

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS

Propuesta de Diseño Técnico de un Túnel de Viento para la Realización de Pruebas en

Modelos y Diseño de Autopartes

Ing. Fredy Leonardo Morquecho Andrade

Universidad Internacional Sek

Nota de Autor

Ing. Fredy Leonardo Morquecho Andrade; Maestría en diseño mecánico; Universidad

Internacional SEK; Directora Ing. Diana Belén Peralta Zurita Msc.

Codirector: Ing. Jaime Vinicio Molina Osejos Msc.

Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a:

fmorquecho.mdm@uisek.edu.ec

Declaración Juramentada

Yo, Fredy Leonardo Morquecho Andrade, con cédula de identidad 030141241-7, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

FREDY LEONARDO MORQUECHO ANDRADE

C.I.: 030141241-7

Dedicatoria

A mi Madre, por su esfuerzo, sacrificio, comprensión y amor incondicional que han sido el pilar fundamental de mi vida y me ha impulsado a cumplir con las metas trazadas.

A mi Padre, quien ha demostrado que con trabajo y perseverancia se puede emprender un negocio, generar fuentes de empleo para sus hijos y ofrecer un servicio de calidad a la colectividad.

A mis hermanos, quienes me han demostrado que los sueños se pueden alcanzar con esfuerzo y constancia a pesar de los obstáculos que se presenten. Por sus palabras de aliento en momentos difíciles; su cariño, comprensión y apoyo, han sido mi motivación principal para cristalizar mis objetivos.

Agradecimiento

El conocimiento nos acerca a Dios y el saber nos convierte en seres más deseosos de mejorar nuestro mundo. La ciencia es el medio que nos permite acercarnos al conocimiento y lograr hacer real este deseo de mejora en nuestro medio. Esta simbiosis vivencial a lo largo de mi vida ha transcurrido estos dos aspectos mutuamente beneficiosos, los mismos que me han traído grandes satisfacciones personales, espirituales y profesionales. Por éste motivo, el presente estudio está dedicado a todos aquellos que comparten conmigo dicho amor por el conocimiento.

A Dios, por darme salud, fortaleza, responsabilidad y sabiduría para culminar otra etapa de mi desarrollo personal, académico y profesional.

A Msc. Diana Belén Zurita, Directora de Tesis, quien, con sus conocimientos, experiencia, paciencia y motivación, me ha guiado a finalizar con éxito este proyecto, el más sincero agradecimiento por su acertada asesoría.

A todos los catedráticos de la Universidad Internacional SEK, quienes con sus atinados consejos y enseñanzas han aportado significativamente a mi formación profesional.

Finalmente, un agradecimiento especial a todas las personas que colaboraron y se vieron involucradas en el desarrollo de este proyecto.

Índice de contenido

Declaración Juramentada	2
Dedicatoria.....	3
Agradecimiento	4
Índice de contenido	5
Índice de figuras.....	10
Índice de tablas.....	14
Índice de ecuaciones.....	15
Nomenclatura	17
Resumen.....	20
Abstract.....	21
Introducción	22
Antecedentes	23
Pruebas experimentales dentro del túnel de viento.	25
Planteamiento del problema	28
Objetivos	30
Objetivo general.....	30
Objetivos específicos	30
Justificación	30
Estudio del arte	32
Herramientas para el diseño del sistema.....	32
Trabajos realizados en túneles de viento	33
Fundamentos para el diseño aerodinámico	41
Definición de Túnel de Viento	41
<i>Clasificación de los túneles de viento</i>	<i>42</i>
<i>Características de los túneles</i>	<i>43</i>
<i>Partes de un túnel aerodinámico</i>	<i>44</i>
Fundamentos de la mecánica de fluidos.....	45

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

<i>Número de Reynolds</i>	46
<i>Número de Mach</i>	46
Régimen del flujo	47
<i>Régimen laminar</i>	47
<i>Régimen turbulento</i>	47
<i>Ecuación de Colebrook – White</i>	48
<i>El Ábaco de Moody</i>	49
<i>Capa límite</i>	49
Justificación de la elección de un tipo de túnel de viento	50
Normativa vigente	51
<i>Fuente Fija</i>	51
Formulación de la hipótesis	52
Método	53
Tipo de estudio.....	53
Modalidad de investigación	53
Metodología	53
Diseño de las partes del túnel.....	55
<i>Cámara de ensayos</i>	55
<i>Difusores</i>	58
<i>Codos</i>	60
<i>Cámara de estabilización</i>	61
<i>Tobera</i>	62
<i>Sección impulsadora</i>	64
Cálculo de pérdidas en los ductos y secciones del túnel de viento.	68
<i>Difusores</i>	68
<i>Codos</i>	69
<i>Tobera o boquilla</i>	70
<i>Ductos rectos</i>	72
<i>Cámara de estabilización</i>	72
Revisión de literatura	74
Población y muestra	74
Alternativas de selección.....	75
Criterios de selección.	75

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Selección de instrumentos de investigación	79
Validez y confiabilidad de los instrumentos	81
Materiales y equipos.	81
Diseño e implementación y simulación	81
Simulación	83
Primera simulación (túnel vacío y sin la malla de estabilización)	83
Segunda simulación (túnel vacío y con la malla de estabilización)	86
Tercera simulación (túnel con vehículo y con la malla de estabilización)	87
Construcción del prototipo del túnel de viento	90
Propuesta de costos.	93
Resultados.....	95
Presentación y análisis de resultados	95
Dimensionamiento de ductos.	96
<i>Cámara de pruebas</i>	96
<i>Difusores</i>	97
<i>Codos</i>	99
<i>Tobera/inyector</i>	101
<i>Cámara de Estabilización</i>	103
<i>Cálculo de Pérdidas generadas en los ductos</i>	104
Cálculo del costo de un túnel con concreto.....	106
Cálculo del costo de un túnel con acero.....	107
<i>Costo de la malla de la cámara de estabilización</i>	108
Costo de dispositivos electrónicos	109
Simulación	111
Primera simulación. Túnel de viento vacío y sin malla de estabilización.	111
<i>Velocidad de entrada 155Km/h</i>	111
<i>Velocidad de entrada de 103 Km/h</i>	113
<i>Velocidad de Entrada 86 Km/h</i>	114
<i>Resultados CASO 1 material de paredes Concreto</i>	116
<i>Resultados CASO 2 material de paredes Acero al carbono</i>	117
Segunda simulación (Túnel de viento vacío y con malla de estabilización).....	118
Tercera simulación (Túnel de viento con vehículo y con malla de estabilización). .	121
Prototipo.....	124

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Gráficas obtenidas del túnel de viento a través del programa Arduino.	124
<i>Gráfico de la presión</i>	124
<i>Gráfico de la temperatura</i>	125
<i>Gráfica de la velocidad</i>	125
Discusión de resultados	126
Análisis de resultados	127
Dimensionamiento	127
Análisis de pérdidas	127
Costos de fabricación.....	128
Simulación.	128
Primera simulación. Túnel vacío sin malla de estabilización	128
<i>Comparación de velocidades con los materiales de acero y concreto</i>	131
<i>Comparación de presiones con los materiales de acero y concreto</i>	132
Segunda simulación. Túnel con malla estabilizadora.	132
Tercera Simulación. Túnel con el vehículo y la cámara de estabilización.	135
Conclusiones	137
Recomendaciones	139
Bibliografía	140
Anexos	146
Anexo A: Parámetros para el dimensionamiento del fan.....	146
Anexo B: Parámetros para el dimensionamiento de los álabes	147
Anexo C: Proceso de mallado del túnel con la cámara de estabilización	148
Anexo D: Programación para el desarrollo las gráficas del prototipo	149
Arduino	150
Sketch Usado para conectar 2 sensores BMP-180	152
Linux	155
Anexo E: Desarrollo del modelo matemático en Matlab.....	160
Desarrollo del perfil de la tobera.....	160
Cálculo de pérdidas en los ductos	160
<i>Codos pequeños</i>	160
<i>Codos grandes</i>	161
<i>Primer difusor</i>	162

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

<i>Segundo difusor</i>	163
<i>Cámara de estabilización</i>	164
<i>Tobera</i>	165
<i>Ductos rectos</i>	166
Anexo F: Medidor de presión	168
Anexo G: Medidor de Flujo másico.....	171
Anexo H: Medidor de Flujo másico.....	175
Anexo I: Planos del túnel de viento	176

Índice de figuras

<i>Figura 1.</i> Túnel de viento a escala (Laboratorio de termo fluidos de la facultad de ingeniería en mecánica y ciencias de la producción (FIMCP))	22
<i>Figura 2.</i> Interacción dinámica entre un cuerpo sólido y un flujo de aire (F1aldia, 2010)	26
<i>Figura 3.</i> Esquema general de un túnel de viento (F1aldia, 2010)	26
<i>Figura 4.</i> Balance del sector automotor (EL Telegrafo, 2017).....	28
<i>Figura 5.</i> Túnel de viento a escala 1:10 (Calautit et al., 2015).....	33
<i>Figura 6.</i> Comparación de resultados (Calautit et al., 2015)	34
<i>Figura 7.</i> Simulación del automóvil si partes externas (Olivares de Jodar, 2011)	34
<i>Figura 8.</i> Alerones traseros (Olivares de Jodar, 2011)	35
<i>Figura 9.</i> Difusores (Olivares de Jodar, 2011)	36
<i>Figura 10.</i> Simulación software CFD (Olivares de Jodar, 2011)	36
<i>Figura 11.</i> Deflectores (Benalcázar Venegas, 2015)	39
<i>Figura 12.</i> Túnel de viento de lazo cerrado (Benalcázar Venegas, 2015)	39
<i>Figura 13.</i> CFD Solidworks.....	40
<i>Figura 14.</i> CFD ANSYS	41
<i>Figura 15.</i> Túnel de viento de circuito abierto	43
<i>Figura 16.</i> Un túnel de viento de circuito cerrado	44
<i>Figura 17.</i> Esquema genérico de un túnel de viento de retorno cerrado	45
<i>Figura 18.</i> Flujo laminar y turbulento.....	48
<i>Figura 19.</i> Ábaco de Moody (White, 2010)	49
<i>Figura 20.</i> Esquema de capa límite.....	50
<i>Figura 21.</i> Túnel de viento.....	54
<i>Figura 22.</i> Cámara de ensayos	56
<i>Figura 23.</i> Difusor	58

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO	11
<i>Figura 24.</i> Bidimensional (a), cónico (b), and anular (c)	59
<i>Figura 25.</i> Difusor	60
<i>Figura 26.</i> Codo	60
<i>Figura 27.</i> Cámara de estabilización	61
<i>Figura 28.</i> Cámara de estabilización	61
<i>Figura 29.</i> Contracción	62
<i>Figura 30.</i> Difusor	62
<i>Figura 31.</i> Tobera	64
<i>Figura 32.</i> Sección impulsadora	65
<i>Figura 33.</i> Sección Geométrica de un perfil aerodinámico	66
<i>Figura 34.</i> Corona del fan	68
<i>Figura 35.</i> Mallado para la cámara de ensayos por Ansys	80
<i>Figura 36.</i> Modelo 3-D del túnel de viento en Ansys.....	82
<i>Figura 37.</i> Entrada y salida del túnel de viento en Ansys	83
<i>Figura 38.</i> Mallado de 0,05m para los ductos del túnel sin malla de estabilización	84
<i>Figura 39.</i> Túnel sin la malla de estabilización.	85
<i>Figura 40.</i> Túnel con un material determinado.....	85
<i>Figura 41.</i> Mallado de túnel con la malla de estabilización.	86
<i>Figura 42.</i> Túnel con la malla de estabilización.	87
<i>Figura 43.</i> Túnel de viento con el vehículo en el interior.....	87
<i>Figura 44.</i> Mallado del túnel de viento con el vehículo.	88
<i>Figura 45.</i> Esquematización de los módulos para la simulación.....	88
<i>Figura 46.</i> Simulación del túnel con el vehículo.	90
<i>Figura 47.</i> Resultados de la presión del viento con malla (Flashforge Finder 3D Printer, 2017)	90

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

<i>Figura 48.</i> Resultados de la presión del viento con malla.	91
<i>Figura 49.</i> Túnel de viento completo.	95
<i>Figura 50.</i> Cámara de ensayos.	96
<i>Figura 51.</i> Primer difusor.	98
<i>Figura 52.</i> Segundo difusor.	98
<i>Figura 53.</i> Pérdidas en los codos inferiores.	99
<i>Figura 54.</i> Medidas de los codos pequeños.	100
<i>Figura 55.</i> Pérdidas en los codos superiores.	100
<i>Figura 56.</i> Medidas de los codos grandes.	101
<i>Figura 57.</i> Pérdidas en los codos superiores.	102
<i>Figura 58.</i> Dimensiones de la tobera.	103
<i>Figura 59.</i> Dimensiones de la tobera.	104
<i>Figura 60.</i> Medidor de presión (GmbH, n.d.)	109
<i>Figura 61.</i> Medidor de velocidad (spanish.alibaba.com, n.d.-b).....	109
<i>Figura 62.</i> Medidor de velocidad (Products, n.d.).....	110
<i>Figura 63.</i> Medidor de velocidad (Products, n.d.).....	110
<i>Figura 64.</i> Velocidad en el túnel y la cámara de pruebas. (entrada 155 Km/h)	111
<i>Figura 65.</i> Presión el túnel y la cámara. (velocidad de entrada 155 K m/h)	112
<i>Figura 66.</i> Velocidad en el túnel y cámara, velocidad de entrada 103 Km/h.	113
<i>Figura 67.</i> Presión en el túnel y cámara, velocidad de entrada 103 Km/h.	114
<i>Figura 68.</i> Velocidad en el túnel y cámara, velocidad de entrada 86 Km/h.	115
<i>Figura 69.</i> Presión en el túnel y cámara, velocidad de entrada 86 Km/h.	116
<i>Figura 70.</i> Comportamiento del fluido con concreto.	117
<i>Figura 71.</i> Comportamiento del fluido con acero.	118
<i>Figura 72.</i> Temperatura en túnel de viento.	119

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

<i>Figura 73.</i> Líneas de flujo del túnel de viento.	119
<i>Figura 74.</i> Velocidad del túnel de viento con malla - velocidad de entrada 250 Km/h. ..	120
<i>Figura 75.</i> Resultados de la presión del viento con malla, velocidad de 250 km/h.....	120
<i>Figura 76.</i> Resultados de la presión del viento con malla, velocidad de 250 km/h.....	121
<i>Figura 77.</i> Túnel de viento con vehículo vista isométrica.....	122
<i>Figura 78.</i> Túnel de viento con vehículo, vista superior.	122
<i>Figura 79.</i> Túnel de viento con el vehículo vista inferior.....	123
<i>Figura 80.</i> Presión del túnel de viento con el vehículo.....	123
<i>Figura 81.</i> Gráfico de presión del prototipo.	124
<i>Figura 82.</i> Gráfico de temperaturas del prototipo.	125
<i>Figura 83.</i> Gráfico de temperaturas.	125
<i>Figura 84.</i> Comparación de velocidades en la cámara de ensayos.....	129
<i>Figura 85.</i> Comparación de velocidades en los ductos.....	129
<i>Figura 86.</i> Comparación de las presiones estáticas.	130
<i>Figura 87.</i> Comportamiento de la velocidad con distintos materiales.....	131
<i>Figura 88.</i> Comportamiento de la presión con distintos materiales.	132
<i>Figura 89.</i> Comportamiento del fluido con acero.....	133
<i>Figura 90.</i> Índice de turbulencias.	134
<i>Figura 91.</i> Índice de turbulencias.	134
<i>Figura 92.</i> Vista frontal.....	135
<i>Figura 93.</i> Índice de turbulencias.	136

