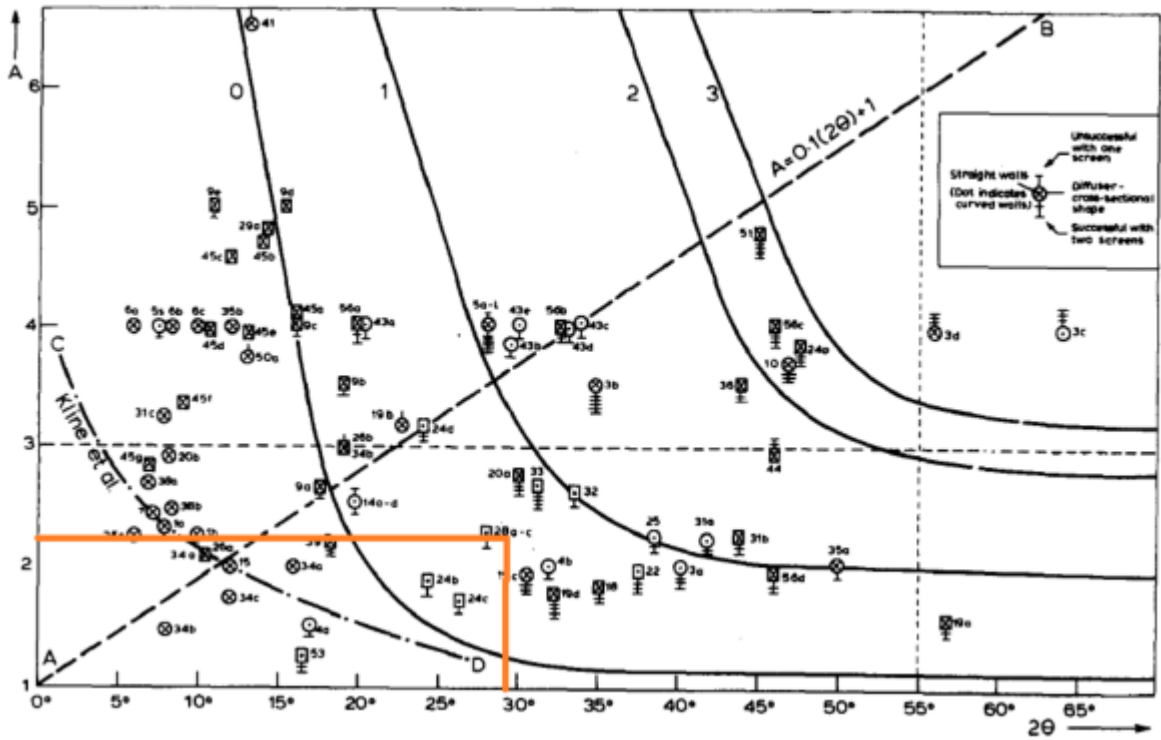


Imagen 26. Numero de telas de difusor

Para los cálculos y generación de la ecuación de longitud del difusor de grande ángulo se utilizó la ecuación general de longitud del difusor con un Angulo medio de 15° , el valor de A_e es igual al área de contracción y A_i es igual al área del difusor 3 y generando una sección de alargue 0.5 m para una mejor homogenización del fluido.

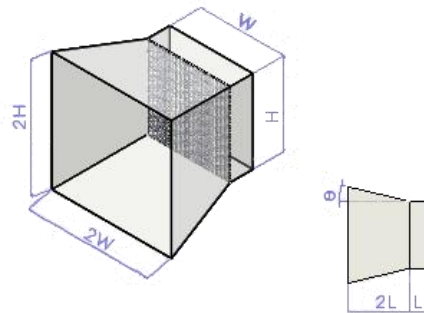


Imagen 27. Difusor de grande Angulo

3.1.6 Esquina

El túnel de viento cerrado utiliza 4 esquinas, las cuales representan más del 50% de pérdidas por presión total. El punto más crítico viene siendo la esquina más cercana a la salida de flujo del ventilador, pues esta induce un 34% de las pérdidas totales, para reducir las pérdidas y mejorar la calidad de flujo estas contienen paletas que redireccionan el flujo en su interior (Miguel Angel Gonzalez et al. 2013).

Estas paletas pueden ser definidas como placas de curvas simples, pero también pueden ser diseñados por perfiles aerodinámicos en cascadas y espacio libre, en la esquina se denomina espacio de flujo, en nuestro caso escogimos un tipo de paleta de doble perfil fabricada por torno de un catálogo comercial, el cálculo de sus pérdidas están definidos por la Ec. (29) y su representación se visualiza en la Imagen 28 (Miguel Angel Gonzalez et al. 2013).

$$K_c = \left[0.1 + \frac{4.55}{(\log_{10} R_{ec})^{2.58}} \right] \left(\frac{D_{TS}}{D_c} \right)^4 \quad (29)$$

Donde R_{ec} es el número de Reynolds basado en el acorde de la paleta y D_c es el diámetro hidráulico de la esquina.

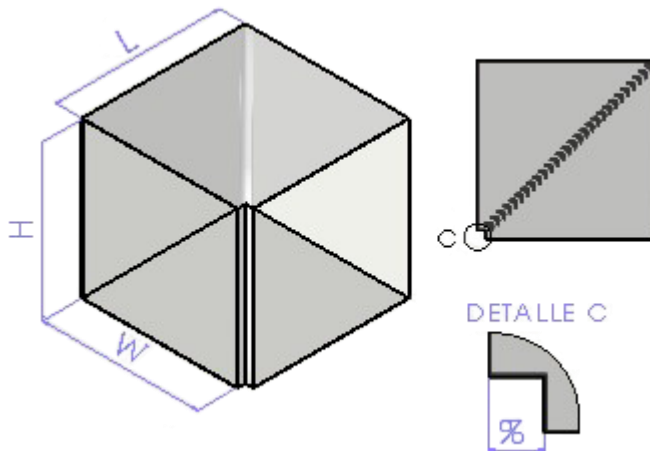


Imagen 28. Esquina del túnel

3.1.7 Transición

Se conoce que el único elemento circular existente en todo el sistema es el ventilador, por ende, se hace necesario la utilización de una transición para pasar de esta área circular a una cuadrada como lo son el resto de áreas en este caso la del difusor.

$$\tan(\alpha) = \frac{D_e - D_i}{2L_t} \quad (30)$$

Donde L_t es la longitud de la transición.

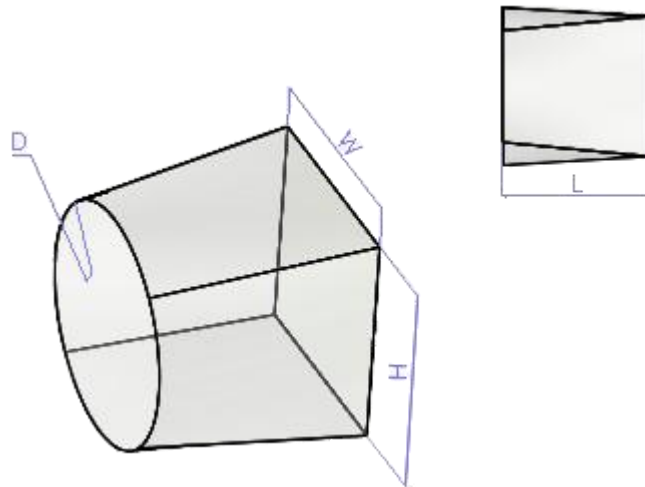


Imagen 29. Transición

La Imagen 29, representa la transición del área circular del ventilador a la cuadrada de los difusores. Para el cálculo de la altura total del túnel se suman el w de la contracción con el w del difusor 3 junto con un espacio anexo de 1 metro para labores de mantenimiento y respecto a la longitud es el producto de la suma particular de las piezas inferiores del circuito

Se realizó una visualización con valores, la cual será representada en la Tabla 3, los valores mostrados fueron calculados con el aplicativo creado en este proyecto de grado.

Sección	Relación de área (salida/entrada) A_2/A_1	Comentarios
Sección de prueba	$1.0/1.0 = 1.0$	$L = 3.0$
Difusor 1	$1.7/1.0 = 1.7$	$\theta = 5^\circ \quad L = 1.959m$
Esquina 1-2	$1.7/1.7 = 1.0$	Paletas de torneado de doble espesor de fabricación principal
Difusor 2	$2.89/1.7 = 1.7$	$\theta = 5^\circ \quad L = 2.555m$
Ventilador	$3.062/3.062 = 1.0$	$L = 4.5$
Difusor 3	$4.913/2.89 = 1.7$	$\theta = 5^\circ \quad L = 3.331m$
Esquina 3-4	$4.913/4.913 = 1$	Paletas de torneado de doble espesor de fabricación principal
Difusor de grande Angulo	$7/4.913 = 1.424$	$\theta = 15^\circ \quad L = 1.404m$ contiene una tela
Cámara de estabilización	$7/7 = 1$	$L = 2.044$ 5 tela con separación de 6cm entre tela y 1 panal
contracción	$7/1 = 7$	$N = 7 \quad L = 3.871$

Tabla 3. Datos generales del túnel

CAPÍTULO IV

4. CONSTRUCCIÓN DE UN CÓDIGO COMPUTACIONAL PARA DIMENSIONAR EL CIRCUITO AERODINÁMICO

Generalmente, un túnel de viento se clasifica por la forma (tipo de soplado, tipo de succión y tipo de circulación), la forma de la sección de medición (abierta, semiabierta y sellada). Los prácticos túneles de viento se clasifican en 13, Imagen 30, el círculo representa el soplador, la flecha muestra la dirección del flujo y "M.S" es la sección de medición (Mochzuki y Maruta, 1996).

4.1.1 Sistemas seleccionados a diseñar

Mediante la tesis se busca dimensionar 8 de los 13 tipos de túneles de Mochizuki y Maruta, que ilustran el entorno de circulación para el flujo de aire entre el ventilador y la sección de medición.

Los sistemas escogidos se muestran en la Imagen 31 donde además se visualiza en un recuadro rojo el túnel base sobre el cual se realizaron los códigos.


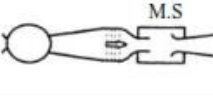
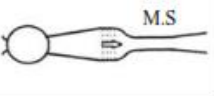
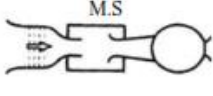
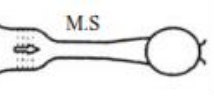
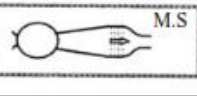
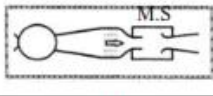
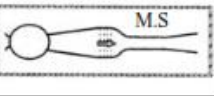
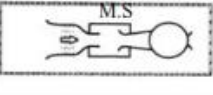
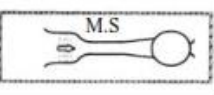
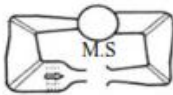
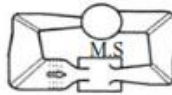
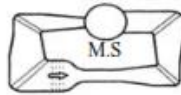
Measurement section Duct type	Open-type	Half-open type	Sealed-type
Blow			
Suction	Non practicality		
Circulating blow			
Circulating suction	Non practicality		
Circulating			

Imagen 30. Clasificaciones del túnel de viento (Mochizuki y Maruta, 1996);

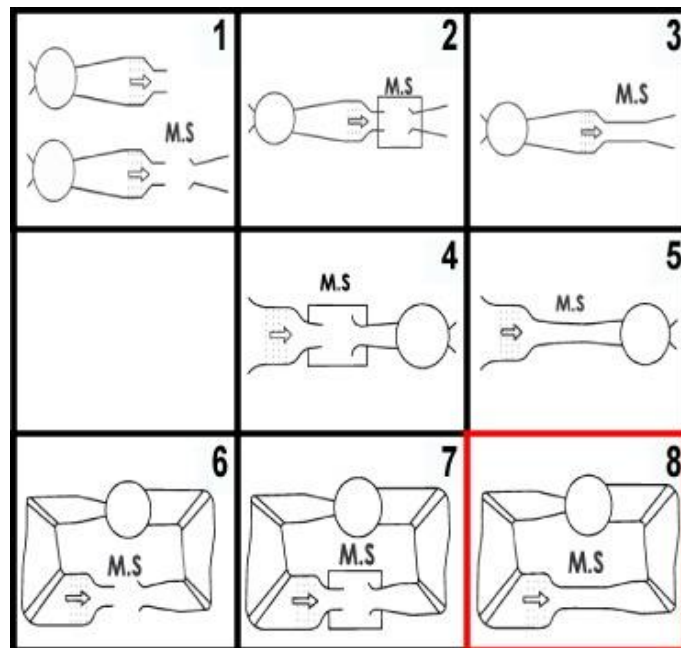


Imagen 31. Túneles de viento a diseñar

4.1.2 Aplicativo

En este capítulo revisaremos y analizaremos el aplicativo generado en lenguaje Python, examinando las diferentes ventanas que lo componen y comprendiendo cuáles son sus alcances. El aplicativo comenzó con la creación del primer código el cual nos permitía la visualización de un croquis en 2D, Imagen 16, construido con los parámetros de cada pieza calculadas con las ecuaciones planteadas en el capítulo anterior. Estos cálculos contienen ciertos valores teóricos que los condicionan y de los cuales dependen el dimensionamiento. Dichos valores son: la relación de áreas en los difusores y sus ángulos, el espacio entre telas, la cantidad de telas, el espacio de malla. En la Tabla 3, se reflejan los valores teóricos escogidos con el fin de obtener un flujo lo más homogéneo posible en la sección de pruebas.

Una vez construido el código principal se procedió con la construcción de los siguientes sistemas:

4.1.3 Códigos que componen el aplicativo

En total el aplicativo contiene 17 códigos (.py), es decir, en lenguaje Python, 16 de los cuales son los diferentes sistemas de túneles de viento.

Para cada túnel de viento se construyeron 2 códigos, uno que solo solicita los tres parámetros principales para el diseño y el segundo que le permite al usuario modificar variables importantes como presión, temperatura, rugosidad de material, cantidad de telas entre otras variables, ya que estos valores cambian dependiendo el lugar en el que se desee la instalación y utilización del sistema, y de no ser así otra de las causas para querer cambiar los parámetros puede ser por cuestiones económicas en el caso de los elementos homogeneizadores de flujo utilizados en diferentes componentes o directamente del material con el cual se realiza la construcción final. El último código es el encargado de la visualización de la interfaz del aplicativo, a su vez utiliza valores específicos de los diferentes códigos que dimensionan y calculan los parámetros de los túneles de viento con el fin de poder mostrar las variables solicitadas por el usuario.

4.1.4 Generación de la interfaz

El diseño de la interfaz se realizó en Qt Designer, este es un diseñador de interfaz compatible con Python, su utilización depende de importar diferentes librerías a la hora de compilar y poder ejecutar el código o existen diferentes comandos, los cuales pueden ser utilizados en el CMD de anaconda una extensión de Python, el cual nos permite crear directamente desde un archivo punto .ui otro archivo .py, es decir, un archivo en lenguaje Python, permitiendo su ejecución en Spyder, en total se generaron 5 archivos (.ui), que serán explicados a continuación, permitiendo no solo la visualización de la interfaz sino también la visualización de los alcances del aplicativo, este análisis se hizo detallando, cada una de las imágenes desde la Imagen 32 a la imagen Imagen 40.

4.1.5 Muestra de interfaz y prueba

Lo que se busco fue construir un aplicativo con una interfaz amigable para el usuario, la Imagen 32 es nuestra primera ventana que observará y en esta podrá seleccionar el sistema que desee calcular. Nosotros por motivo de ejemplo, hemos elegido el sistema más complejo es decir nuestro túnel de viento de circuito cerrado.

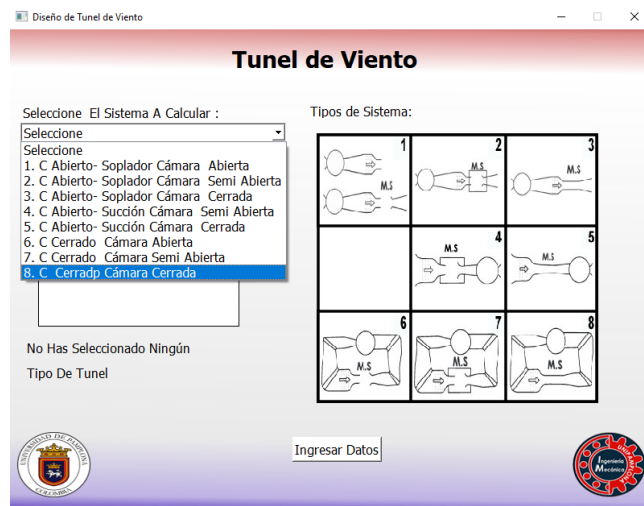


Imagen 32. Selección de sistema

Después de haber elegido el sistema que se desea calcular presionamos clic sobre el botón calcular y este nos mostrará una segunda ventana, Imagen 33, esta ventana nos permitirá la modificación de los tres valores iniciales sobre los cuales se calcula y construye nuestro

sistema seleccionado, las casillas están llenas con valores preestablecidos, con el fin de dar una idea al usuario de los valores reales con los que podrá calcular su sistema.

En caso tal de que las casillas estén +vacías, el programa ejecutara un error y le mostrará un anuncio por pantalla, así mismo donde el valor de la contracción sea muy pequeño o irracional.

Ingreso de Datos para el Calculo de tunel de Sistema Cerrado

características para calcular sistema de tunel cerrado

características	Unidad	Valor
Alto de la sección de Prueba	m	1
relacion de contracción	N/A	7
Velocidad de la sección de Prueba	m/s	60

Nota:
los resultados que vas a visualizar son calculados con valores ideales
para mayor exactitud utilizar el boton de recalcular y modificar dichas variables.

Menu Principal Calcular

Imagen 33. Ingreso de variables

Una vez ingresados los valores y seleccionando el botón de calcular del aplicativo, nos dejará ver la ventana de resultados, Imagen 34, en esta encontraremos a primera vista un gráfico en 2D que nos representa el diseño de nuestro túnel, a su derecha estará la leyenda, es decir, la descripción de los componentes del gráfico, esta descripción comienza en la sección de prueba y sigue una trayectoria en contra de las manecillas del reloj, nombrando todos los componentes del sistema, los valores de áreas que observamos representan el área mayor del elemento y la velocidad es la velocidad promedio de cada sección en particular, esta ventana nos permite no solo visualizar resultado de forma general, pues si se desea ver el detalle de cada pieza solo bastaría con dar clic sobre el botón de ver, que se encuentre al lado derecho de la pieza deseada.

Los botones presentes en la parte inferior nos permiten realizar las funciones que espástica el nombre que se les asigno.

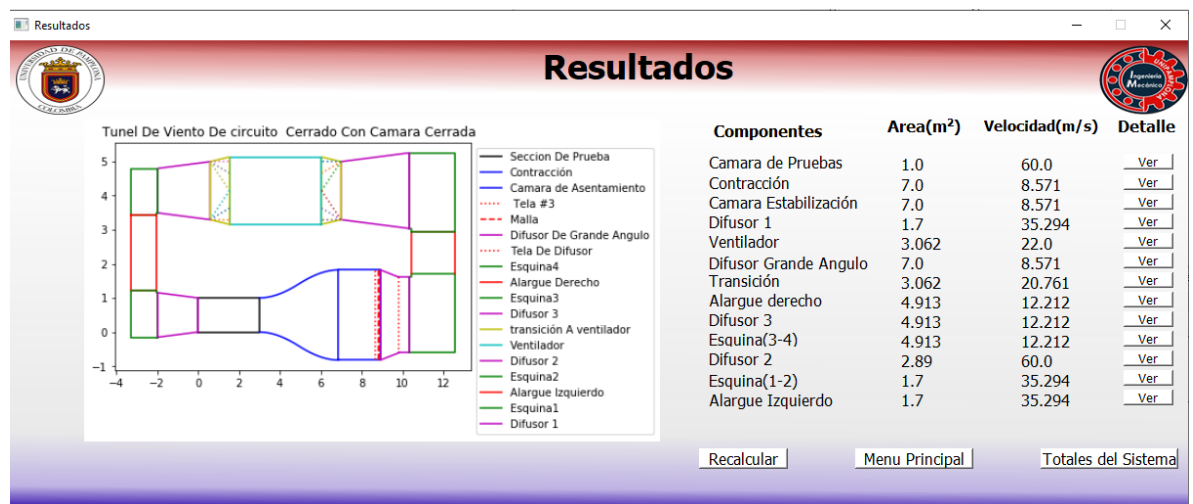


Imagen 34. Resultados generales

En la ventana: detalles, podrás observar con mayor facilidad las dimensiones de la pieza, como elementos estabilizadores de flujo en caso tal de que la pieza los contenga.

Las imágenes mostradas en los elementos de detalle fueron realizadas en solidwork, con las medidas proporcionadas por el aplicativo a la hora de realizar esta prueba, es decir, no cambiarán. Esto no quiere decir que las dimensiones sean erróneas pues los valores varían si las variables son modificadas, la Imagen 35 nos permite visualizar los detalles de la

contracción un elemento que posee dos alturas diferentes mientras la Imagen 36 nos permite la visualización de un elemento de área constante como lo es la cámara de estabilización, este componente tiene elementos internos utilizados para mejorar la calidad de flujo, debido a esto se habilita la parte derecha y nos permite ver detalles de los elementos internos de la cámara de estabilización esto mismo sucede con las esquinas.