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de los túneles de viento según el rango de velocidades	42
Tabla 2. Niveles de presión sonora	51
Tabla 3. Velocidades del viento utilizadas por distintas marcas	57
Tabla 4. Rugosidades de materiales	73
Tabla 5. Propiedades Físicas del aire a presión atmosférica.	74
Tabla 6. Matriz de selección de vehículos.	75
Tabla 7. Dimensiones de Vehículos	76
Tabla 8. Autopartes que ayudan a la aerodinámica de los vehículos	77
Tabla 9. Matriz de selección de las marcas de vehículos.....	79
Tabla 10. Modelo matemático de la simulación.	89
Tabla 11. Primer cálculo de pérdidas para los ductos.	105
Tabla 12. Primer cálculo de pérdidas para los ductos.....	106
Tabla 13. Costos de cada ducto.....	108

Índice de ecuaciones

Ecuación (1) Área del difusor	37
Ecuación (2) Área de la contracción	37
Ecuación (3) . Curva de contracción	37
Ecuación (4) Porosidad en el alisador de flujo.....	38
Ecuación (5) Número de Reynolds	46
Ecuación (6) Número de Mach	46
Ecuación (7) Ecuación de Colebrook – White	48
Ecuación (8) Ángulo de inclinación del difusor.....	58
Ecuación (9) Ángulo de inclinación del difusor.....	59
Ecuación (10) Relación de longitud	63
Ecuación (11) Cuerda del perfil	65
Ecuación (12) Relación espesor cuerda	65
Ecuación (13) Rendimiento de los rectificadores	66
Ecuación (14) Rendimiento de los rectificadores	66
Ecuación (15) Coeficiente de flujo axial.....	67
Ecuación (16) Relación de elevación y arrastre.....	67
Ecuación (17) Coeficiente de flujo rotacional.....	67
Ecuación (18) Régimen de giro.....	67
Ecuación (19) Tangente de ángulo de flujo interno	68
Ecuación (20) Pérdidas en el difusor.....	68
Ecuación (21) Polinomio del factor experimental.....	69
Ecuación (22) Pérdidas codos	69
Ecuación (23) Factor de pérdidas por fricción en codos	69
Ecuación (24) Factor de pérdidas por la deflexión del flujo	70

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Ecuación (25) Caída de presión de Darcy	71
Ecuación (26) Pérdidas en la tobera	71
Ecuación (27) Factor de pérdidas promedio de la boquilla o tobera.....	71
Ecuación (28) Pérdidas en ductos rectos	72
Ecuación (29) Pérdidas En la cámara de estabilización	72

Nomenclatura

D_1 : Diámetro hidráulico de la sección de entrada.

A_r : Relación de áreas.

C_d : Velocidad de arrastre

C_l : Velocidad de elevación.

C_s : Cuerda del perfil.

D_h : Diámetro hidráulico de cada ducto de la cámara de estabilización

D_{hc} : Diámetro hidráulico del codo.

D_{hsc} : Diámetro hidráulico de la cámara de estabilización.

D_{hts} : Diámetro hidráulico de la cámara de pruebas.

D_n : Diámetro hidráulico de cada sección de la tobera.

K_D : Pérdidas en el difusor.

K_c : Pérdidas en codos.

K_{ex} : factor de pérdidas por expansión.

K_{fc} : Factor de pérdidas por fricción en codos.

K_{nt} : Pérdidas en la boquilla.

K_δ : Factor de pérdidas por la deflexión del flujo.

$K_{\lambda d}$: Factor de pérdidas por fricción del difusor.

L_h : Longitud de cada ducto de la cámara de estabilización.

L_h : Longitud de un ducto de la cámara de estabilización.

L_n : Longitud de la zona de reducción, boquillas o tobera.

N_s : Número de rectificadores

R_0 : Radio del codo.

R_{imp} : Radio de la sección impulsadora del ventilador

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

T_0 : temperatura de estancamiento.

V_n : Velocidad media del ducto.

d_w : Diámetro del alambre.

f_{av} : Coeficiente de fricción de la boquilla.

k_{fs} : Coeficiente de aumento de presión Global.

k_s : Pérdidas del rectificador.

k_t : Pérdidas en ductos rectos

r_e : Radio entrada de la tobera

r_g : Radio geométrico de la sección

r_s : Radio de salida de la tobera.

t_s : Espesor del perfil.

β_h : Porosidad (número de ductos cámara de estabilización).

ε_{rot} : Coeficiente de flujo rotacional

η_{fs} : Eficiencia de la sección impulsadora.

θ_e : Ángulo cónico de expansión

λ_h : Factor de fricción de cada ducto de la cámara.

λ_f : Coeficiente de flujo

C: Velocidad del sonido.

D: Diámetro hidráulico del conducto.

h : Altura de contracción.

h_i : Radio de entrada.

h_o : Radio de salida.

k: coeficiente adiabático.

L: Longitud.

R: constante universal de los gases.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Re : Reynolds basado en el diámetro hidráulico.

V : Velocidad.

β : Coeficiente de porosidad de malla.

Ω : Régimen de giro de la sección impulsadora

A_e : Área a la entrada de la tobera.

A_s : Área a la salida de la tobera.

R_c : Radio de compresión.

f : Factor de fricción de Darcy.

δ : Ángulo de deflexión de la corriente.

ε : Rugosidad de la tubería.

μ : Viscosidad dinámica del fluido.

ρ : Densidad del fluido.

ϑ : Viscosidad cinemática.

ϕ : Ángulo de flujo interno.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Resumen

En este proyecto de diseño técnico se plantea la propuesta de diseñar un túnel de viento de circuito cerrado a escala real para el desarrollo de pruebas e investigaciones en autopartes y vehículos de tamaño real.

Como parte de la metodología de trabajo se recurrió a la investigación bibliográfica y estudios actuales para fundamentar la influencia del viento sobre los vehículos de gama común tipo sedán y establecer los distintos parámetros para obtener el correcto dimensionamiento de la cámara de pruebas. Esta información fue la base para realizar los cálculos y obtener las medidas de los demás componentes del túnel de circuito cerrado.

Aplicando diversos softwares como *MatLab*, *Solidworks* y *Fluent by Ansys*, fue posible inicialmente, obtener los modelos matemáticos que reflejaron las medidas de los componentes del túnel y calcular las pérdidas de velocidad del aire, así como realizar el CAD del túnel en 3D, que permitió demostrar su forma geométrica y establecer un estimado tentativo de costos de fabricación. Finalmente, fue posible obtener resultados simulados en tres tipos de condiciones: Túnel de viento con cámara de pruebas vacía, con malla de estabilización y con el vehículo en la cámara de ensayos, bajo un rango de velocidad del aire de 85-300 Km/h.

Los resultados identificados en las conclusiones muestran que existe mayor presión en los codos superiores debido a la forma geométrica de la tobera, la misma que influye en que la velocidad del aire alcance magnitudes superiores a los 800 Km/h en la cámara de pruebas. De la misma forma, se pudo identificar que en la zona de ensayos se genera el mayor porcentaje de pérdidas de presión como resultado del aumento de la velocidad.

Palabras Claves: Simulación, Diseño Técnico, Túnel de Viento de circuito cerrado

Abstract

This technical design project puts forward the proposal of designing a real scale closed-circuit wind tunnel to perform tests and research in auto parts and real size vehicles.

As part of the research methodology a thorough bibliographic research and current studies were reviewed to substantiate the influence of wind over ordinary sedan vehicles and establish the different parameters to obtain the appropriate dimensions of the test chamber. The aforementioned data was the foundation to determine the calculations and measurements needed for the rest of the closed-circuit tunnel components.

Applying diverse software like *MatLab*, *Solidworks*, and *Fluent by Ansys*, it was possible to initially obtain the mathematical models that generated the measurements of the tunnel components and the calculations for the losses in air speed, as well as performing the CAD design of the 3D tunnel, which allowed the demonstration of its geometrical shape and also made possible to establish an estimated fabrication cost approximation. Finally, it permitted getting simulation results in three types of conditions: using an empty test chamber, using a stabilization net, and with a vehicle in the test chamber, under an air speed range of 85-300 Km/h.

The results identified in the conclusions show that there is a higher pressure in the upper area due to the geometrical shape of the air nozzle, which allows the wind speed to reach magnitudes higher than 800 Km/h in the test chamber. Likewise, it was possible to identify that in the test chamber a higher percentage of pressure loss is generated as a result of the speed increase.

Keywords: Simulation, Technical Design, Closed-circuit Wind Tunnel

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Introducción

El desarrollo tecnológico en los vehículos cada día avanza más, las diferentes empresas destinadas al diseño y a la construcción buscan tener las mejores prestaciones en cuanto a potencia con un menor consumo de combustible. Toda esta mejora se debe a la constante investigación sobre cada uno de los componentes que conforma el vehículo (Ramírez, 2010).

La tecnología desarrollada en los motores de los vehículos ha dado como resultado altas velocidades lo que genera dificultad en la conducción, por ello la necesidad de disponer de componentes aerodinámicos que generen una fuerza hacia abajo y mantenga al vehículo contra el suelo y lo haga más estable y seguro durante la conducción. Para realizar estudios del comportamiento de los autos a altas velocidades, la herramienta más adecuada es el túnel de viento, que es un dispositivo en donde se coloca el modelo en que se va analizar y aire impulsado por un ventilador al final del túnel simule estados de funcionamiento real interactuando el fluido con la superficie del objeto (Universidad Nacional de La Plata, 2014). En la figura 1, se muestra un túnel a escala.



Figura 1. Túnel de viento a escala (Laboratorio de termo fluidos de la facultad de ingeniería en mecánica y ciencias de la producción (FIMCP))

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Antecedentes

Un túnel de viento es aplicable para analizar modelos de elementos que se mueven en un fluido, en este caso el análisis es de elementos que interactúan en el aire como es el caso de aeronaves, vehículos y motocicletas. A nivel mundial existen múltiples trabajos con respecto al diseño y puesta en marcha de túneles para modelos a escala real (Barila & Zucas, n.d.).

Muchas de las universidades y constructores de autos cuentan con un túnel de viento para las pruebas preliminares de sus nuevos modelos. Uno de los trabajos que se puede destacar como un estudio reciente es el realizado en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla en el cual se diseña un túnel a escala y empieza con un análisis del tipo de túnel de viento que trabaje mejor para el estudio de vehículos aeroespaciales, se enmarca en estudio de fluidos para encontrar las dimensiones necesarias para cubrir el estudio de la mayor cantidad de naves (Martínez Coza, 2016).

En el Ecuador hay túneles de viento a escala instalados en laboratorios de estudio de fluidos en universidades como la Escuela Politécnica Nacional, Escuela Politécnica del Ejército, y por lo general son abiertos a la atmósfera por la ventaja de incluir en el fluido tintas y polvos para que los estudiantes puedan observar el comportamiento del aire sobre un elemento aerodinámico.

Un ejemplo de este tipo de túneles de viento es el desarrollado por la Escuela Politécnica del Ejército Extensión Latacunga como trabajo de pregrado de un modelo subsónico con aplicaciones didácticas. El comportamiento del aire dentro del túnel se simula en *SolidWorks Simulation*. Además se desarrollaron los flujogramas de construcción del equipo y selección de equipos en los que se incluye el ventilador axial y el equipo electrónico necesario para el control (Pineda & Vega, 2010).

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Los trabajos que a continuación se revisan son tesis desarrolladas en las universidades que tienen la carrera de ingeniería mecánica y mecánica automotriz.

La tesis de grado para ingeniería desarrollada en la ESPE extensión Latacunga por: Pineda, D. y Vega W. (2010). Diseño y construcción de un túnel de viento subsónico con sistemas de admisión de datos para el estudio de la aerodinámica de los vehículos. Se basa en los valores de velocidad máxima del túnel de viento real que alcanza valores hasta de 47 m/s mientras que en el diseño en 3D modelado en *SolidWorks* y simulado en *Floworks* es de 50 m/s (Pineda & Vega, 2010).

La tesis de maestría desarrollada en México en el Instituto Politécnico Nacional, “Caracterización del túnel de viento de velocidad baja del LABINTHAP” (Rosas, 2010). En dicho trabajo se caracterizó la velocidad del viento de las distintas zonas del túnel en función de la capa límite, perfiles de velocidad, flujo en las esquinas y nivel de turbulencia para así establecer los puntos estándares para calibrar instrumentos de velocidad del aire en intervalos de 5 m/s a 30 m/s.

Tesis de ingeniería técnica mecánica industrial en la Universidad Carlos III de Madrid con el título: Diseño y análisis computacional para túnel de viento de baja velocidad (Muñoz, 2012). En el cual se desarrolla el estudio de un túnel de viento de ciclo cerrado y sección de ensayo cerrada. El diseño se enfoca en evitar bordes esquinados que generen vórtices turbulentos. Y se utilizan deflectores de una sola pieza para disminuir el costo de construcción. Para garantizar el diseño se hace además un estudio en 2D del desarrollo del flujo por todo el túnel, para analizar presiones, temperaturas, turbulencias y velocidades.

Tesis de ingeniería de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas de Panamá. Diseño y construcción de un túnel de viento, (Chicas, 2012). Este diseño se enfoca en las pruebas que puedan realizar los estudiantes de la universidad, es decir

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

con fines inicialmente académicos. Las pruebas consisten en montar modelos a escala de perfiles álabes u objetos de geometrías simples (esferas, conos, cubos), para visualizar el campo de flujo, y medición de fuerzas aerodinámicas, entre otras pruebas que pueden ser realizadas, pero que no son contempladas en este proyecto.

Tesis de Grado en Ingeniería Aeroespacial en Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla elaborado por Martínez D. (2016), Diseño y construcción de un túnel de viento para ensayos en régimen subsónico y transónico. El conocimiento del comportamiento del flujo es de gran importancia, dado que éste definirá las pérdidas que se producirán en el túnel. Su optimización es crucial ya que el resultado determinará la potencia que será necesaria imprimírle al flujo para mantenerlo en movimiento en régimen estacionario. Es por ello que el análisis de las pérdidas en los elementos del túnel tendrá una importante repercusión en el diseño.

Tesis de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación trabajo desarrollado para la obtención de ingeniero técnico industrial mecánico en Pamplona por: García D. y Marcelino S. (2010), Estudio de la capacidad aerodinámica de carrocerías de vehículos categoría CM. SILVER CAR es una empresa Navarra ubicada en Peralta dedicada al mundo del automovilismo. Su creador Juan Carlos Silvestre (SILVER CAR) se centra en el desarrollo de prototipos de vehículos de carreras de la categoría CM SILVER CAR, ha sido capaz de desarrollar varios prototipos, siendo su principal apuesta el desarrollado para categoría CM, que ha logrado el campeonato de España hasta el día de hoy el mejor coche existente.

Pruebas experimentales dentro del túnel de viento.

Barlow, Rae Jr, & Pope (1999) mencionan que es difícil obtener la instrumentación necesaria y adecuada para realizar ensayos en un túnel de viento, así como la información

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

teórica necesaria para llevar a cabo una metodología de ensayo adecuada para obtener resultados de las pruebas.

Sin embargo, el túnel de viento constituye un equipo especial de pruebas experimentales, en el que se busca conocer la interacción dinámica entre un cuerpo sólido en estudio y el flujo uniforme del aire a diversas condiciones de velocidad, con la finalidad de evaluar el comportamiento del fluido dinámico, energético, aerodinámico y estabilidad del modelo analizado. Así como se muestra en la figura 2.

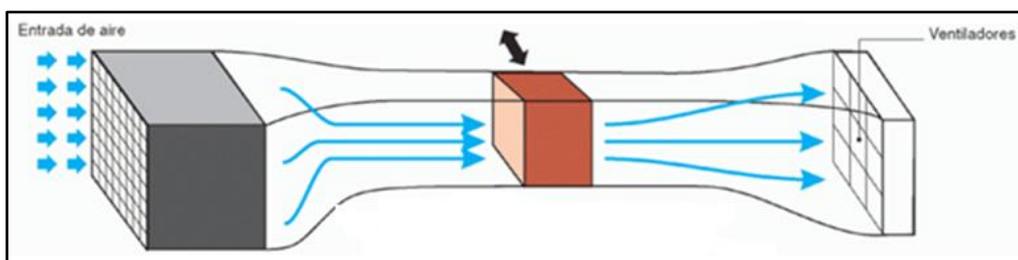


Figura 2. Interacción dinámica entre un cuerpo sólido y un flujo de aire (F1aldia, 2010)

El túnel de viento presenta en su estructura secciones que son peculiares y de determinadas características, las cuales se muestran en la figura 3. La función de cada zona se presenta enseguida.

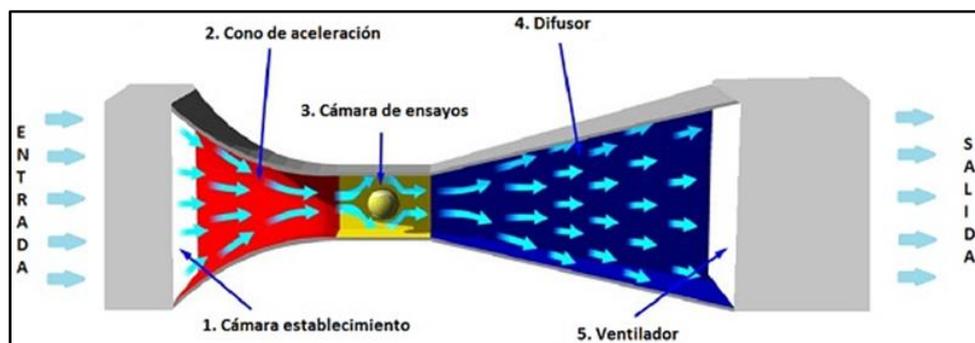


Figura 3. Esquema general de un túnel de viento (F1aldia, 2010)

1. Cámara de establecimiento: Su función es enderezar y uniformizar el flujo de aire.
2. Cono de aceleración: En esta sección se da un incremento de la velocidad del flujo manteniéndolo ordenado y uniforme.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

3. Cámara de ensayos: Es la parte más importante del túnel. Es dónde se coloca el objeto que se quiere estudiar y realizar las mediciones. Es muy importante que el flujo que la atreviese sea lo más uniforme posible.
4. Difusor: Una vez el aire que sale de la cámara de ensayos, el difusor reduce la velocidad del flujo mediante su perfil divergente. La velocidad del aire a la salida está relacionada con las pérdidas energéticas del túnel. A menor velocidad, menores son las pérdidas.
5. Ventilador: Crear un flujo de aire a una velocidad determinada. Normalmente llevan aparatos electrónicos que mediante los cuales puede proporcionar distintas potencias que varíen la velocidad del ventilador, para que las pruebas se realicen en las condiciones que se desee.

El conocimiento del comportamiento del flujo es de gran importancia, dado que éste definirá las pérdidas que se producirán en el túnel. Su optimización es crucial ya que el resultado determinará la potencia que será necesaria imprimirle al flujo para mantenerlo en movimiento en régimen estacionario. Es por ello que el análisis de las pérdidas en los elementos del túnel tendrá una importante repercusión en el diseño.

Es necesario mencionar que las dimensiones físicas del túnel de viento vendrán limitadas por el ensayo más exigente que se pretenda realizar, que está limitado por las medidas externas del modelo (Martínez Coza, 2016), en este proyecto los autos en estudio serán seleccionados a través de un proceso de matrices con alternativas de mayor existencia y comercialización en el mercado ecuatoriano. Por ello se analizarán las características de una serie de laboratorios equipados con túnel de viento que realizan ensayos aerodinámicos y determinar aquél que cumpla con los mayores requerimientos para el diseño del túnel. Será necesario el uso de números adimensionales estrictamente relacionados con la mecánica de

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

fluidos y que interviene en los cálculos de pérdidas y operación del mismo y corresponden al número de Reynolds, Mach, etc.

Entre las principales ventajas del túnel de viento, están la optimización en el diseño, así como el ahorro en tiempo y economía para las pruebas y ensayos de nuevos modelos.

El diseño y fabricación de un túnel de viento a escala real en el Ecuador, no sólo se justifica por el hecho de que en el país no existe, sino por optimizarlo en condiciones técnicas, económicas y confiables de operación, frente al mercado internacional de autopartes.

Este proyecto se presenta como un estudio previo para que las empresas dedicadas a la fabricación de autopartes automotrices en el Ecuador tengan una visión hacia la construcción de este sistema como meta al incremento de la producción nacional de autopartes.

Planteamiento del problema

La industria automotriz en el Ecuador experimentó en 2016 la comercialización más baja desde el 2012, se espera que para el 2017 la venta se incremente del 16 al 19% (El Telegrafo, 2017). En la figura 4 se muestra el balance del sistema automotor.

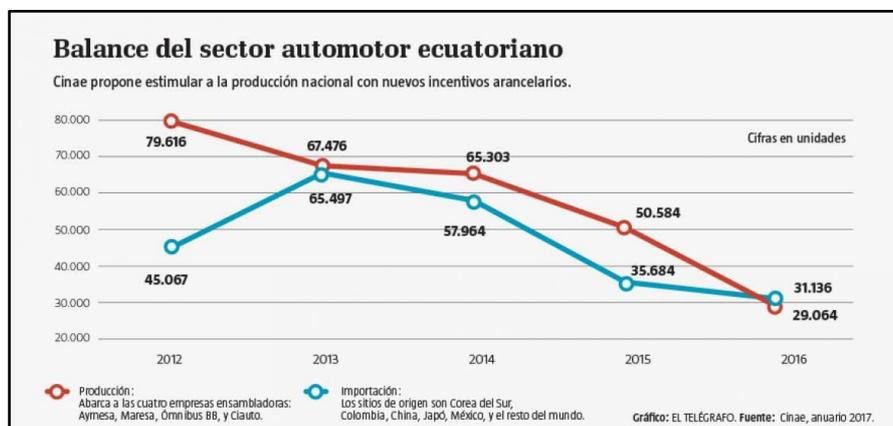


Figura 4. Balance del sector automotor (El Telegrafo, 2017)

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Desde el 2012 como normativa se estableció que las ensambladoras tengan un 5% de material originario ecuatoriano (MOE), que generó una presión por fabricar autopartes con calidad comparable a las que se importan desde Corea, China, Taiwán, Brasil, entre otros. Por lo que desde el 2015 por el cambio de la matriz productiva se invirtió en maquinaria especializada para este fin, desde entonces fabrican autopartes y se intenta exportarlas a países como Colombia, Venezuela y Bolivia. Además de abastecer a ensambladoras locales, también se instalaron laboratorios tecnológicos para analizar las piezas elaboradas e iniciar un desarrollo automotriz (EL Telegrafo, 2017).

Con la presencia del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional y la creación del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) se instalaron centros de monitoreo, que cuentan con instrumentos y sensores ubicados en distintas partes del Ecuador como hidroeléctricas, estaciones meteorológicas y volcanes, siendo necesario realizar un mantenimiento periódico de los instrumentos.

El INAMHI cuenta con túneles de viento a escala para pruebas de modelos aerodinámicos que recrean condiciones de viento semejantes a la realidad, los cuales presentan inconvenientes como son la velocidad máxima de 20 m/s, son ruidosos, sufren vibraciones en la carcasa y no cuenta con sensores adecuados para calibración (Benalcázar Venegas, 2015).

Todos los fenómenos serán estudiados mediante la propuesta de diseño de túnel aerodinámico, el cual utilizará simulaciones de sistemas de fluido dinámicos computacionales (CFD) en el software ANSYS. El mismo que, en el país es empleado en el estudio de eficiencias de modelos bajo cargas estáticas y dinámicas, análisis estructural y fuerzas presentes en competencias automovilísticas. Además, el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER) utiliza el método CFD para analizar el comportamiento de fluidos en hidroeléctricas y parques eólicos bajo condiciones extremas.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

¿Cómo realizar un diseño de un túnel de viento de ciclo cerrado para realizar pruebas aerodinámicas en modelos y autopartes en el Ecuador?

Objetivos

Objetivo general

Diseñar un túnel de viento con el apoyo de métodos teóricos y matemáticos para la realización de pruebas en modelos y diseño de autopartes en el Ecuador.

Objetivos específicos

Dimensionar las partes que componen el túnel de viento aplicando la teoría de mecánica de fluidos y aerodinámica para su posterior análisis.

Dibujar las partes halladas en base a análisis numérico de los elementos del túnel utilizando un *software* CAD 3D (*SolidWorks*) para luego ser simuladas con condiciones de borde.

Simular el comportamiento del aire con la ayuda de un software de fluidos (*ANSYS*) dentro del túnel para su posterior análisis de presiones y velocidades.

Proponer dos tipos de materiales y elementos constructivos del túnel como anteproyecto para su construcción con sus respectivas ventajas.

Elaborar los planos de las dimensiones finales de los componentes del túnel de viento.

Justificación

La industria automotriz del Ecuador produce actualmente 6 tipos de vehículos y ofrece 11 distintos productos de la industria de fabricantes de autopartes, 64 autopartistas están registradas en la Superintendencia de Compañías (proecuador.gob.ec, n.d.). Elaboran sistemas de escape, asientos, software, vidrios laterales, rieles de chasis, etc. El sector de autopartes atraviesa por un período de

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

franco crecimiento, un ejemplo de ello es el lanzamiento al mercado un vehículo con mayor componente ecuatoriano de la historia (un 30%) que es la *pickup* Luv D-Max.

(proecuador.gob.ec, n.d.)

El objetivo del país es aumentar el número de partes y piezas nacionales en el proceso productivo automotriz con altos estándares de calidad, con ello podemos dejar de importar componentes de otros países para el ensamblaje de vehículos de producción nacional. Para colocar una autoparte en el ensamblaje de un vehículo, se debe realizar algunas pruebas como son: Tracción, compresión, rotura, aerodinámicas etc. En la actualidad se han inventado herramientas para determinar si un componente aerodinámico es fiable o no para un automotor, la herramienta más adecuada para este tipo de estudio y prueba es el túnel de viento (elcomercio.com, 2011).

Durante la fase de desarrollo de un componente automotriz se debe cumplir ciertos requisitos como las especificaciones del componente lo cual incluye tipo de servicio, el peso, la capacidad de carga, confort, ergonomía, el mantenimiento, el método de anclaje, el material, aerodinámica, etc. Estas variables cambian de acuerdo con el tipo de componente que se esté diseñando, que se convierta en un factor positivo durante la conducción, garantizando la seguridad del conductor y sus pasajeros (Fondevila Martinez, 2011).

En el país no existe un laboratorio equipado con un túnel de viento para realizar pruebas a escala real de un vehículo y analizar el comportamiento real de los componentes aerodinámicos de un automotor, es por ello la necesidad de desarrollar el diseño y construir un prototipo a escala del túnel de viento en donde se muestre la parte geométrica de sus componentes y su funcionamiento.

Un túnel de viento es símbolo de tecnología, de estudio, análisis, diseño, lo cual permitiría a la educación superior como la industria automotriz en el Ecuador, la realización de investigaciones, diseños, ensayos aerodinámicos, trabajos en conjunto con la industria y

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

muchos más. Con esto se abre la posibilidad de generar un pequeño centro de investigación para la experimentación de modelos aerodinámicos y otras máquinas que interactúan con el aire en movimiento (Benalcázar Venegas, 2015).

El trabajo parte con el estudio de los principios aerodinámicos con sus respectivas variables y condiciones de borde; las cuales son el punto de partida para el diseño de las distintas zonas del túnel (Benalcázar Venegas, 2015). Con la ayuda de expresiones matemáticas y softwares que faciliten su resolución (*Mathlab*), se consiguen las dimensiones de los difusores, codos y ventiladores. Hallada la geometría del túnel de viento se dibuja en tres dimensiones utilizando un programa CAD (*Solidworks*) que es compatible para luego simular el comportamiento de aire y establecer las velocidades y pérdidas de presión, utilizando en este caso *ANSYS*.

Estudio del arte

Herramientas para el diseño del sistema

Programas de investigación y desarrollo en el campo de la aerodinámica deben basarse en la disposición de información de todas las fuentes pertinentes existentes. Esto, sin duda debe de comenzar con una base sólida en el estado actual de la teoría aerodinámica. Los resultados apropiados, si existieren, de experimentos anteriores y de estudios computacionales anteriores son de gran valor. Además, se debe elegir enfoques para elaborar la información específica necesaria para cumplir con los objetivos del programa inmediato. Tres amplias categorías son comúnmente reconocidas: Analítica, computacional, y experimental.

El enfoque analítico juega un papel vital en el diseño y en la obtención de una apreciación de las posibilidades, pero nunca es suficiente para un proyecto, es por eso que se debe de recurrir a software de diseño.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Entre las herramientas computacionales de diseño que se van utilizar están los programas CAD de diseño mecánico como *SOLIDWORKS* y de simulación *ANSYS*, programas que utilizan métodos de elementos finitos que luego de crear los modelos y establecer parámetros de borde e hipótesis iniciales se consigue el comportamiento que se asemeja al de la realidad.

Trabajos realizados en túneles de viento

Calautit, Hughes, & Shahzad, (2015) se basan en la dinámica de fluidos computacional (CFD) y en el análisis de túnel de viento de lazo cerrado para investigar movimientos unidireccionales con flujo laminar. Se creó un modelo de referencia experimental detallado utilizando prototipado rápido y probado en un túnel de viento subsónico de bucle cerrado.

Los resultados del estudio de CFD mostraron que el túnel de viento propuesto era capaz de reducir la temperatura de suministro hasta 12 K° dentro del microclima dependiendo de la velocidad del aire exterior. Sin embargo, la adición de la HTD cilíndrica también redujo las tasas de suministro de aire hasta el 35%.