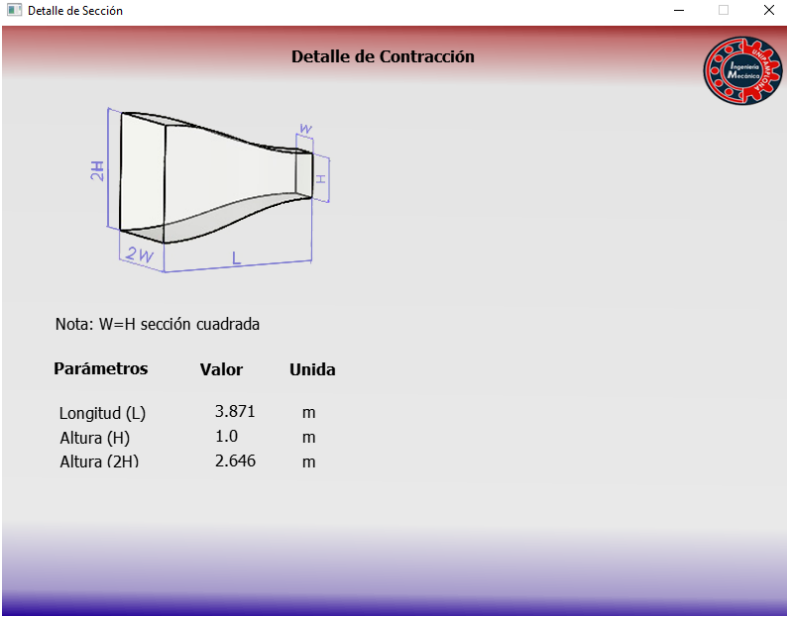


Imagen 35. Detalle

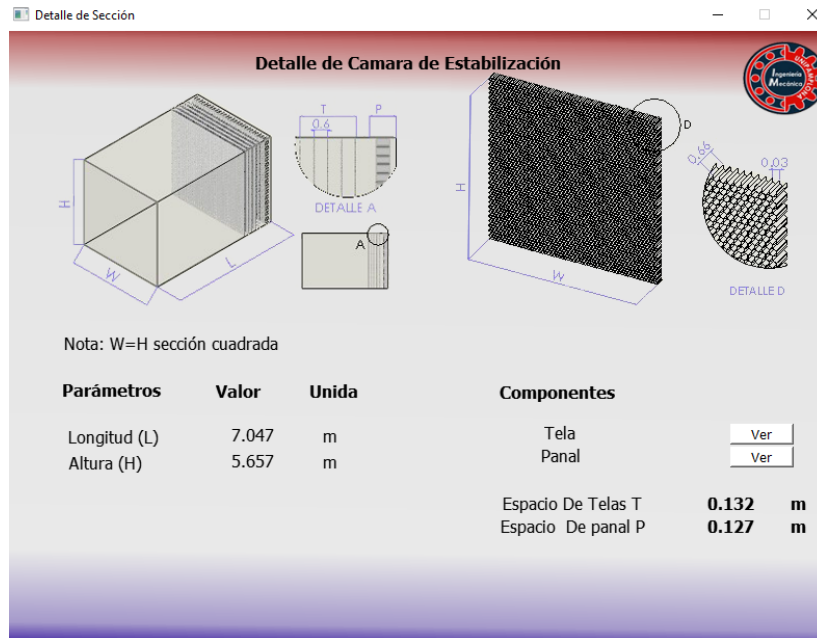


Imagen 36.detalle con accesorios de pieza

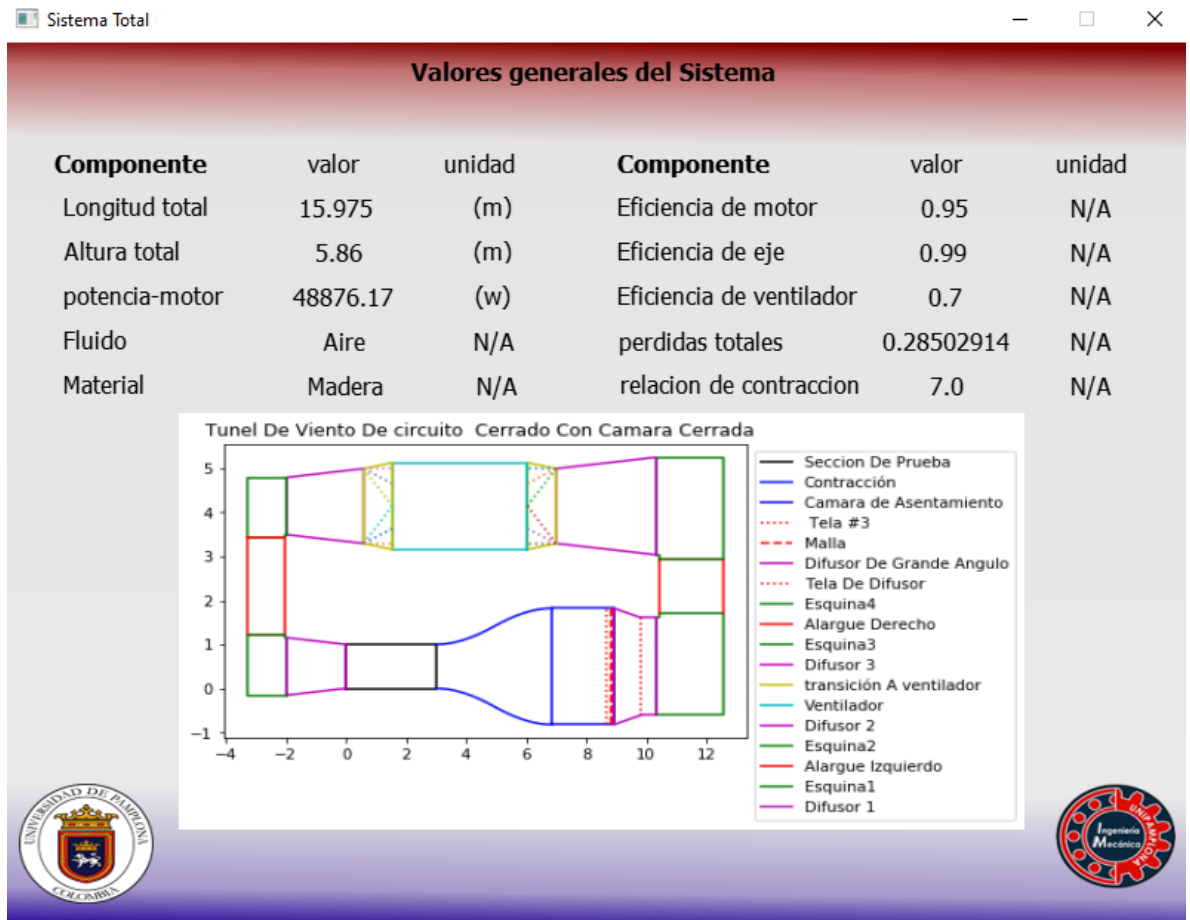


Imagen 37.total del sistema

Si el usuario desea puede observar los detalles generales o valores totales del sistema, como su altura máxima, la potencia necesaria del motor o la altura total del sistema entre otros. Los valores que nos permite visualizar el aplicativo se muestran en la Imagen 37.

4.1.6 Aplicación del botón de recalcular

Las imágenes 38,39,40 proporciona los resultados de un recalcu, mostrando las variaciones en las diferentes ventanas con valores muy notorios como el cambio elevado de áreas en la ventana de resultados o el incremento de la potencia necesaria del motor para proporcionar el flujo del sistema, lo que se quería mostrar es como la modificación de pequeños parámetros ocasionan grandes cambios en el sistema así mismo el funcionamiento y aplicación del botón de recalcular, esto no solo sucede para este tipo de

túnel si vuelve al menú puede realizarlo en el sistema de tu preferencia o el que más convenga.

Modificar Datos

Ingreso de Datos Para calculo

Propiedades	Unidad	Valor Anterior	Nuevo Valor
Alto de la sección de Prueba	m	2.0	<input type="text" value="2"/>
Relación de Contracción	N/A	8.0	<input type="text" value="8"/>
Velocidad de la sección de Pruebas	m/s	70.0	<input type="text" value="70"/>
Presión	Pa	101325.0	<input type="text" value="101325"/>
Temperatura	K	307.15	<input type="text" value="307.15"/>
Rugosidad del Material	μm	0.00018	<input type="text" value="0.00018"/>
Cantidad de Telas	N/A	2.0	<input type="text" value="2"/>
Eficiencia de motor	N/A	0.95	<input type="text" value="0.95"/>
Eficiencia de eje	N/A	0.99	<input type="text" value="0.99"/>
Eficiencia de ventilador	N/A	0.7	<input type="text" value="0.7"/>
Redireccionadores esquina (1-2)	N/A	45.0	<input type="text" value="40"/>
Redireccionadores esquina (3-4)	N/A	68.0	<input type="text" value="60"/>

Imagen 38.Modificación de datos

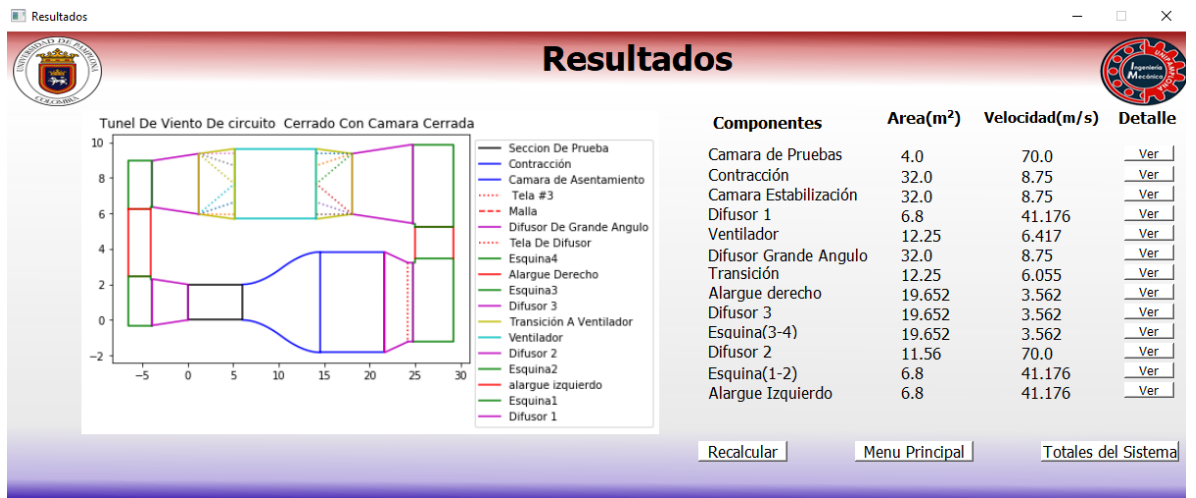


Imagen 39. Resultados recalculados

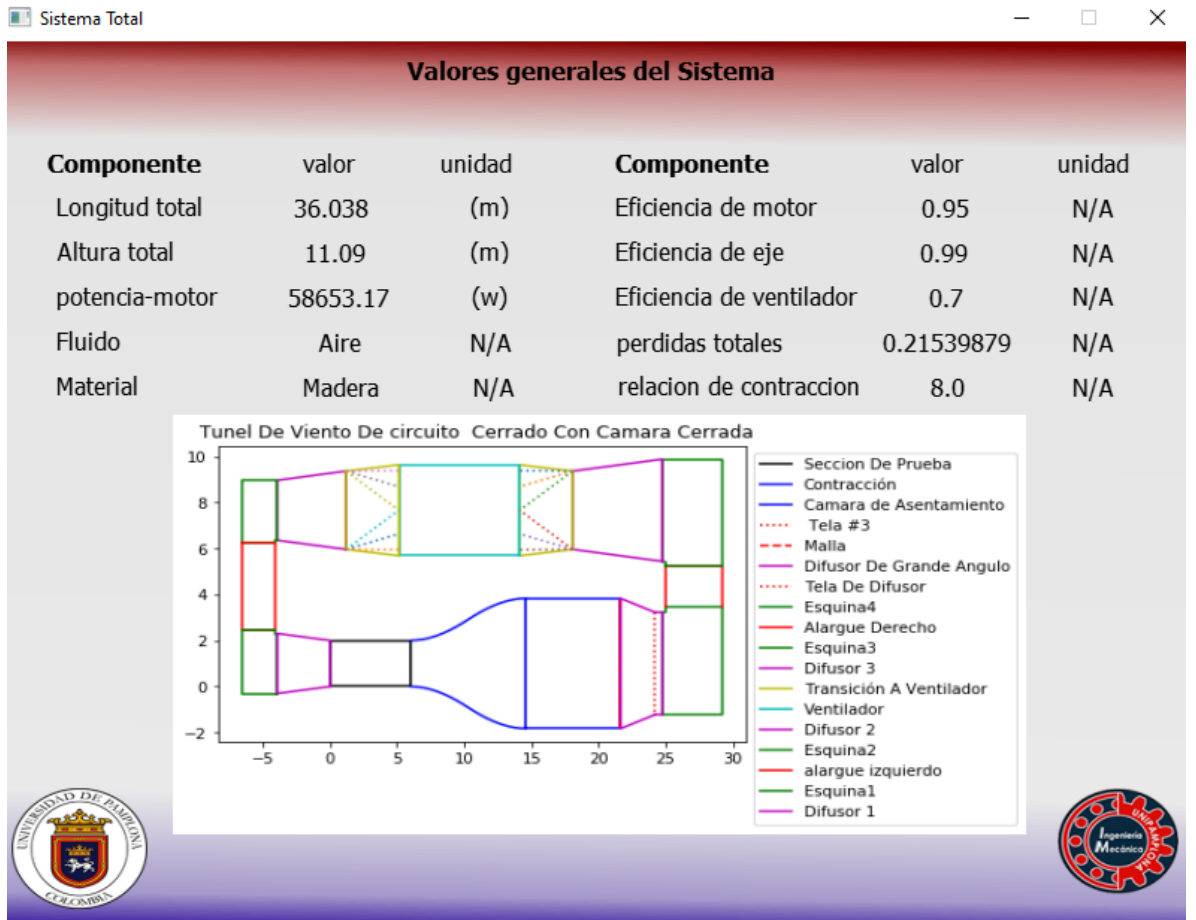


Imagen 40. Total, recalculado

4.1.7 Comparación de datos con el código base (Excel)

Cabe aclarar que cada túnel de viento es diferente, es decir, no existen dos túneles de viento iguales, pues van a variar dependiendo su necesidad y condiciones de uso, este aplicativo le brinda al usuario un estimado, es decir, un elemento guía, pues el diseño final es dependiente de su necesidad, aun así se realizó un comparativo con el aplicativo existente; en el Excel de este se evidencio que, aunque el circuito nuestro varia respecto a las características del diseño, la longitud y altura total del sistema respecto a los valores generado por el Excel, son similares, pues el valor proporcionado por el Excel es 16.037 y 6.376 Imagen 41 mientras que el proporcionado por el aplicativo es 15.975 y 5.86 respectivamente como lo refleja la Imagen 37.

salidas		
Longitud total del túnel de viento (zona PP)	14.187	
Longitud total del túnel de viento (zona TS)	16.037	
Túnel de viento total ancho / altura	6.376	
angulo maximo del difusor 3	0.77	
Coefficiente de pérdida de presión total, ζ	0.183	Diseño Preciso
Pérdida de presión total a velocidad de prueba [Pa]	391	<input type="button" value="Pressure Loss Update!"/>
Pérdida de presión en el difusor 1	21.88%	
Pérdida de presión en el esquina 1	27.89%	

Imagen 41.valores del aplicativo de túnel construido en Excel

Una vez obtenido dicho código, sólo faltaría generar un ejecutable para que pueda ser utilizado en otros dispositivos de forma rápida y segura

CAPÍTULO V

5. CONSTRUCCIÓN Y SITUACIÓN DEL CIRCUITO DE TÚNEL DE VIENTO DIMENSIONADO CON EL APLICATIVO

5.1.1 Construcción de túnel de viento

Utilizando las dimensiones proporcionadas por el aplicativo se procedió con la construcción del túnel mediante un software que nos permitiese una simulación y visualización de los parámetros como la velocidad en la cámara de pruebas reducción de turbulencia, gracias a la malla y las telas; y el redireccionamiento del fluido, gracias a las paletas implantadas en las esquinas, aclarando que todo esto seguiría siendo un aproximado, pues en la realidad, los resultados están sujetos a un sin número de errores, ya sea por medición o por condiciones externas, pero aun así estas herramientas computacionales no dejan de ser útil y más en el entorno de la ingeniería. }

5.1.2 Construcción de túnel de viento en solidworks

Para realizar esta validación, es necesario la construcción del sistema en un CAD, por sus siglas en inglés (Computer-Aided Design), el CAD escogido para este fin fue solidwork, en este se diseñaron cada una de las piezas con sus componentes y se realizó una pequeña simulación de flujo, para la cual se ingresaron dos valores, uno definido como entrada: como lo es la velocidad en uno de los componentes; y otro la presión en la salida, dichos valores proporcionados por el aplicativo nos permitía una visualización de la velocidad, temperatura entre otras variables en el sistema y segmentando la velocidad; observamos que en la cámara de prueba se alcanza una similitud respecto al valor ingresada como uno de los parámetro iniciales para el cálculo del dimensionamiento del sistema en el aplicativo pero dicha simulación era algo primario, pues el enmallado no tomaba piezas muy pequeñas (teniendo en cuenta que el sistema tiene dimensiones en

metros y existen elementos dentro de los sistemas que tienen cotas de milímetros), esto da como resultado un conflicto a la hora de enmallar el sistema en general, pues con variaciones tan significativas los elementos más pequeños terminan siendo omitidos por el software Imagen 42 .

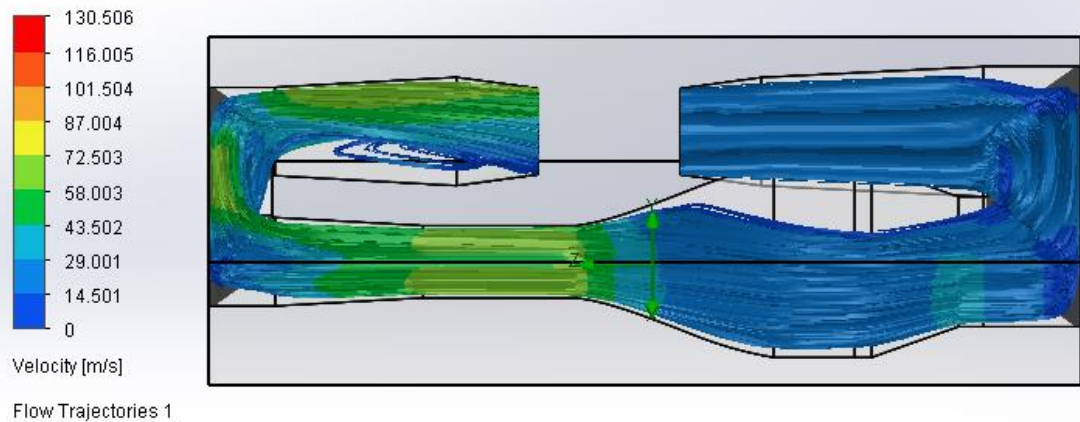


Imagen 42 . simulación realizada en solidwork

5.1.3 Geometría para simulación de túnel de viento de circuito cerrado en Ansys

Debido a lo anterior, se optó por exportar la geometría y se realizaron las simulaciones y validaciones en un CAD con mayor poder computacional en el área de fluidos como lo es Ansys, aun así la validación seguía teniendo una gran complejidad, ya que el sistema de túnel cerrado con cámara cerrada implementado solo las placas encargadas de dar dirección al flujo en las esquinas alcanzaban un total de 2.458.955 millones de nodos Imagen 42, siendo esta ya una cantidad alta y reafirmando que el sistema no variaba mucho del antes simulado en solidwork, pues solo tiene los detalles de las esquina faltando las telas de la cámara de estabilización, el panel y la tela del difusor, dando por sentado que no se podría visualizar una simulación del túnel de circuito cerrado con cámara cerrada con todos sus detalles.

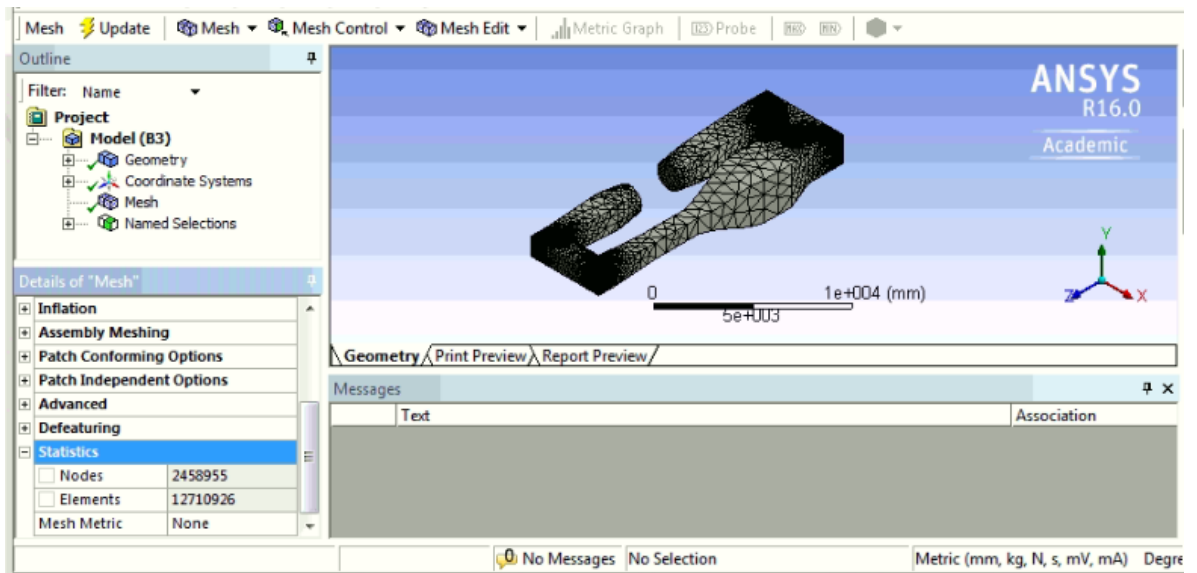


Imagen 43. Enmallado de túnel de circuito cerrado con recirculación, cámara de pruebas cerrada y detalle de las esquinas.