Presenta un modelo a escala 1:10, en donde la velocidad simulada dentro del túnel de viento debe ser aproximadamente 10 veces la velocidad del viento a escala completa. En la figura 5 se muestra el túnel de viento construido.

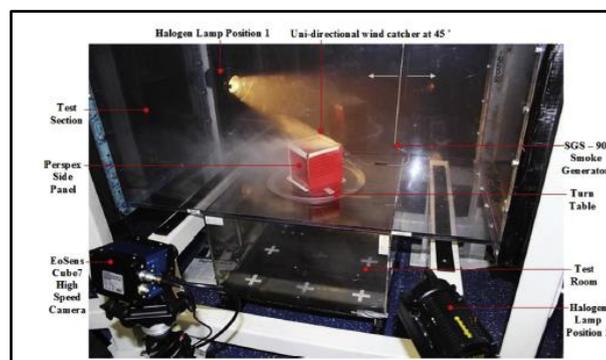


Figura 5. Túnel de viento a escala 1:10 (Calautit et al., 2015)

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

En la figura 6 se observa una comparación de resultados entre los valores medidos experimentalmente y CFD para los coeficientes de presión en las superficies frontal, posterior, izquierda, derecha y superior del modelo de túnel de viento unidireccional. Registrando errores menores al 10%.

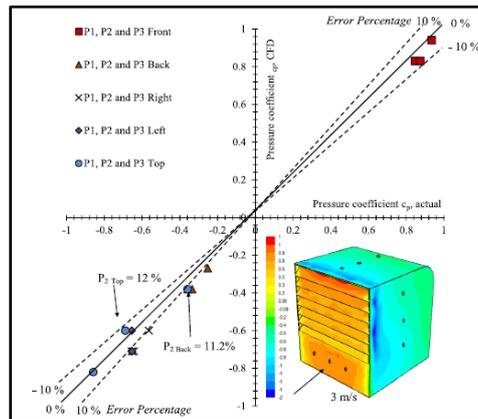


Figura 6. Comparación de resultados (Calautit et al., 2015)

Un estudio realizado por Olivares de Jodar (2011) realiza un modelado bidimensional y tridimensional de un vehículo analizando con *NASTRAN-CFDESING*. Bidimensionalmente describe un mallado en elementos finitos analizando un flujo bidimensional. Además, el modelado tridimensional en el software CAD, el mismo que está sin ruedas, puertas y alerones, cuyos resultados se muestra la velocidad del fluido en m/s. En la figura 7 se muestra la simulación del automóvil.

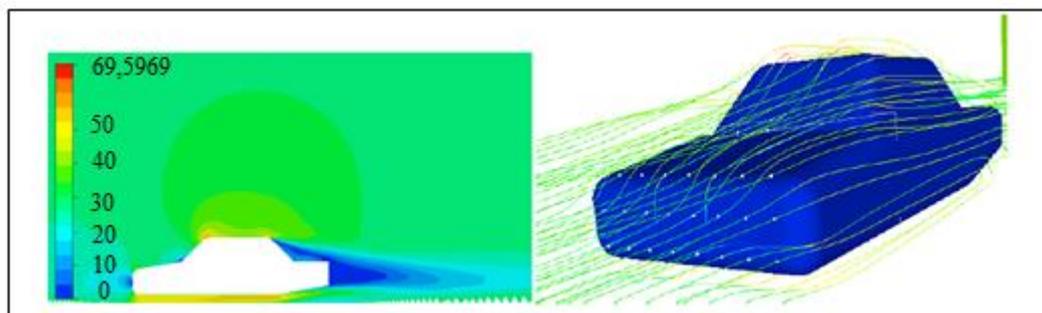


Figura 7. Simulación del automóvil si partes externas (Olivares de Jodar, 2011)

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Los elementos diseñados aerodinámicamente se simulan con flujo incomprensible y con un método de elemento de borde de bajo orden en régimen estacionario.

Alerones

Existen tres tipos de alerones; delanteros, traseros y laterales. Estos componentes tienen la función de reducir y optimizar la resistencia que tiene el vehículo al flujo de aire. Estos aumentan la adherencia al piso, asegurando al conductor y reduciendo volcamientos por altas velocidad de manejo (Olivares de Jodar, 2011). En la figura 8 se puede ver una simulación de un camión con alerones traseros.

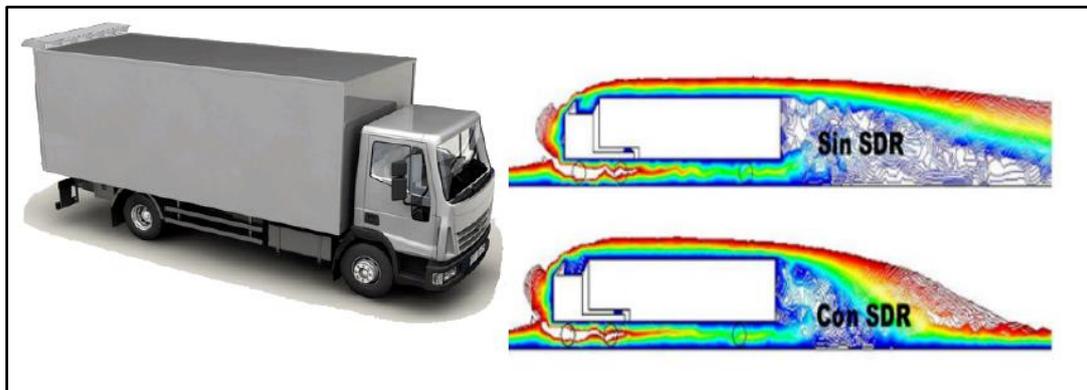


Figura 8. Alerones traseros (Olivares de Jodar, 2011)

Difusores aerodinámicos del vehículo

Es un componente localizado en la parte inferior del automóvil, tiene forma curva y está dirigido al suelo, presenta funciones como reducir el arrastre y la altura. Esta autoparte sufre mayores turbulencias, ya que el flujo de aire de alta velocidad que incide en pista se encuentra con un flujo menor debajo del vehículo, lo que causa un arrastre no deseado ocasionando pérdida de agarre y un volcamiento. En la figura 9 se muestran los difusores y su localización en el automóvil.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO



Figura 9. Difusores (Olivares de Jodar, 2011)

Simulaciones aerodinámicas CFD

Existen alternativas de simulación aerodinámica empleando computadoras que proporcionen condiciones reales de manejo, analizando la interacción de líquidos y gases con un software CAE. Generalmente, son de gran precisión si se consideran condiciones de borde, velocidad y material adecuado. En la figura 10 se muestra la simulación con un software CFD donde se puede ver el comportamiento del fluido sobre el vehículo cuando posee autopartes que ayudan a la aerodinámica del mismo.

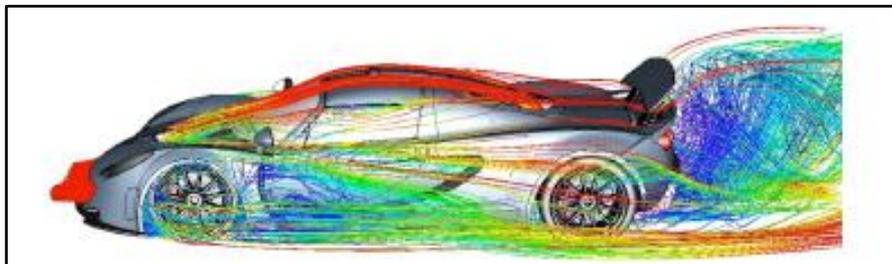


Figura 10. Simulación software CFD (Olivares de Jodar, 2011)

Benalcázar Venegas, (2015) plantea el diseño y construcción de un túnel de viento cerrado subsónico para calibrar anemómetros para el INAMHI. La misma que, debe cumplir con las siguientes características

- Diámetro mínimo de sección de pruebas 500 mm.
- Velocidades variables.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

- Velocidad de operación hasta 60 m/s.
- Uniformidad de flujo.
- Niveles de turbulencia menores al 2%
- Niveles de ruido menores a 115 dB.

Esta investigación dimensiona los elementos del túnel de viento con una secuencia de cálculo. A continuación, se detalla las partes del túnel de viento cerrado y su método de obtención.

- 1. Sección de pruebas.** Se utiliza un diámetro hidráulico de 2 a 3 ($D = 500$ mm) veces mayores del anemómetro a estudiar. En este caso el promedio es ($2D < L < 3D$) $L = 1200$ mm.
- 2. Difusor.** El área del difusor se calcula mediante la relación entre el área de salida A_2 con respecto al área de entrada A_1 . Ver ecuación 1

$$A_r = \frac{A_2}{A_1} \quad (1)$$

- 3. Contracción.** Es el componente encargado de incrementar la velocidad redireccionando el flujo de aire por medio de mallas para garantizar que exista flujo volumétrico. Además, reduce la variación de velocidad en la sección de pruebas. El área de contracción se calcula mediante la ecuación 2.

$$A_r = \frac{A_e [m^2]}{A_s [m^2]} \quad (2)$$

Mediante un polinomio de quinto nivel se realiza la normalización de la longitud. Ecuación 3

$$h = (-10\varepsilon^3 + 15\varepsilon^4 - 6\varepsilon^5)(h_i - h_o) + h_i \quad (3)$$

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Donde:

h: Altura de contracción [mm]

L: Longitud de contracción

hi: Radio de entrada [mm]

ho: Radio de salida [mm]

ε : Valor entre 0 y 1

- 4. Malla o alisador de flujo.** Consiste en un reductor de flujo, cuyo propósito es estabilizar el flujo en laminar. Estos alisadores tienen características de porosidad (β) que se calcula mediante la ecuación 4. Experimentalmente se utiliza $\beta > 0,57$, ya que un valor menor produce inestabilidad en el flujo.

$$\beta = \left(1 - \frac{d_w}{M}\right)^2 \quad (4)$$

Donde:

β : Coeficiente de porosidad de malla [Adimensional]

d_w : Diámetro del alambre [mm]

M: Abertura [mm]

- 5. Deflectores.** El túnel de viento necesita del diseño de deflectores, se realiza un criterio de selección tomando en cuenta el coeficiente de pérdida de presión, K_L . Al dimensionar de manera adecuada estos componentes se minimiza las pérdidas por cambio de sección. Existen tres tipos de deflectores utilizados en túneles de viento con su respectiva eficiencia. Como se observa en la figura 11.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

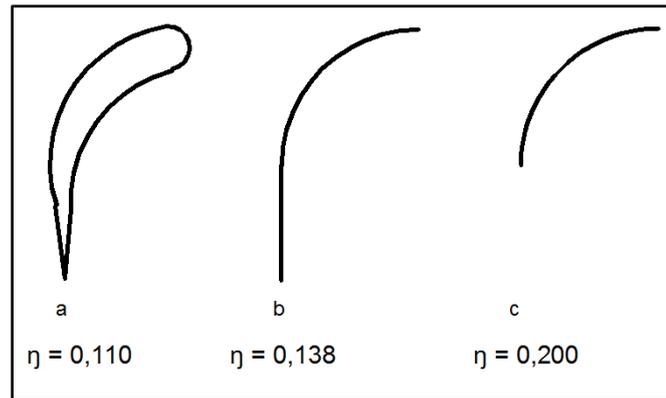


Figura 11. Deflectores (Benalcázar Venegas, 2015)

Dónde: (a) corresponde a un perfil aerodinámico, (b) es un cuarto de circunferencia extendido y (c) un cuarto de circunferencia.

Se presenta un prediseño del modelo del túnel de viento. En la figura 12 se indica el modelo hecho en Solidworks (Benalcázar Venegas, 2015).

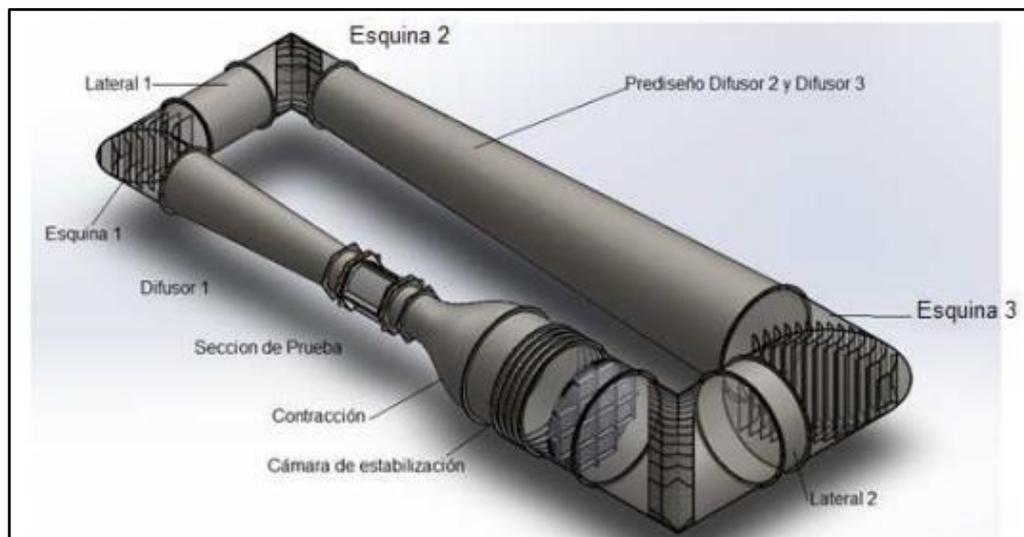


Figura 12. Túnel de viento de lazo cerrado (Benalcázar Venegas, 2015)

Software CAD

Solidworks

Solidworks consta de un paquete de diseño denominado *Flow simulation* que utiliza análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD) para calcular la fuerza del fluido, la transferencia de calor y el choque del mismo para ver el rendimiento de un determinado

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

equipo. Permite un análisis del flujo sin crear un prototipo, es decir solo con el modelado y ubicando parámetros de trabajo ofrece resultados ahorrando tiempo y costo de desarrollo (solidworks, 2017.). En la figura 13 se indica el paquete de simulación en la cámara de pruebas generada en el software computacional de *solidworks* en donde se muestra el historial de colores de la velocidad del fluido en m/s



Figura 13. CFD Solidworks

Para el caso del túnel viento se realiza un análisis para flujos laminares, turbulentos y de transición, ya que este paquete se adapta al comportamiento del equipo, el cual debe tener un flujo laminar como característica principal.

Software CAE

ANSYS

El software *ANSYS* en el paquete de dinámica de fluidos computacional (*CFD*) ofrece un mallado semiautomático denominado *CFX- MESH*, generando mallado tetraédrico, prismático y hexaédrico manual. Una ventaja que tiene al emplear este sistema es el menor tiempo de ejecución con mejores resultados. Para el análisis la computadora debe suministrar el GHz de memoria *RAM* por cada millón de

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

elementos, por lo que no se recomienda un mallado muy fino en el análisis del modelo. En la figura 14 se muestra el paquete *CFD* de *software ANSYS*, donde se muestra los resultados la velocidad del fluido en km/h que impacta sobre la superficie de un modelo de la fórmula uno.

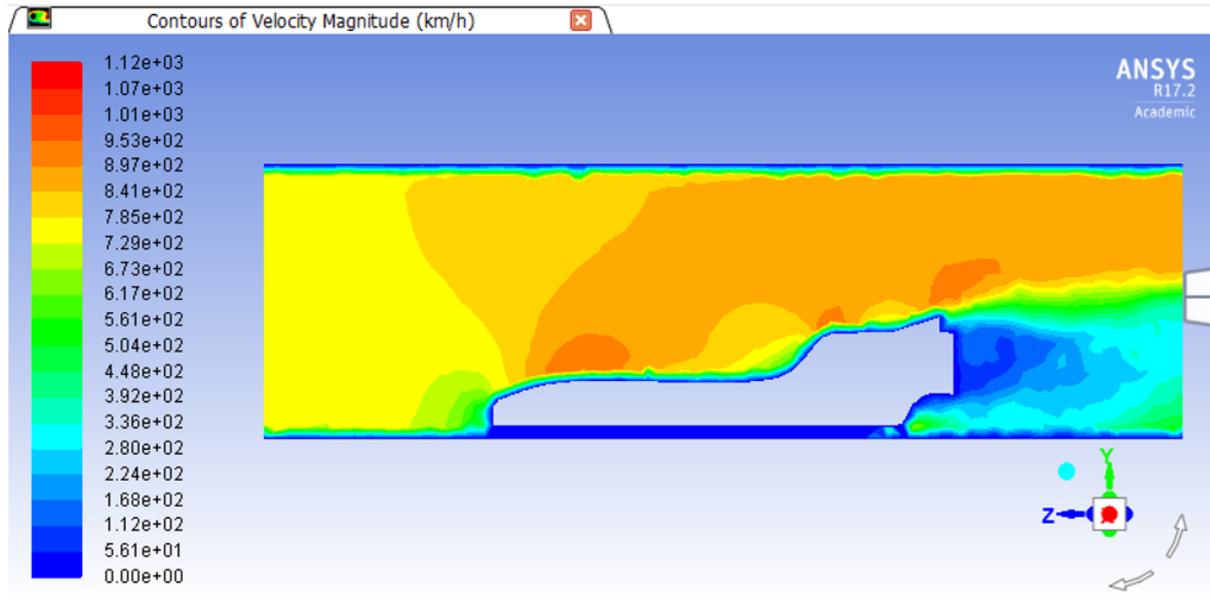


Figura 14. CFD ANSYS

Fundamentos para el diseño aerodinámico

A continuación, se presenta la definición de túnel de viento, su clasificación y porque se caracterizan y finalmente las partes que lo componen.

Definición Túnel de Viento

Un túnel de viento es una herramienta primaria de la aerodinámica de tipo experimental que procura simular los efectos del movimiento de un sólido introducido en un fluido, en este caso el aire. Sistema que permite simular el comportamiento y las reacciones de un cuerpo, modelado a escala o no, que poseería inmerso en la atmósfera terrestre (Silva Treviño, 2005).

El uso adecuado y productivo de las investigaciones experimentales en general y de los túneles de viento en particular, requiere aplicaciones de la teoría aerodinámica y métodos

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

computacionales en la planificación de las instalaciones, la planificación de los experimentos y la interpretación de los resultados.

Clasificación de los túneles de viento

Hay dos tipos básicos de túneles de viento y dos configuraciones básicas de sección de pruebas. Sin embargo, hay casi infinitas variaciones en las características específicas de los distintos túneles. Los dos tipos básicos son de circuito abierto y circuito cerrado. Las dos configuraciones básicas de sección de prueba son sección de prueba abierta y sección cerrada (Barlow et al., 1999).

Según la velocidad de operación

Existe el número de *Mach* cuyo número determina la velocidad del aire en la cámara de pruebas, sirviendo como parámetro de clasificación.

Tabla 1.

Clasificación de los túneles de viento según el rango de velocidades

Tipo de túnel	Rango de Mach [M]
Baja velocidad	0 – 0.5
Alta velocidad	0.5 – 0.7
Transónico	0.7 – 1.4
Supersónico	1.4 -5
Hipersónico	>5

(White, 2010)

Existen ciertas ventajas al utilizar un túnel de viento del tipo subsónico y transónico:

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

No se dan ondas de choque en ningún punto del túnel de viento, es decir, las posibles ondas de choque se localizarían en el modelo. Por lo que no afectaría al flujo en el resto del túnel.

Al no alcanzar velocidades supersónicas no se daría el efecto de bloqueo sónico en ninguna sección del túnel. Es decir, el gasto de aire circulante no alcanzaría su valor de saturación.

Las velocidades serían menores que en túneles supersónicos, por lo que las pérdidas de carga serían menores.

Menor complejidad estructural que en túneles de alta velocidad.

Características de los túneles

Circuito abierto

El aire que fluye a través de un túnel de circuito abierto sigue una trayectoria esencialmente recta desde la entrada a través de una contracción, de la sección de prueba, seguido de un difusor, una sección de ventilador, y finalmente el escape del aire (Silva Treviño, 2005). El túnel puede tener una sección de prueba sin límites sólidos (chorro abierto o de tipo Eiffel) o límites sólidos (jet cerrado o tipo Laboratorio Nacional de Física (NPL)). La figura 15 muestra una vista en planta de un túnel de circuito abierto con un chorro cerrado.

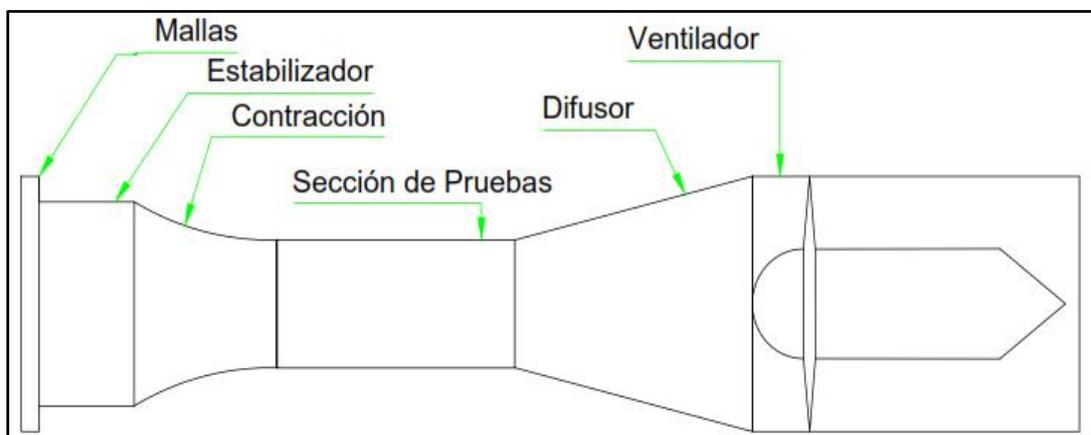


Figura 15. Túnel de viento de circuito abierto

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Circuito cerrado

El aire que fluye en un túnel de viento de retorno cerrado, tipo Prandtl, o Göttingen, recircula continuamente con poco o ningún intercambio de aire con el exterior. Un ejemplo de un túnel de circuito cerrado se muestra en la figura 16.

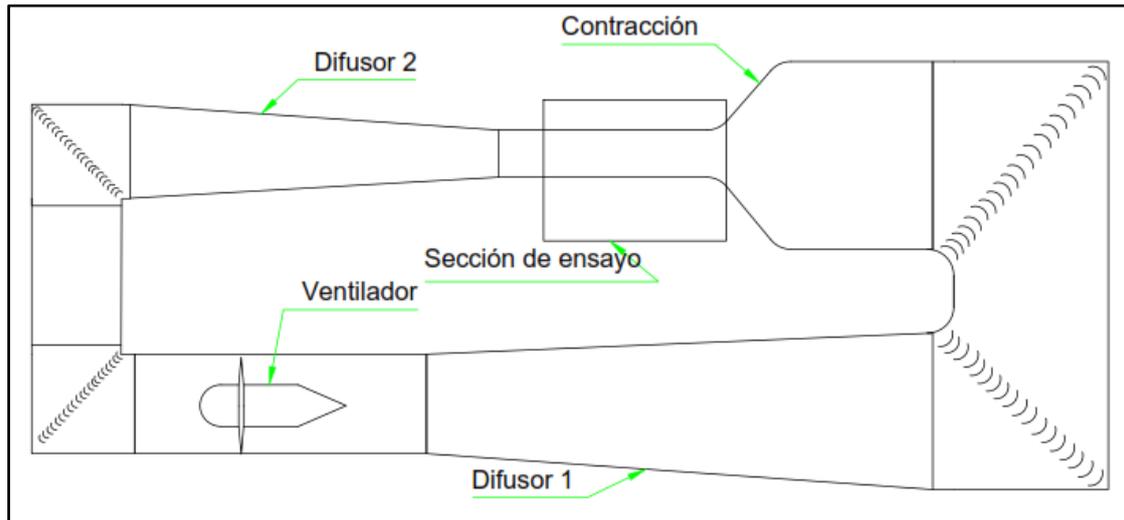


Figura 16. Un túnel de viento de circuito cerrado

Partes de un túnel aerodinámico

Los elementos de un túnel de viento se presentan en la siguiente lista:

- a) Cámara de ensayos.
- b) Primer difusor.
- c) Primer codo.
- d) Tramo recto.
- e) Pantalla de seguridad.
- f) Segundo codo.
- g) Adaptador rectangular a circular.
- h) Sección impulsora: fan y rectificadores.
- i) Segundo difusor.
- j) Tercer codo.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

- k) Tramo recto.
- l) Intercambiador de calor.
- m) Cuarto codo.
- n) Difusor de amplio ángulo de difusión.
- o) Cámara de estabilización.
- p) Acondicionadores de flujo.
- q) Contracción o tobera.

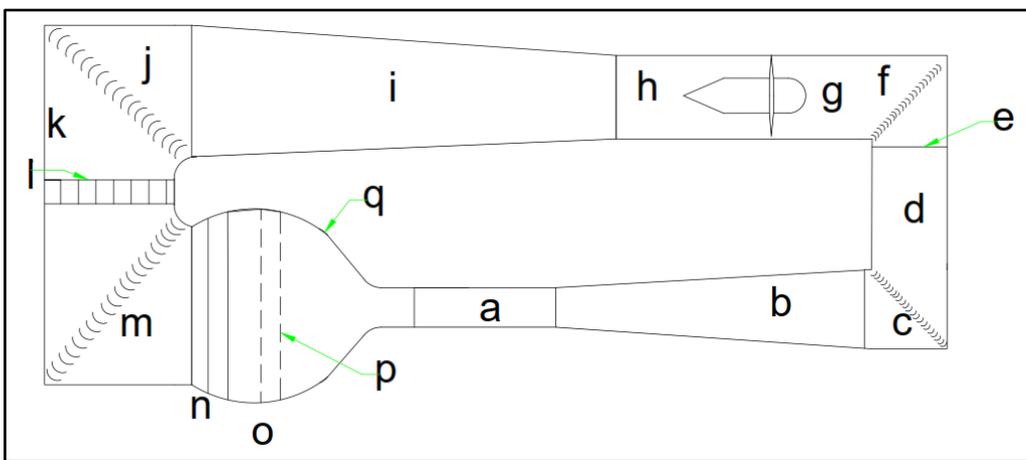


Figura 17. Esquema genérico de un túnel de viento de retorno cerrado

Fundamentos de la mecánica de fluidos

En este capítulo se plantearán las ecuaciones que rigen en el estudio físico. Para comprender los resultados y el proceso de diseño del túnel de viento es necesario incorporar una serie de conceptos y ecuaciones de la mecánica de los fluidos. Se explicarán los conceptos de flujo laminar y turbulento, la capa límite, las ecuaciones de conservación y su resultado: Las ecuaciones de *Navier –Stokes*, y una serie de números adimensionales que caracterizan el fluido.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Número de Reynolds

El número de *Reynolds* establece la relación entre las fuerzas de inercia convectiva y las fuerzas viscosas del flujo. Permite representar la dominancia de una frente a otra. Esta relación puede expresarse según la siguiente igualdad (Çengel & Boles, 2008).

$$Re = \frac{\rho LV}{\mu} \quad (5)$$

Donde:

ρ : Densidad del fluido.

L: Longitud característica de la región.

V: Velocidad característica del fluido.

μ : Viscosidad dinámica del fluido.

Este número nos permite además distinguir el régimen de movimiento del fluido. Cuando se cumple que el número de Reynolds es inferior a 2300 se dice que el flujo es laminar, mientras que si es superior a 4000 podremos suponer que el flujo es turbulento.

Número de Mach

El número de Mach permite establecer la relación existente entre velocidad local del sonido y la velocidad relativa entre el cuerpo y el fluido. Esta relación puede expresarse según la siguiente igualdad (Çengel & Boles, 2008).

$$Ma = \frac{V}{C} \quad (6)$$

Donde:

V: Velocidad del flujo

C: Velocidad del sonido

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Este número es de gran importancia porque permite determinar la importancia de los efectos que tiene la compresibilidad en el fluido. Un fluido puede considerarse incompresible cuando su densidad no depende de la velocidad del fluido. Cuando el número de Mach es menor a 0.3 se puede suponer un régimen incompresible mientras que, si es mayor, los cambios en la densidad son significativos.

Régimen del flujo

Régimen laminar

Se denomina flujo laminar al tipo de movimiento que posee un determinado fluido de forma ordenada, además debe ser estratificado y suave. El flujo se desarrolla en láminas paralelas, de tal forma que cada partícula del fluido se mueve siguiendo líneas de corrientes que nunca se cortan con otras líneas de corriente. Este fenómeno es característico en movimientos a baja velocidad o en fluidos de alta viscosidad.

Régimen turbulento

En este régimen el fluido se comporta de una forma característica donde presenta propiedades como: Irregularidad, difusividad, disipación, elevado número de Reynolds entre otros (Tajadura, 2005). Debido a esto su desarrollo es amplio en la rama de la mecánica de fluidos donde utilizan aproximaciones estadísticas para acercarse a su comportamiento. Los aspectos físicos que le caracterizan son: Trayectorias erráticas que forman turbulencia y vórtices, además de que se genera cuando un fluido tiene varias velocidades. En la figura 18 se puede observar de forma esquemática del comportamiento del fluido en régimen turbulento como laminar.