5.1.4 Simulación de túnel de circuito soplador abierto con cámara cerrada en Ansys

Se optó por la simulación de un sistema más pequeño y con menos elementos, como lo es el túnel de circuito soplador abierto con cámara cerrada, pero al utilizar 3 detalles como son el panel y dos telas, una de ellas en la cámara de estabilización y otra en el difusor de grande Angulo como lo sugiere la teoría en la cámara se visualizó un número de 4.478140 de nodos, Imagen 44, generando un conflicto a la hora de resolver las ecuaciones internas del programa e imposibilitando la verificación de resultados, que era lo deseado Imagen 45.

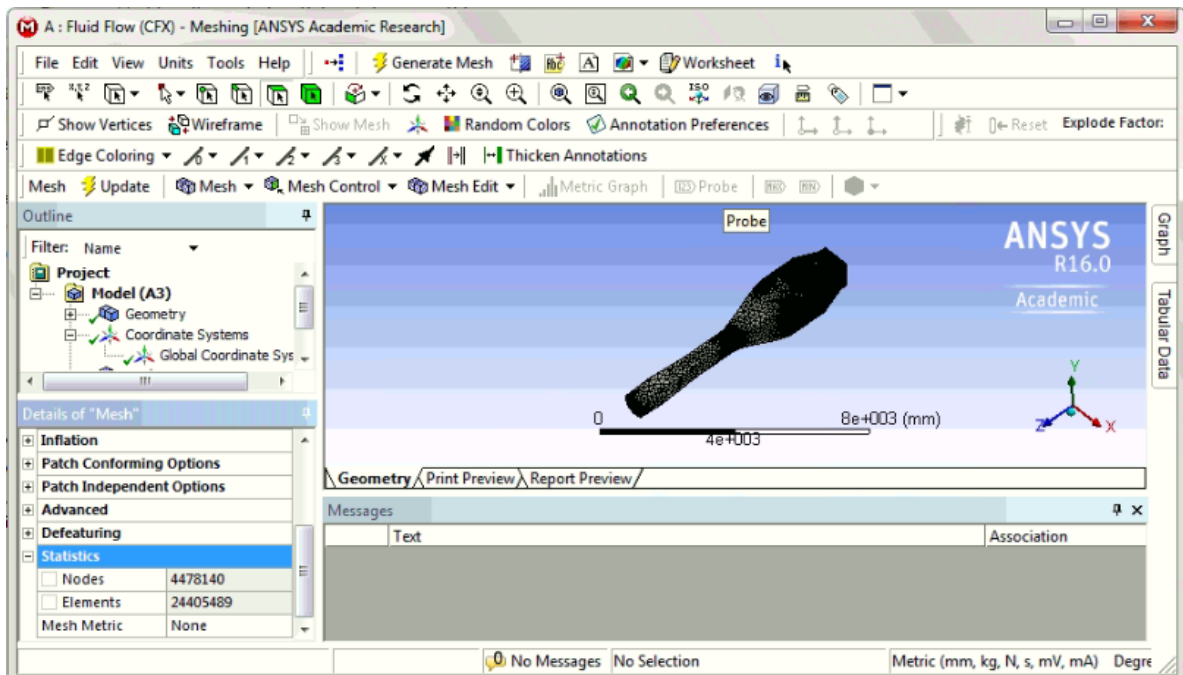


Imagen 44. Enmallado de túnel soplador con 4478140 de nodos

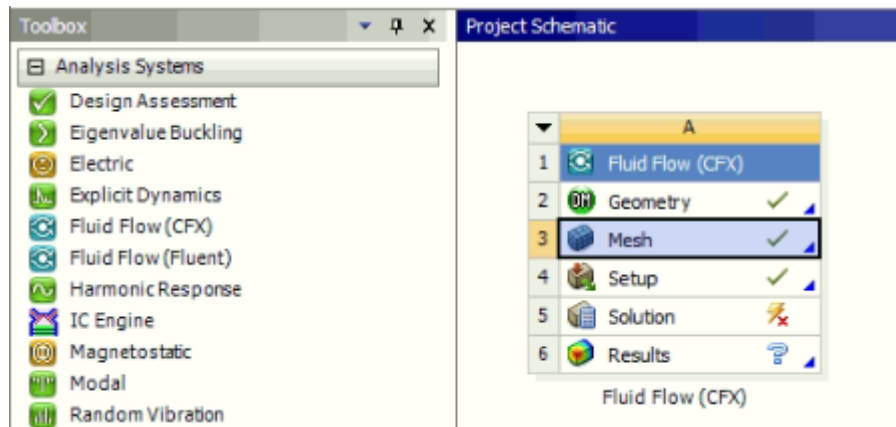


Imagen 45. Error de solución

5.1.5 Simulación de túnel de succión de circuito abierto con cámara cerrada en Ansys

Por último, se decidió por la utilización de una altura de 0.5 m en la cámara de pruebas y un sistema similar al anterior, pero que reducía aún más los componentes, puesto que en este

sistema de túnel de viento no se utiliza el difusor de grande ángulo, como lo es el túnel de succión de circuito abierto con cámara cerrada, pero aun así la cantidad de nodos es muy alta, esto se debe a las dimensiones de los hilos que componen la tela y el espesor de las paredes del panel, pues son medias en milímetros que rondan entre 1-3mm, dando por sentado que a la hora de enmallar los elementos, estos deben ser menores utilizando números muy elevados de nodos, como ya se comprobó, debido a esto se utilizó una simulación por secciones de los componentes críticos y visualizaciones que no requerían números tan elevados de nodos, es decir, se segmentó el problema, pero esto genera un conflicto, pues no se puede estudiar un fluido de forma general, provocando un estimado de los valores como si estos se comportaran de manera ideal, dando por sentado que debido al poco poder computacional se puede visualizar el fenómeno de forma segmentada mas no de una forma compleja, es decir: estudiar el comportamiento de flujo y sus variaciones a lo largo del todo el sistema, revisando sus cambios al pasar por diversos componentes del sistema. Para esto se requiere un mayor número de nodos, es decir otro tipo de licencia.

5.1.6 Resultado de simulaciones generadas en ansys para túnel de circuito cerrado

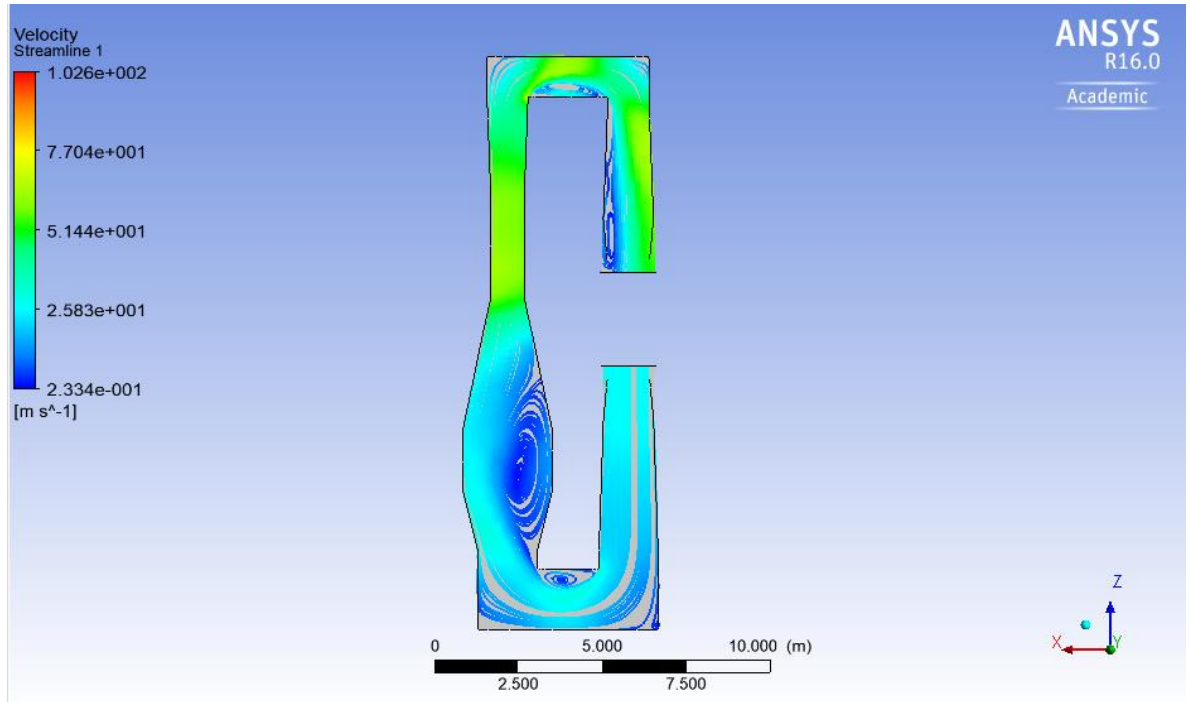


Imagen 46. velocidad de Túnel de circuito cerrado sin detalles

En la Imagen 46 se visualiza la generación de vórtices en la parte inferior y enfatizado en el segmento mas grande del túnel que representa la cámara de estabilización, la salida de la contracción y la entrada al difusor de grande Angulo en este tramo se visualiza este fenómeno producido por el fluido