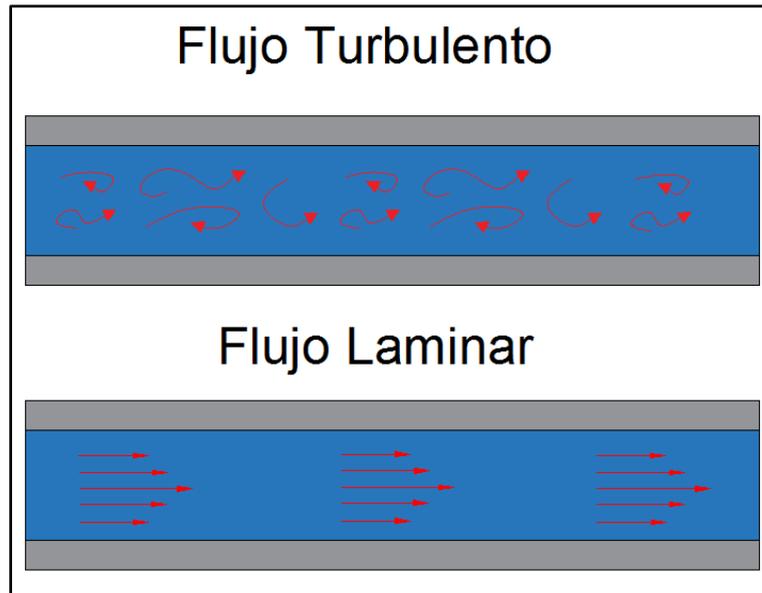


Figura 18. Flujo laminar y turbulento

Ecuación de Colebrook – White

Esta fórmula es empleada en hidráulica para el cálculo del factor de fricción de Darcy f , que resulta determinante a la hora de determinar el valor de las pérdidas de carga. La fórmula general es la siguiente (White, 2010).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (7)$$

Donde:

f : Factor de fricción de Darcy

ν : Viscosidad cinemática

ε : Rugosidad de la tubería

D : Diámetro hidráulico del conducto

Re : Reynolds basado en el diámetro hidráulico.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

El Ábaco de Moody

El ábaco de Moody es la representación gráfica, en escala doblemente logarítmica, del factor de fricción de Darcy en función del número de Reynolds y la rugosidad relativa de un conducto. En la figura 19 podemos visualizar el ábaco de Moody.

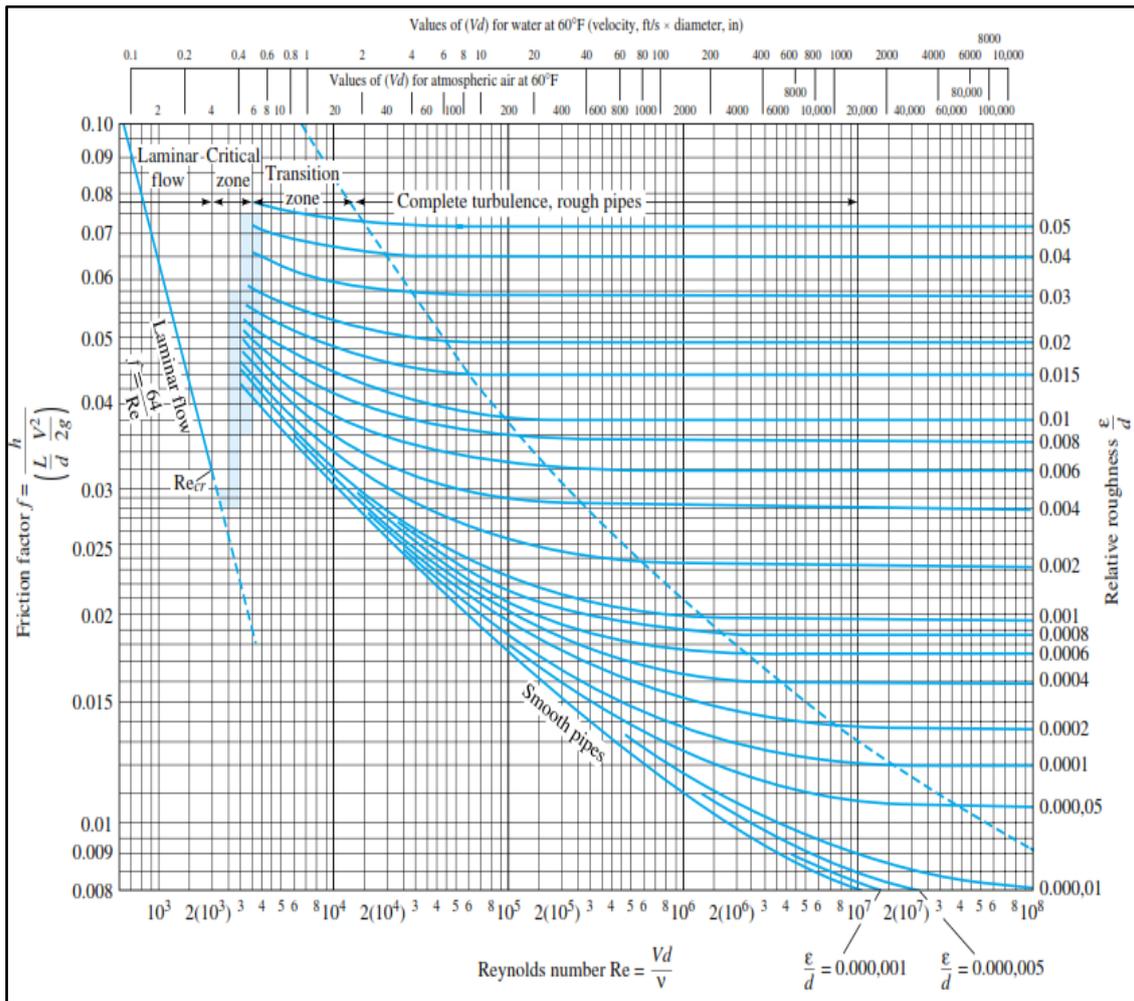


Figura 19. Ábaco de Moody (White, 2010)

Capa límite

Cuando un fluido se mueve en contacto con una superficie o un cuerpo, debido a la fricción, la capa de fluido en contacto directo con la superficie se detiene completamente. Esto genera un esfuerzo por fricción que depende de la viscosidad y de la velocidad, que frena las capas inmediatamente superiores de fluido.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

El conjunto de capas que se ven afectadas por la proximidad a la pared se denomina capa límite. A pesar de ser una región extremadamente pequeña, tiene un efecto importante en la resistencia ejercida sobre objetos inmersos en el seno de un fluido (Gherardelli, n.d.). El espesor de esta región es del orden de $1/R$. Este espesor aumenta a medida que el fluido se mueve sobre una superficie, pudiendo ocasionar un desprendimiento del flujo. A medida que el fluido avanza, la resistencia ofrecida por la pared reduce progresivamente la velocidad. Si además el movimiento presenta un gradiente adverso de presiones la reducción de la velocidad puede ser más acusada. Si en algún momento la corriente invierte su sentido en el entorno de la pared, se ocasionaría el desprendimiento de esta capa, generando vórtices e inestabilidades que alterarían al flujo fuera de la capa y generarían pérdidas, como se puede ver en la figura 20.

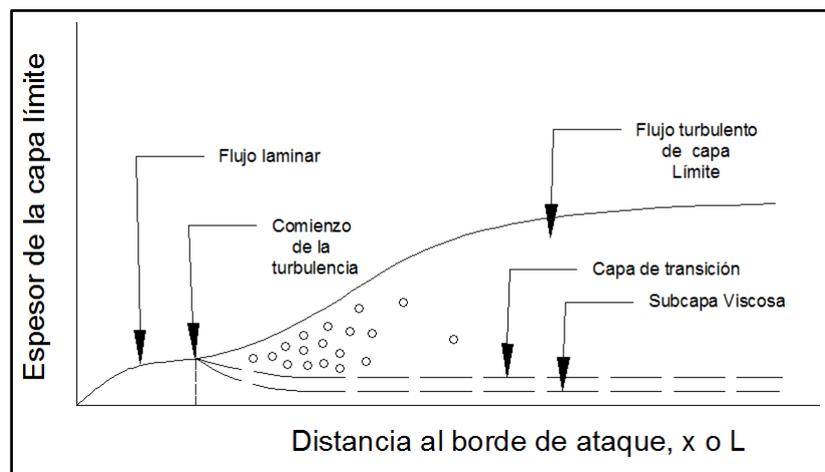


Figura 20. Esquema de capa límite

Justificación de la elección de un tipo de túnel de viento

Túnel de viento tipo de retorno cerrado por las siguientes ventajas:

Mayor control sobre el comportamiento del flujo. Al estar aislado de la atmósfera el flujo es más estable.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Menor contaminación acústica ya que no se difunde el flujo a la atmósfera y la sección impulsora se encuentra aislada de la atmósfera.

Ofrece la posibilidad de modificar la presión, lo que permite mayor versatilidad de operación y reduce la potencia necesaria para determinados ensayos.

Normativa vigente

Uno de los problemas si se escoge el diseño de un túnel de régimen abierto es el ruido provocado por el aire que sale del sistema. Los límites permisibles de niveles de ruido ambiente para fuentes fijas y fuentes móviles, y para vibraciones vigentes en el Ecuador según el suelo en donde se instale el túnel se debe considerar los niveles de presión sonora, como se observa en la tabla 2.

Tabla 2.

Niveles de presión sonora

TIPO DE ZONA SEGÚN USO DE SUELO	NIVEL DE PRESIÓN SONORA EQUIVALENTE NPS [dB(A)]	
	DE 06H00 A 20H00	DE 20H00 A 06H00
Zona hospitalaria y educativa	45	35
Zona Residencial	50	40
Zona Residencial mixta	55	45
Zona Comercial	60	50
Zona Comercial mixta	65	55
Zona Industrial	70	65

(White, 2010)

Fuente Fija

Fuente fija se considera como un elemento o un conjunto de elementos capaces de producir emisiones de ruido desde un inmueble, ruido que es emitido hacia el exterior, a

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

través de las colindancias del predio, por el aire y/o por el suelo. La fuente fija puede encontrarse bajo la responsabilidad de una sola persona física o social.

Formulación de la hipótesis

El diseño de un túnel de viento a escala real, que toma en cuenta aplicaciones aerodinámicas mejorará la realización de pruebas en modelos automotrices y autopartes en el Ecuador.

Método

Tipo de estudio

Este proyecto realizará un estudio descriptivo mediante la búsqueda de información de túneles de viento de lazo cerrado, que sirve como parámetro para la descripción de los procesos termodinámicos y de mecánica de fluidos necesarios para el dimensionamiento del mismo. Adicionalmente, describirá el fenómeno mediante el estudio de casos y un análisis estadístico.

Modalidad de investigación

La modalidad de investigación es la siguiente:

Cualitativo, mediante la recolección de datos, se define un problema de investigación que ayudará en la prueba de la hipótesis que se basa en la reconstrucción de hechos y partir de un conocimiento previo para llegar a un propósito que es el dimensionamiento de un túnel de viento de circuito cerrado.

Cuantitativo, la recolección de datos y el análisis de la investigación cualitativa se utiliza para probar la hipótesis del proyecto, mediante el cálculo de parámetros de mecánica de fluidos y termodinámicos necesarios para el dimensionamiento de las partes del túnel de viento.

Proyecto de desarrollo en esta investigación se realizará una propuesta de diseño, la cual puede ser implementada mediante la construcción de un prototipo.

Metodología

Es la combinación de la investigación inductiva que se encarga del reconocimiento del problema para llegar de manera general a una idea de estudio y el método de investigación deductiva, la misma que parte de una idea general para realizar un estudio particular. Dando

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

como resultado una investigación lógica y siendo capaz de realizar cálculos, modelado CAD y simulaciones CAE de los fenómenos de un túnel de viento de circuito cerrado.

En este capítulo se desarrolla el diseño de los elementos del túnel de viento y las razones que definen la geometría de las distintas secciones. En la figura 21 se muestra como estaría establecido el túnel de circuito cerrado de este proyecto.

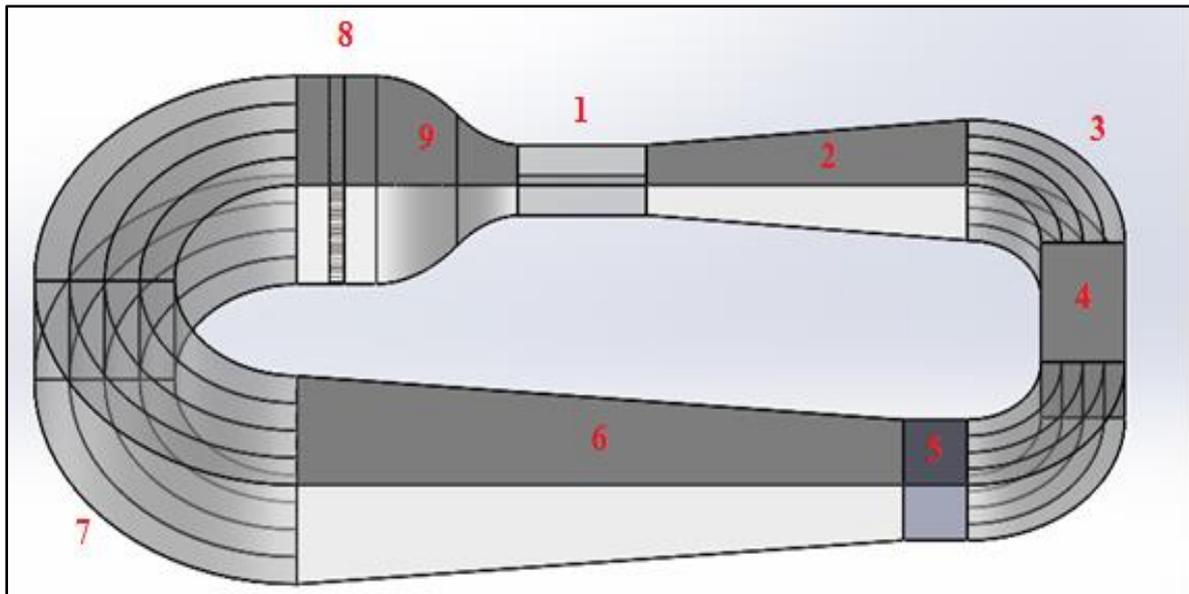


Figura 21. Túnel de viento

La enumeración mostrada en la figura anterior constituye las partes principales del túnel, que son:

1. Cámara de ensayos
2. Primer difusor
3. Codos Pequeños
4. Tramo recto
5. Cámara del ventilador.
6. Segundo difusor.
7. Codos Grandes
8. Cámara de estabilización.
9. Tobera.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Diseño de las partes del túnel

Para definir la geometría y forma del túnel de viento se parte de la cámara de pruebas que es la zona más importante, a partir de su estructura geométrica y dimensión se puede conseguir las demás dimensiones a base de parámetros científicos, cálculos, notas bibliográficas y experimentales.

El túnel de viento de circuito cerrado que se va a diseñar en este proyecto tiene aplicaciones directas en la Ingeniería Automotriz. Según (X. Liu, Han, Cai, Levitan, & Nikitopoulos, 2016) los estudios que se realizan en estos equipos son probablemente el método más fiable para investigar y evaluar los riesgos que pueden ocasionar las cargas aerodinámica en la estabilidad de un auto, provocadas por efecto del viento.

El túnel de viento de circuito cerrado consta de una serie de partes que lo constituyen como se muestra en la figura 21, para iniciar con el diseño se empieza por el dimensionamiento de:

Cámara de ensayos.

La cámara de ensayos es la parte más costosa e importante del túnel de viento, porque es el sitio donde se encuentran los equipos de medición y en donde se hacen todos los estudios de los efectos aerodinámicos.

Debe presentar características en su construcción como paredes transparentes, bandas corredizas o rodillos que permitan simular el movimiento del vehículo y equipamiento térmico para generar variaciones de temperatura. Además, de los parámetros que se menciona anteriormente para el desarrollo de pruebas en el interior de la cámara hay que considerar las siguientes condiciones de operación: Turbulencia del viento baja, bajos niveles de ruido (6dB) (P. Liu, Xing, Guo, & Li, 2017) y la velocidad debe ser controlada dependiendo el tipo de estudio que se realice.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Para encontrar las dimensiones mínimas de la cámara de ensayos, se determina la sección que tendrá y según (Barlow et al., 1999) la forma rectangular es la más idónea para el desarrollo de pruebas en vehículos. Por otro lado (Martínez Coza, 2016) sugiere las siguientes consideraciones para el dimensionamiento.

1. **Ancho de la cámara:** Superior al ancho del modelo con un 20 o 30% por cada lado.
2. **Longitud de la cámara:** Es igual a la longitud del modelo por 2.
3. **Altura de la cámara:** Superior a la altura del modelo con un 50%.

De acuerdo con las sugerencias mencionadas anteriormente y considerando que la aplicación directa del túnel será para pruebas en vehículos pequeños se establece la forma geométrica de la cámara de pruebas que será rectangular, como se muestra en la figura 22.

Finalmente para facilitar la instalación de equipos de medición, dar libre movilidad para el ingreso de operarios y permitir la instalación de una compuerta para que ingrese el vehículo los valores que se incremente a las dimensiones del modelo serán superiores a los porcentajes sugeridos por (Martínez Coza, 2016).

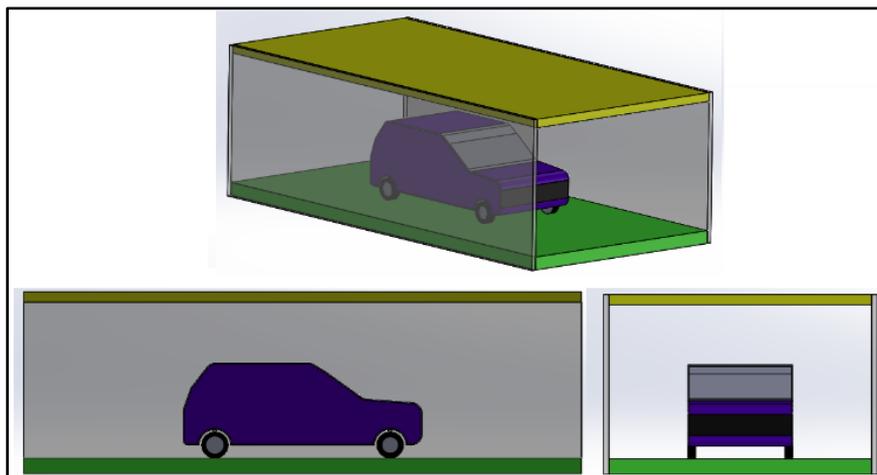


Figura 22. Cámara de ensayos

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Velocidad máxima de operación de los ventiladores del túnel

Para túneles de viento en donde se utilizan vehículos a escala real se manipulan velocidades alcanzadas por los ventiladores que superan los 250 Km/h, es así el caso de algunas marcas fabricantes de vehículos (elmundo.es, 2015) que tiene estos equipos y que presentan las características que se muestra en la tabla 3 con respecto a la velocidad máxima que alcanza el viento por medio de los ventiladores, datos obtenidos de (elmundo.es, 2015).

Tabla 3.

Velocidades del viento utilizadas por distintas marcas

Marca	Ubicación	Velocidad del viento que alcanza el ventilador (Km/h)
Audi	<i>Ingolstadt (Alemania)</i>	300
Mercedes	<i>Sttugar</i>	265
BMW	<i>Munich</i>	250-280
Porsche	<i>Weissach</i>	300
Ford	Norte América	250

La velocidad que pueda alcanzar el viento en un túnel es importante, es así que en pruebas realizadas en modelos a escala se alcanza velocidades máximas de 80 m/s (P. Liu et al., 2017). A través de los datos que se muestran en la tabla 3 y de una serie de estudios la velocidad máxima que se va a considerar para el diseño del túnel para este proyecto estará en un rango de 250 a 300 Km/h velocidad máxima que será generada por el ventilador.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Difusores.

Es un volumen de control donde la velocidad del viento disminuye y aumenta la presión estática, dentro del túnel tiene como finalidad compensar las pérdidas que se producen durante todo el sistema.

Los difusores son ductos de alta sensibilidad por lo que su diseño es un punto crítico dentro de la construcción del túnel. Es importante determinar bien el ángulo de inclinación, ya que este permite el incremento del área a la salida, de no ser el adecuado ocasionaría que la capa límite de la zona de turbulencia del fluido se desprenda generando vórtices y pérdidas extremas. Según Barlow et al. (1999) el ángulo de inclinación debe tener un valor igual o inferior a 3° , en la figura 23 se muestra geométrico del difusor.

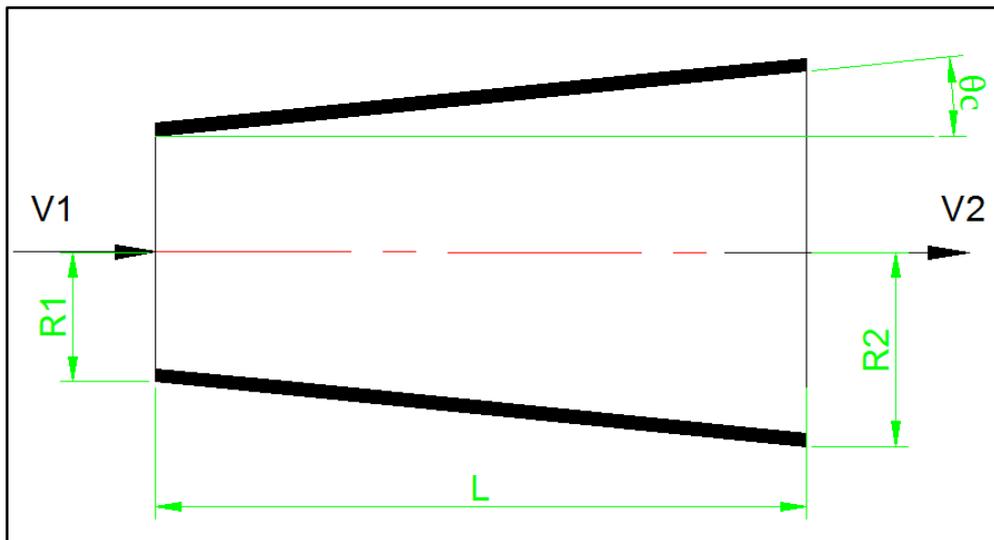


Figura 23. Difusor

De la figura anterior se obtiene la expresión que relaciona las dimensiones geométricas y el ángulo de inclinación.

$$\theta_e = \arctan\left(\frac{R_2 - R_1}{L}\right) \quad (8)$$

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Los tipos de secciones que tienen los difusores se muestran en la figura 24 (Blevins, 1984).

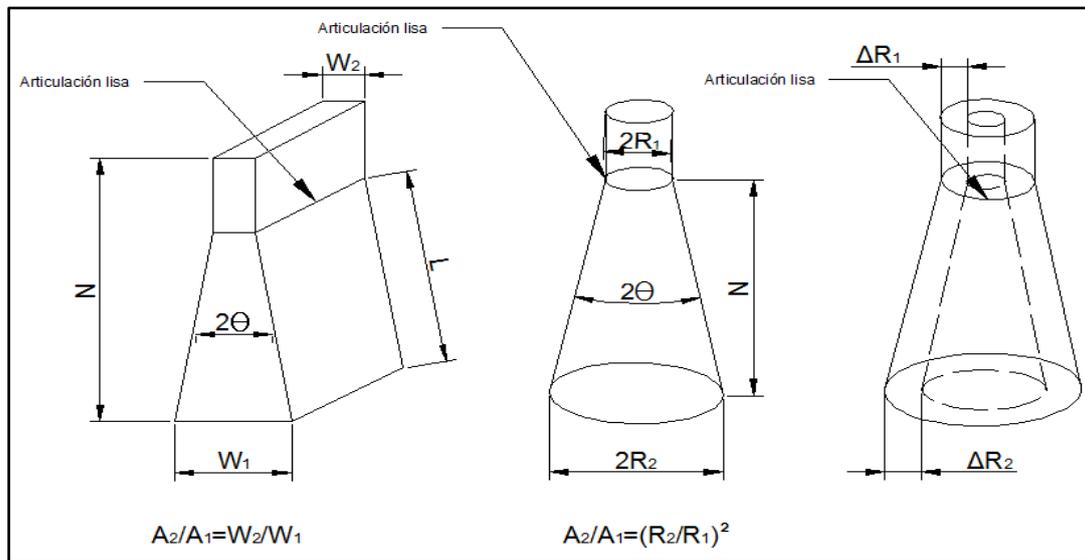


Figura 24. Bidimensional (a), cónico (b), and anular (c)

Y la expresión que relaciona las dimensiones con los distintos perfiles que tiene los difusores se muestra a continuación.

$$\theta_e = \arctan\left(\frac{D_1(\sqrt{A_R} - 1)}{2L}\right) \quad (9)$$

Donde:

D_1 : Diámetro hidráulico de la sección de entrada.

A_R : Relación entre las áreas de salida y entrada.

Para determinar las dimensiones del primer difusor se tomará como base el diámetro del rodete, un ventilador capaz de producir una velocidad del viento de 300 Km/h el cual permitirá determinar la superficie de salida del difusor. A continuación, en la figura 25 se muestra el difusor que se encuentra ubicado junto a la cámara de pruebas.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

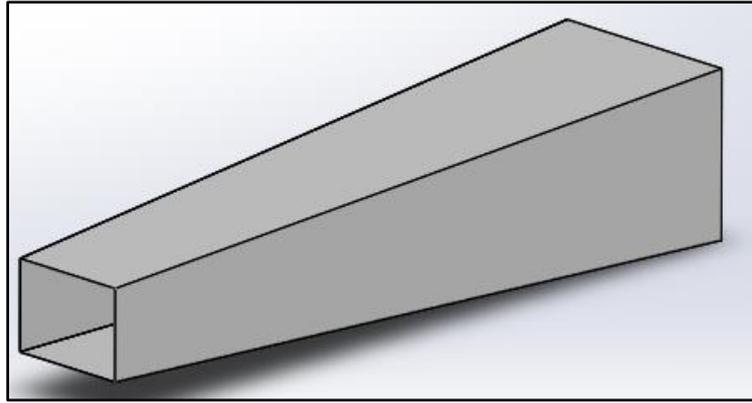


Figura 25. Difusor

Las dimensiones del segundo difusor estarán determinadas por el diámetro del rodete a la entrada y en la salida por la entrada de la tobera.

Codos

Elementos del túnel de viento que permiten cerrar el circuito y el direccionamiento del fluido, van equipados con álabes para disminuir las pérdidas que se generan por el cambio de dirección. Para el dimensionamiento de los codos que van ubicados después del difusor primario las dimensiones corresponden a las medidas de la salida de difusor y un ángulo de 90° con dimensiones constantes tanto a la entrada y a la salida del codo, además la directriz que guiará el flujo tendrá una trayectoria circular tal como se muestra en la figura 26.

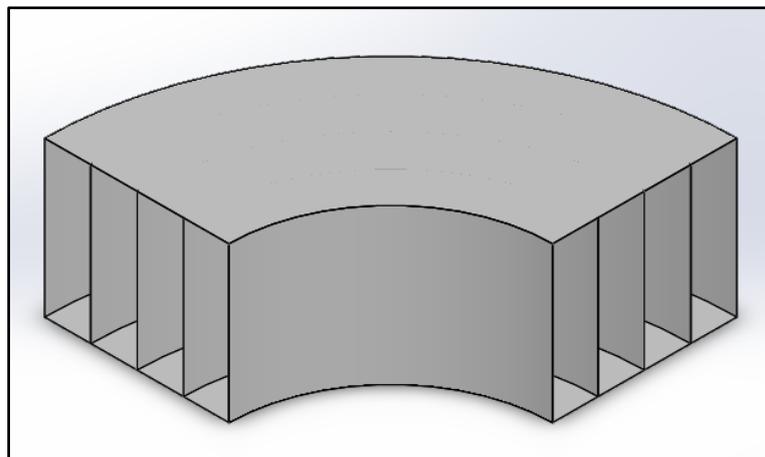


Figura 26. Codo

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Cámara de estabilización.

Este dispositivo tiene la función de estabilizar el flujo de corriente de aire de tal forma que se tenga una distribución uniforme en la entrada de la tobera. Para el diseño de la cámara de estabilización existen tres tipos de panales ver figura 27 y según Silva Treviño (2005), la sección hexagonal es la más eficiente y en cuanto a pérdidas es la que presenta menor porcentaje.

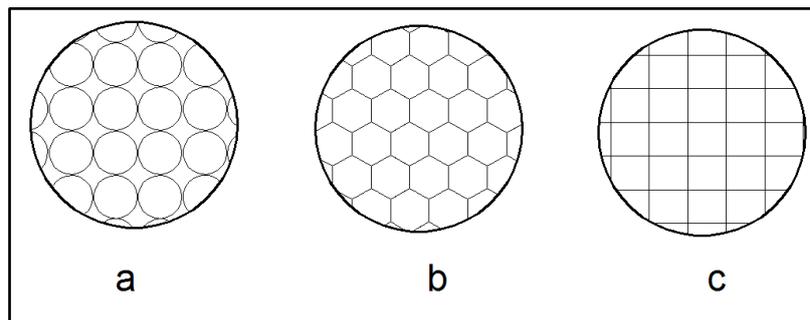


Figura 27. Cámara de estabilización

Barlow et al., (1999) menciona que la cámara de estabilización debe estar constituida de 25000 ductos y para determinar las dimensiones de cada ducto se debe tomar la siguiente relación $\frac{L_h}{D_h} = 6$, donde L_h corresponde a la longitud y D_h es el diámetro hidráulico de cada ducto. Ver figura 28

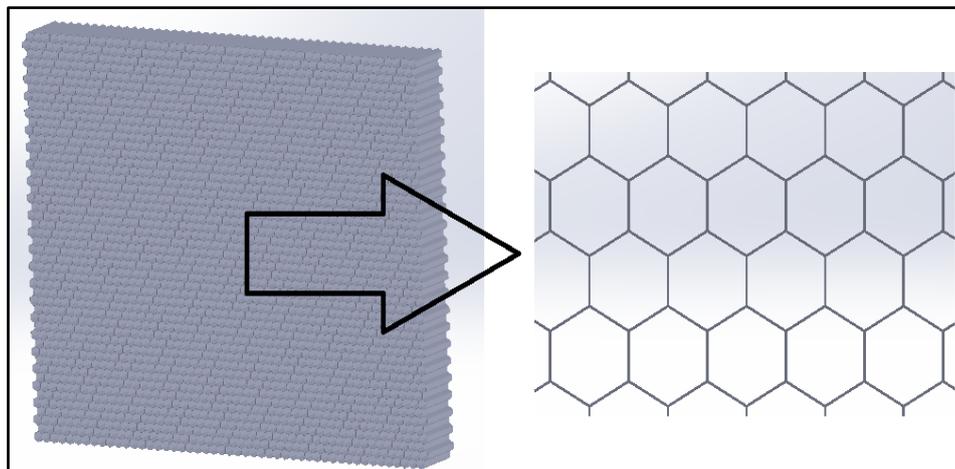


Figura 28. Cámara de estabilización

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Tobera.