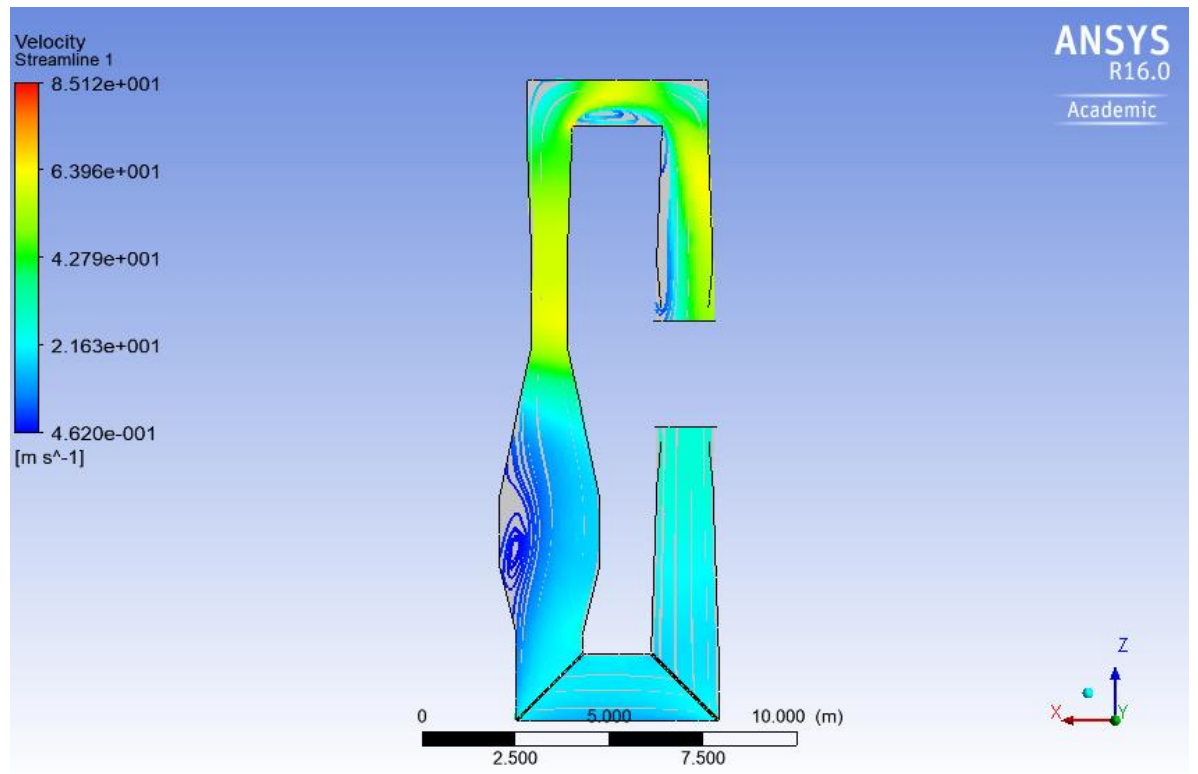


Imagen 47. Velocidades de Túnel de circuito cerrado con redireccionadores en esquinas 3-4

Al momento de implementar los redireccionadores se observa una reducción en la generación de vórtices en el sistema en general la teoría nos dice, para que el flujo se homogenice de forma ideal es necesario la utilización de este elemento pero a su vez el sistema debe estar complementado como mínimo con una malla en el difusor de grande ángulo debido a su ángulo de ataque y elementos homogenizadores de flujo en la cámara de estabilización pero como ya explicamos la realización de una simulación con todos los elementos es complicada debido a la licencia utilizada

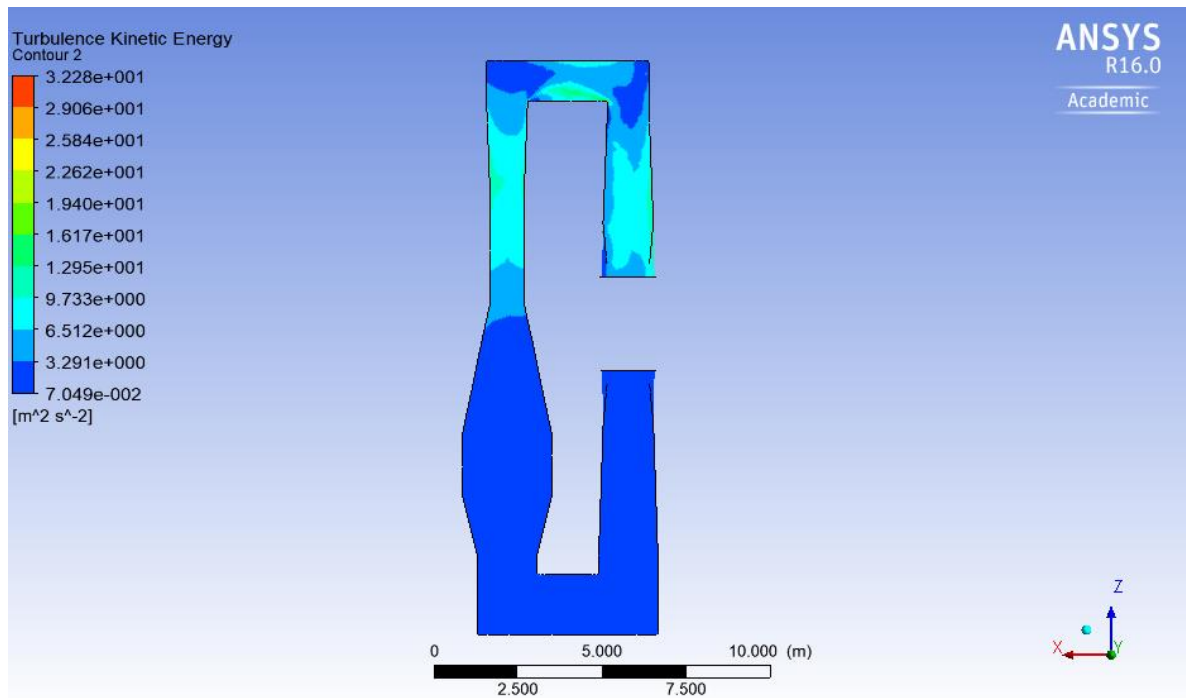


Imagen 48. Turbulencia de Túnel de circuito cerrado sin detalles

Si detallamos las Imagen 48 y la comparamos con la imagen Imagen 49 la turbulencia no varía pues los detalles de las esquinas tienen como función principal orientar el flujo y para la generación de un fluido laminar se necesita de los elementos faltantes como lo son la malla y las telas o pantallas estos elementos si nos permiten una disminución en la turbulencia

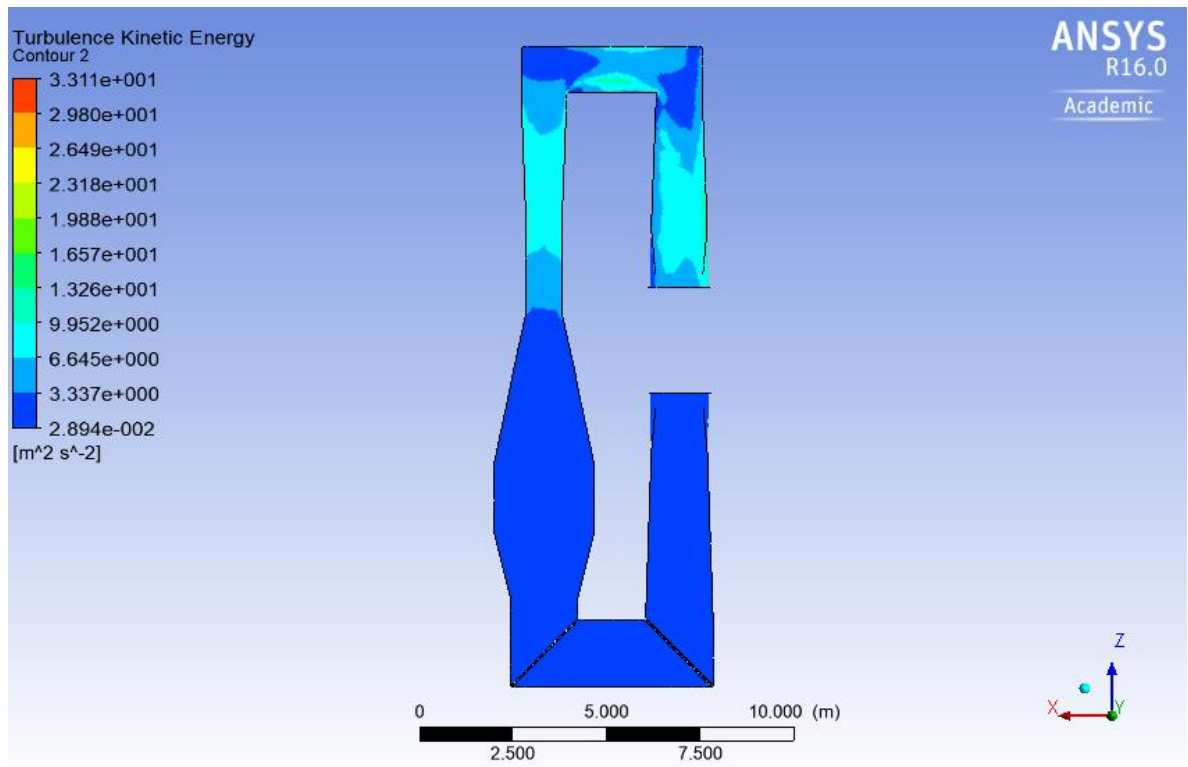


Imagen 49. Turbulencia de Túnel de circuito cerrado con redireccionadores en esquinas 3-4

6. CONCLUSIONES

El túnel de viento es un elemento con aplicaciones muy variadas beneficiando no solo a un grupo específico de estudiante, pues permite el análisis de fenómenos que afectan en diversas industrias como puede ser la industria automotriz aeronáutica o de construcciones entre otras; el aplicativo puede ser un elemento útil para incentivar a la construcción y ejecución de un sistema específico de los cuales está compuesto, permitiendo pruebas a escala de diferentes proyectos, ya sean de investigación o de aula. brindando la posibilidad de una visualización del fenómeno y permitiendo al estudiante una ampliación del conocimiento con verificación y comparación de datos calculados analíticamente con los resultados arrojados por el sistema cuando este esté en ejecución.

El aplicativo es un elemento útil de ser utilizado Como borrador para un prediseño de un túnel de viento. debido a la variación tanto de datos como parámetros por diferentes condiciones, externas como internas no se debería realizarse el uso de este elemento (aplicativo) como manual de construcción de ninguno de los sistemas aquí diseñados

Aunque existen y están en funcionamiento variados sistemas de túneles de viento no se evidencia la existencia de uno que sirva como elemento guía con exención del Excel y brinde detalle de cada uno de sus componentes en general. hablan de condiciones que se deben permitir para su construcción, pero este no dicta lo que se debe hacer es decir no define las estrategias ni una forma de verificación de los datos facilitando un modelo comparativo

El proyecto final no termino con la construcción del código para un túnel específico, sino que permitió la validación de diferentes sistemas con el fin de no condicionar el aplicativo a un tipo de usuario y permitir ampliar el alcance por si las necesidades de este son variadas evitando obligar al

Llegado el caso de la construcción de un Sistema de túnel de viento este brindaría la posibilidad de estudios e investigaciones conjuntas con otras carreras como es el caso de diversas ingenierías que ven termo fluidos o ya sea con carreras como arquitectura y diseño

7. RECOMENDACIONES

Agregar la opción de modificar los parámetros de relación de las áreas y ángulos en los difusores del aplicativo

Validar los resultados del dimensionamiento por medio de una simulación realizada en un software que permita la utilización de gran cantidad de nodos y un buen equipo que la soporte

Tener en cuenta el alcance del dispositivo para el análisis de una pieza de dimensiones determinadas. una vez generado el dimensionamiento del túnel de viento

Estudiar la posibilidad de utilizar las opciones de la ventana recalcular como entrada de datos iniciales y permita una visualización de los datos de forma eficiente para el usuario

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

“ANSYS Plataforma de Solucion CAE.” <http://www.3dcadportal.com/ansys.html>

(November 26, 2019).

CENGEL, YUNUS. 2006. “MECÁNICA DE FLUIDOS.” *Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015* 1.

Chanetz, Bruno. 2017. “A Century of Wind Tunnels since Eiffel.” *Comptes Rendus - Mecanique* 345(8): 581–94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.crme.2017.05.012>.

“Core Python Programming - Wesley Chun - Google Libros.”

<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=mh0bU6NXrBgC&oi=fnd&pg=PR1&dq=python+programming&ots=XAmCGs7Ydd&sig=Ogm0vShS2cgrq8tCv1Yua0mgnc k#v=onepage&q=python+programming&f=false> (November 26, 2019).

Jos, Compilador, and Fernando Madrigal Guzm. 2013. “Simuladores Didácticos Para Arquitectura y Construcción.” [http://evirtual.uaslp.mx/Habitat/innobitat01/CAHS/SSArqArista/Publicaciones/Libros/LibrosPublicados/Simuladores didácticos. MGJF. AGGJ.pdf](http://evirtual.uaslp.mx/Habitat/innobitat01/CAHS/SSArqArista/Publicaciones/Libros/LibrosPublicados/Simuladoresdidacticos.MGJF.AGGJ.pdf).

Miguel Angel Gonzalez et al. 2013. *Wind Tunnel Designs and Their Diverse Engineering Applications*. <http://www.intechopen.com/books/wind-tunnel-designs-and-their-diverse-engineering-applications%5Cnwww.intechopen.com>.

PINEDAMAIGUA, DIEGO PATRICIO-WILMER HERNAN VEGA SANTILLA. 2010. *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TUNEL DE VIENTO SUBSÓNICO CON SISTEMA DE ADQUICIÓN DE DATOS...*

Pinilla, Álvaro. 2008. *El Poder Del Viento Wind Power*.

Rivera, Profesor Marvin R. 2017. “Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Química.”

SERRANO, JUAN CARLOS. “Perdidas.Pdf.”

———. “WindTunnel Design.Pdf.”

“Soilworks | Geotechnical Solutions for Practical Design.”

https://en.midasuser.com/product/soilworks_overview.asp (November 26, 2019).

Universia. 2011. “Desarrollan Primer Túnel Del Viento En Colombia.”

<https://noticias.universia.net.co/ciencia-nn-tt/noticia/2011/10/21/880454/desarrollan-primer-tunel-viento-colombia.html> (October 21, 2011).

Vanguardia, La. 2019. “China Construye El Túnel de Viento Hipersónico Más Rápido Del Mundo.” : 03–25.

<https://www.lavanguardia.com/vida/20180320/441721662616/china-construye-el-tunel-de-viento-hipersonico-mas-rapido-del-mundo.html> (November 24, 2019).

ZEBALLOS, GERARDO JAVIER ROJAS. 2008. “ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE DE VEHÍCULO TERRESTRE...”

9. ANEXOS

9.1.1 Encuesta

Para evidenciar la necesidad hallada en la universidad, enfocándonos en el programa de ingeniería mecánica, se realizó un estudio con un tipo de investigación exploratoria⁸ y analítica⁹; tomamos una muestra poblacional total de 190 personas, ya que en esta área tenemos una población de 340 personas, con posibilidad de integración de otras carreras hallándola de la siguiente manera:

$$\text{tamaño de muestra} = \frac{\frac{z^2 xp(1-p)}{e^2}}{1 + \left(\frac{z^2 xp(1-p)}{e^2 N}\right)}$$

Con un nivel de confianza del 95 %, un margen de error del 5% y un número de puntuación $z=1.96$

$$\text{tamaño de muestra} = \frac{\frac{(1.96)^2 x(0.5)(1-0.5)}{e^2}}{1 + \left(\frac{(1.96)^2 x(0.5)(1-0.5)}{e^2(340)}\right)}$$

$$\text{tamaño de muestra} = 181 \text{ personas.}$$

De acuerdo a la fórmula anterior, se realizó una encuesta virtual, para una muestra $N=181$ personas, titulada: “más allá de un software” para ratificar que el problema hallado es verídico, obteniendo los resultados, con un total de respuestas de 194, donde 69.1% de estas respuestas son del área de ingeniería, aproximadamente 134 personas, 13.4% del programa

⁸ Se realiza para conocer el contexto sobre un tema que es objeto de estudio.

⁹ Consiste fundamentalmente en establecer la comparación de variables entre grupos de estudio y de control.

de arquitectura, 14.4% de la sección de diseño, participando con interés en la encuesta de otras carreras un 3.1% de la población.

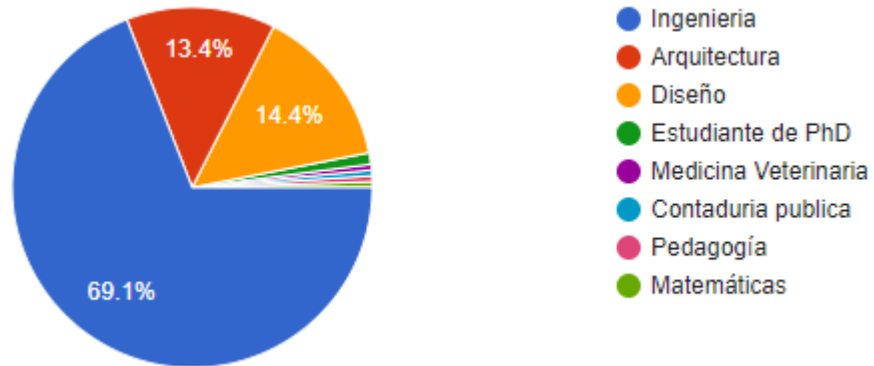


Imagen 50 Pregunta n°1 ¿Qué carrera estudia o ejerce?

Seguidamente tenemos la tabla 1, en la cual se encuentran las preguntas aplicadas y la tabla 2, donde mostramos las personas participantes y que profesión ejerce o cursa y la cantidad de repuestas obtuvo cada pregunta...

Numero de pregunta	Pregunta
1	¿Qué carrera estudias o ejerces?
2	¿conoces sistemas de túneles de viento?
3	¿sabía usted que la universidad tiene la intención de construir un túnel de viento?
4	¿crees necesario la creación de un sistema de túnel de viento en la universidad de Pamplona?
5	¿considera usted necesario la utilización de software en la facultad de ingeniería y arquitectura?
6	¿se facilita más un análisis de ejercicio de forma analítica o por medio de un software?
7	¿crees necesario una visualización del prototipo de túnel de viento antes de construirlo, de forma tal que se conozcan sus alcances y dimensiones?

Tabla 4 Preguntas de la encuesta: " Más allá de un software "

Profesión	Pregunta a 2		Pregunta a 3		Pregunta a 4		Pregunta a 5		Pregunta a 6		Pregunta a 7	
	si	no	si	no	si	no	si	no	software	analítico	si	no
									e	o		
INGENIERÍA	86	48	20	114	115	19	127	7	120	14	129	5
ARQUITECTUR A	17	9	5	21	22	4	23	3	19	7	21	5
DISEÑO	17	11	8	20	24	4	26	2	24	4	24	4
E. DE PHD	2	0	0	2	2	0	2	0	2	0	2	0
M. VETERINARIA	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0

C.PÚBLICA	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0
PEDAGOGÍA	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0
MATEMÁTICA	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0

Tabla 5 Resultados de la encuesta "Más allá de un software"

Al evidenciar lo anterior, sabemos que el 37.1%, como vemos en la imagen 3, no sabe qué es un túnel de viento, teniéndolo presente en sus vidas cotidianas, podemos reducir este porcentaje a un mínimo, gracias al software pionero para un posible túnel de viento físico, precisamente 69 personas, que deben conocer o haber visto un sistema de túnel de viento en lo cotidiano es decir tienen un conocimiento pequeño de un túnel de viento, no dominan por lo menos el concepto, dicha cifra se reduciría en un porcentaje considerable.

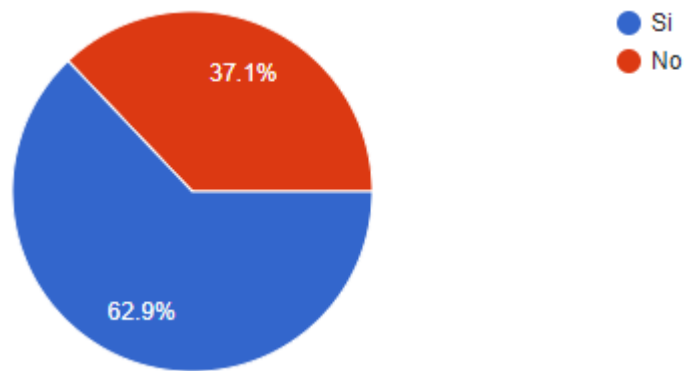


Imagen 51 Pregunta2 ¿conoces sistemas de túneles de viento?

Junto con el 85.6%, según la imagen 4, de las personas colaboradoras en la encuesta, estamos de acuerdo con que la practica hace al maestro, como mencionábamos anteriormente, ya que un software ayuda a generar a un aprendizaje más interactivo y rápido.

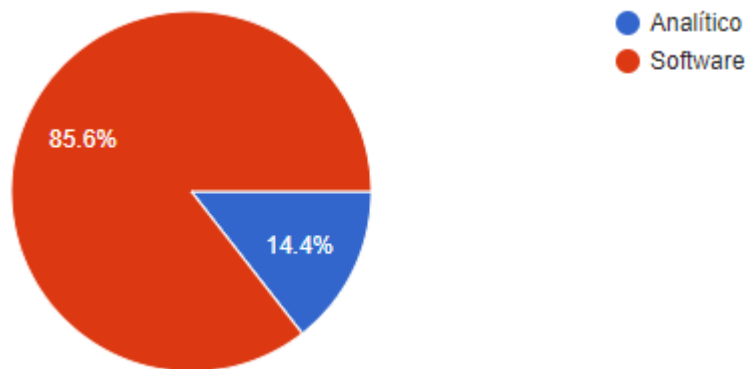


Imagen 52 Pregunta 6 ¿se facilita más un análisis de ejercicio de forma analítica o por medio de un software?

Con la ayuda de este cuestionamiento, podemos sostener la problemática hallada en la universidad, la problemática principal en Colombia, de la poca inversión en la educación junto con las nuevas tecnologías.

9.1.2 Planos en SolidWorks

En la carpeta anexos se permite la visualización de los cuerpos y planos que fueron contruidos con el fin de facilitar un análisis dinámico por medio de una simulación estos sistemas escogidos son: túnel cerrado con cámara cerrada, túnel de sistema soplador con cámara cerrada y túnel de succión con cámara cerrada. la Imagen 53 , Imagen 54 y Imagen 55 nos permiten la visualización de los sistema en general

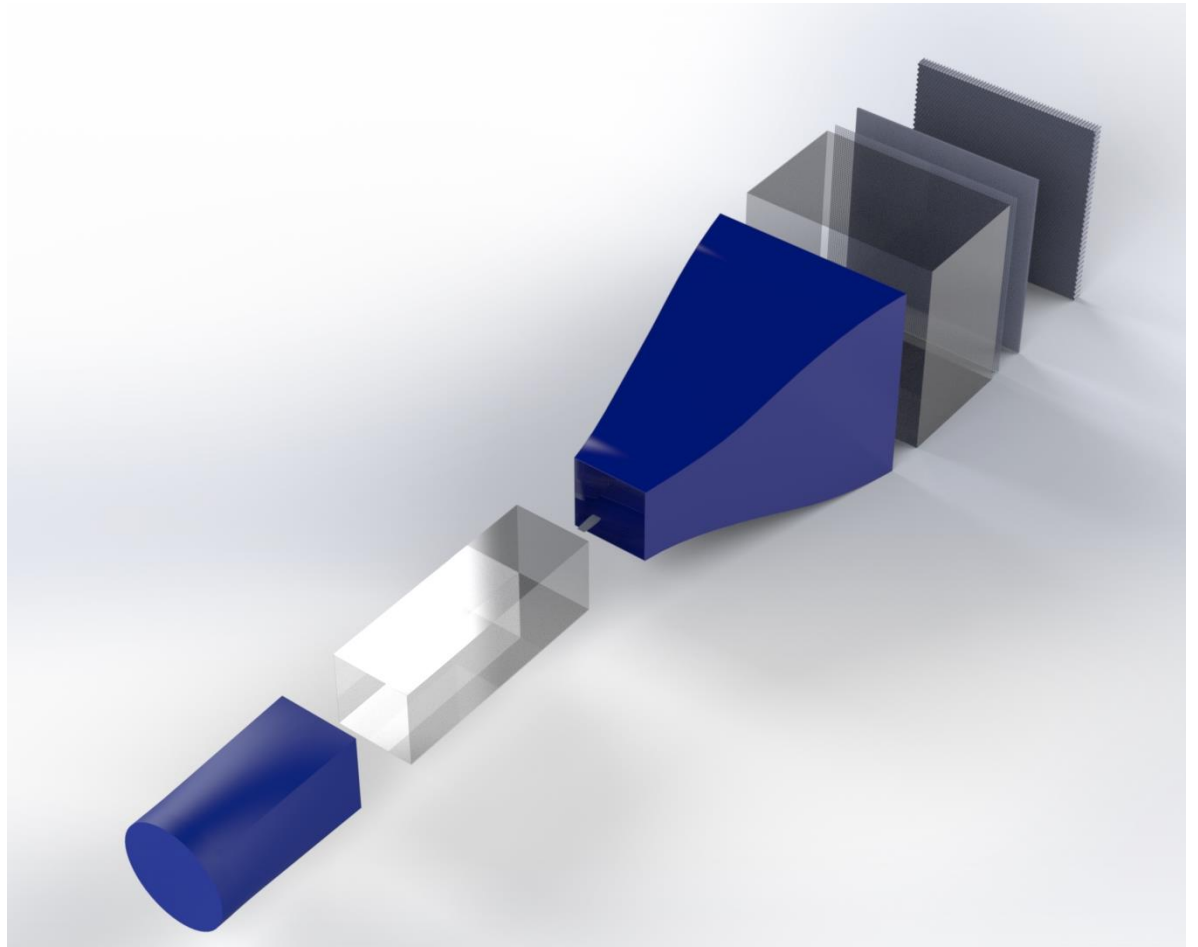


Imagen 53. Túnel de succión con cámara cerrada

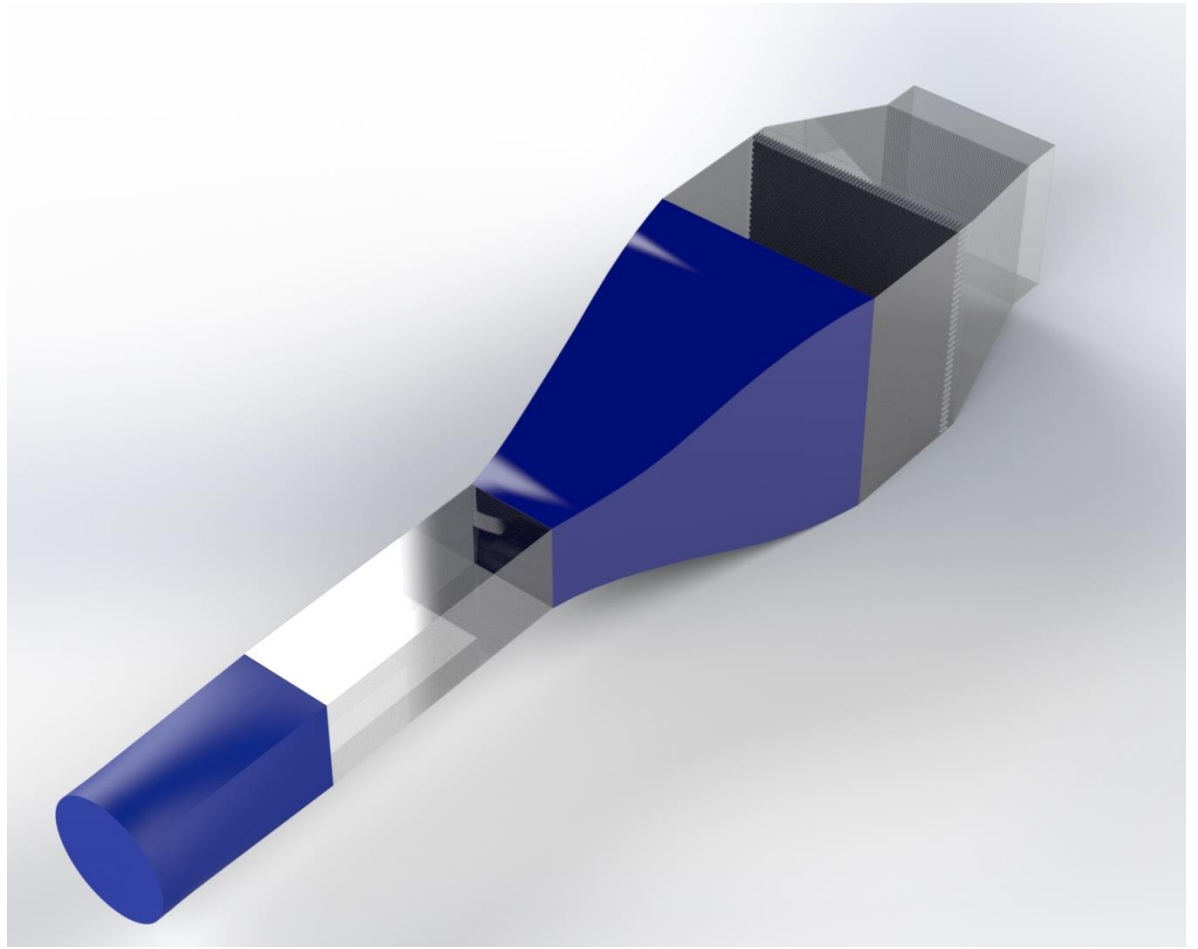


Imagen 54. Túnel soplador con cámara cerrada

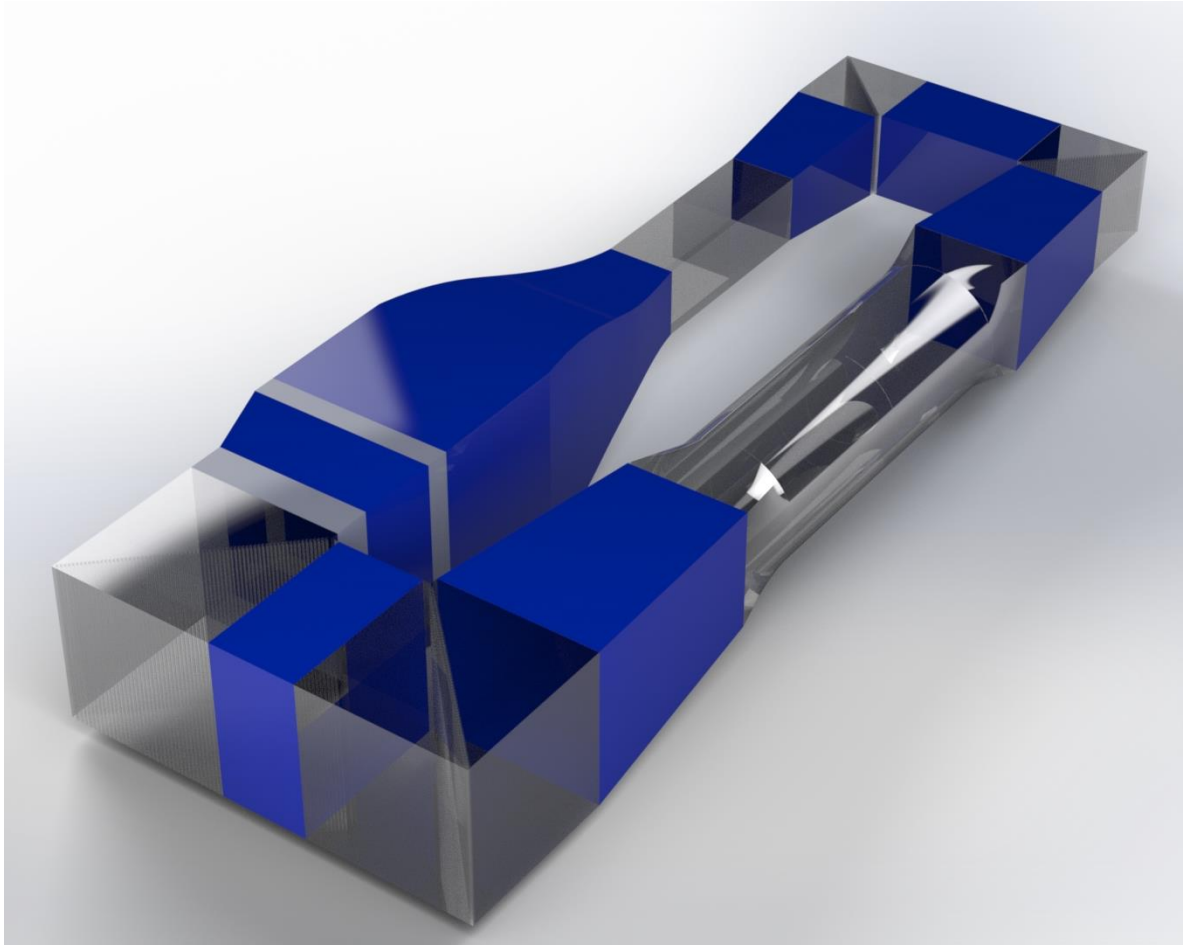


Imagen 55. Túnel cerrado con cámara cerrada

9.1.3 Aplicativo

El ejecutable que nos permite utilizar el programa para dimensionamiento los diferentes sistemas de túneles de viento se encuentra dentro de la carpeta anexos en una sub carpeta denominada output, junto con este archivo esta el video tutorial de como se ejecuta y utiliza el aplicativo