Como se puede observar en la figura 29, la tobera se encuentra ubicada entre la zona de estabilización y la cámara de pruebas.

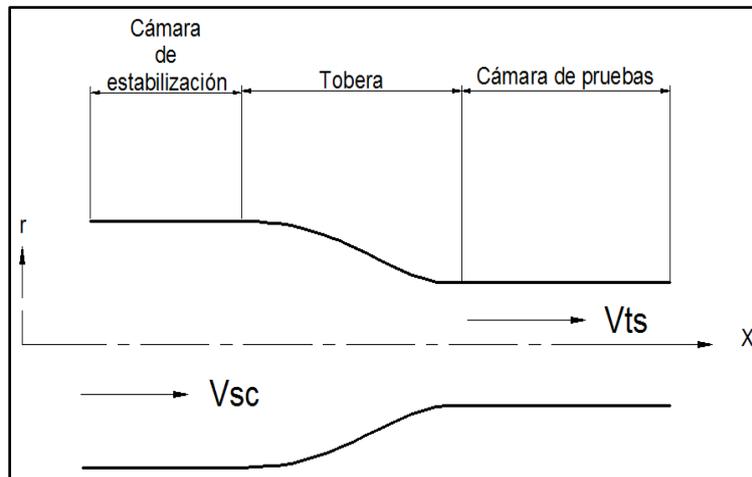


Figura 29. Contracción

La función principal de la tobera es acelerar el flujo para poder obtener la velocidad necesaria en la cámara de pruebas, su dimensionamiento está determinado por las secciones rectangulares de la cámara de ensayos y la zona de estabilización (Leifsson & Koziel, 2015). Para diseñar la geometría hay que definir la longitud y radio de contracción los cuales pueden ser determinados por la figura 30.

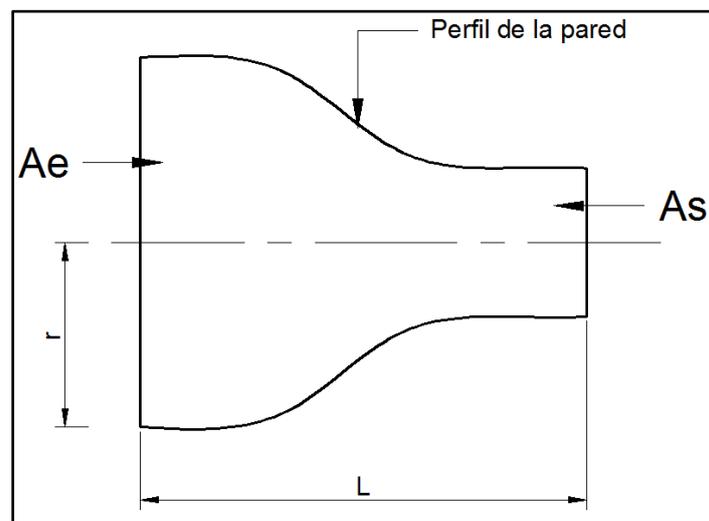


Figura 30. Difusor

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

La siguiente expresión relaciona los parámetros dimensionales de la tobera

$$Rc = \frac{Ae}{As}$$

Donde:

Rc : Radio de compresión.

Ae : Área a la entrada de la tobera.

As : Área a la salida de la tobera.

Benalcázar Venegas (2015) menciona que el radio de compresión óptimo para el diseño de toberas debe estar entre 10 y 6, así como también la longitud de compresión debe tener una medida corta.

Finalmente para encontrar el perfil de las paredes de la tobera hay que utilizar el siguiente polinomio, el cual facilita satisfacer el funcionamiento adecuado de la tobera en el tunel de viento. (Benalcázar Venegas, 2015)

$$h = (-10 \cdot \varepsilon^3 + 15 \cdot \varepsilon^4 - 6 \cdot \varepsilon^5) \cdot (r_e - r_s) + r_e$$

Donde:

h : Altura de contracción.

r_e : Radio entrada de la tobera

r_s : Radio de salida de la tobera.

L : Longitud de compresión.

ε : Relación de longitud

$$\varepsilon = \frac{x}{L} \quad (10)$$

Para poder evaluar la altura de contracción (h), en los distintos puntos de x . Según Benalcázar Venegas (2015) la relación $\frac{L}{D_e} = 1.03$ sugerida por Su, (1991). donde (D_e) es el diámetro hidráulico de la entrada de la tobera y (L) la longitud, parámetros que son

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

indispensable para evaluar el polinomio de perfil de la zona de contracción. En la figura 32 se puede ver la tobera determinada para el túnel de viento.

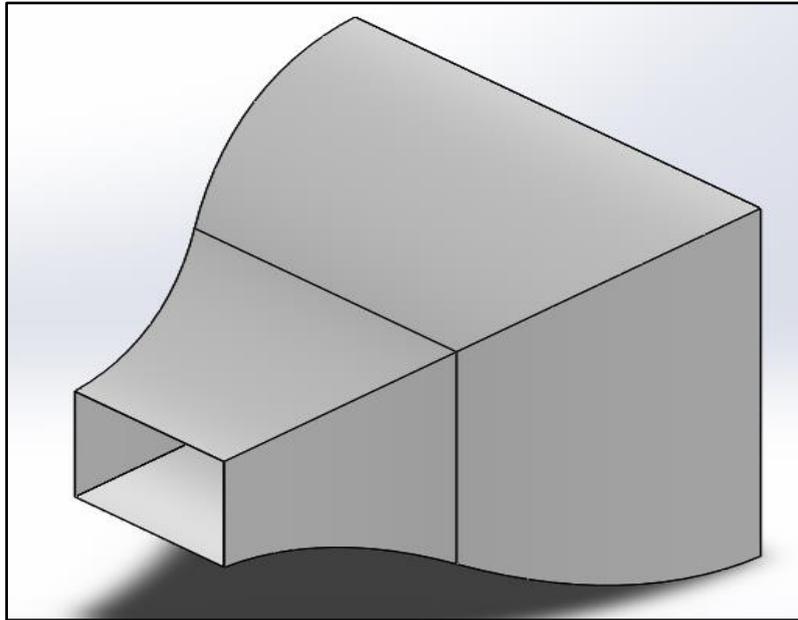


Figura 31. Tobera

Sección impulsadora

Es un conjunto de elementos que tiene como finalidad proporcionarle energía al fluido para que este adquiera la velocidad necesaria en el interior del túnel. Debe estar equipado con los siguientes elementos:

- Barquilla (nacelle)
- Álabes (fan).
- Rectificadores de flujo o corriente (straightence)

En la figura 32 se muestra un esquema donde se puede ver las partes de la sección impulsadora.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

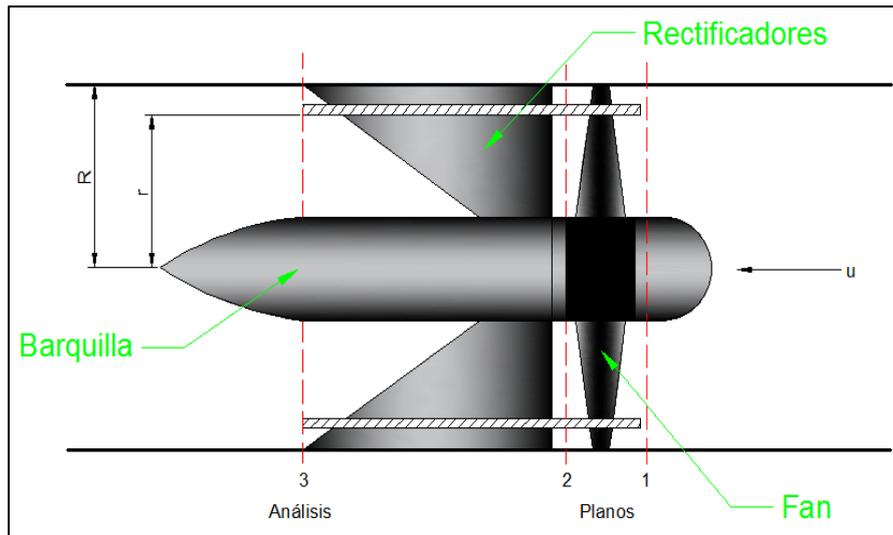


Figura 32. Sección impulsadora

Para el diseño de esta parte del túnel de viento se empieza por:

Rectificadores de corriente

Las dimensiones que tiene los perfiles que conforma los rectificadores de corriente pueden ser determinados al usar las siguientes ecuaciones. (Barlow et al., 1999)

$$C_s = \frac{2\pi \cdot r}{N_s} \quad (11)$$

$$\frac{t_s}{C_s} = \frac{N_s \cdot t_s}{2\pi \cdot R \cdot x} \quad (12)$$

Donde:

C_s : Cuerda del perfil.

N_s : Número de rectificadores

t_s : Espesor del perfil.

r_g : Radio geométrico de la sección

R_{imp} : Radio de la sección impulsadora del ventilador

x : Relación $\frac{r}{R}$

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Para el diseño de los álabes se debe primero determinar el coeficiente de flujo y la relación de elevación y arrastre en la punta del perfil, a través de las ecuaciones 15 y 16.

$$\lambda_f = \frac{\eta_f}{(1-\eta_f)\frac{C_l}{C_d}} \left[\frac{1 - (1-\eta_f)\frac{k_{fs}}{4\eta_f}}{(1-\eta_f)\frac{C_l}{C_d}} \right] \lambda_f^2 + \left[\frac{\left(\frac{k_{fs}}{4\eta_f}\right)^2}{(1-\eta_f)\frac{C_l}{C_d}} \right] \lambda_f^4 \quad (15)$$

$$\frac{C_l}{C_d} = \frac{\eta_f}{(1-\eta_f)\lambda} + \left[\frac{1 - (1-\eta_f)\frac{k_{fs}}{4\eta_f}}{(1-\eta_f)} \right] \lambda_f + \left[\frac{\left(\frac{k_{fs}}{4\eta_f}\right)^2}{(1-\eta_f)} \right] \lambda_f^3 \quad (16)$$

Según Barlow et al. (1999) las ecuaciones descritas anteriormente permiten determinar el coeficiente de flujo de una manera iterativa, donde se considera valores para (λ_f) y $\left(\frac{C_l}{C_d}\right)$ que sean razonables, que pueden ser determinados por el anexo A, donde se muestra gráficas de la eficiencia aproximada del ventilador en función de la velocidad de arrastre, la elevación y el coeficiente de flujo del perfil.

Otras expresiones que permiten determinar ciertos factores del perfil como el régimen de giro (Ω) de la sección impulsadora, el coeficiente de flujo rotacional (ε_{rot}) y el ángulo de flujo interno (ϕ).

$$\varepsilon_{rot} = \frac{\lambda \cdot k_{fs}}{2\eta_{fs}} \quad (17)$$

$$\Omega = \frac{\pi}{\lambda \cdot R_{fs}} \cdot \frac{60}{2\pi} \quad (18)$$

$$\tan \phi = \frac{\lambda_f}{1 - \frac{1}{2} \lambda_f \cdot \varepsilon} \quad (19)$$

En la figura 34 se puede observar el número de álabes y la corona del fan que constituye el ventilador. Los perfiles de la corona se establecen según Barlow et al. (1999) sugiere dos tipos de perfiles aerodinámicos que han sido probados de forma satisfactoria en ventiladores para túneles de viento ver anexo B.

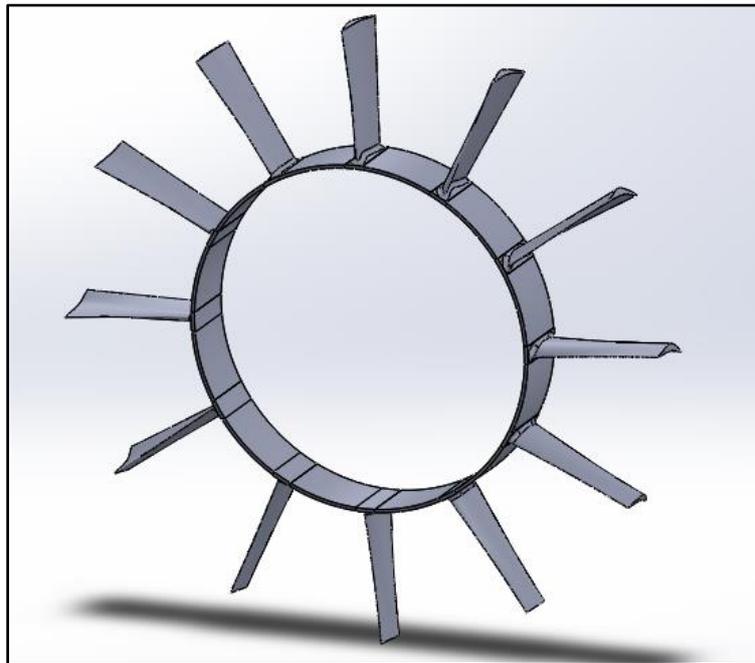


Figura 34. Corona del fan

Cálculo de pérdidas en los ductos y secciones del túnel de viento.

Difusores

Para determinar las pérdidas que se producen en los difusores del túnel de viento se puede utilizar la siguiente ecuación, que es la suma de los factores de pérdidas por fricción y expansión (Benalcázar Venegas, 2015).

$$K_D = K_{fd} + K_{ex} \quad (20)$$

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

El factor de pérdidas por fricción en el difusor depende de los siguientes parámetros: Ángulo cónico de expansión (θ_e), factor de fricción (f) y la relación de áreas (A_r), tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$K_{\lambda d} = \left(1 - \frac{1}{A_r^2}\right) \cdot \frac{f}{8 \operatorname{sen}(\theta_e)}$$

El factor de pérdidas por expansión depende de K_e , que es un factor experimental que está en función del ángulo cónico del difusor y para poder determinarlo se utiliza el polinomio de la ecuación 21, cuyo rango de evaluación están entre $1.5^\circ \leq \theta_e \leq 5^\circ$. (Martínez Coza, 2016)

$$K_{ex} = K_e(\theta_e) \left(1 - \frac{1}{A_r}\right)^2$$

$$K_e = 0,1222 - 0,0459\theta_e + 0,02203\theta_e^2 + 0,003269\theta_e^3 - 0,0006145\theta_e^4 - 0,000028\theta_e^5 + 0,00002337\theta_e^6 \quad (21)$$

Codos

Las pérdidas que se generan en los codos pueden ser determinadas por la siguiente ecuación

$$K_c = K_{fc} + K_\delta \quad (22)$$

Donde:

K_{fc} : Factor de pérdidas por fricción en codos.

K_δ : Factor de pérdidas por la deflexión del flujo.

La forma de encontrar el factor K_{fc} es

$$K_{fc} = 0,0175 \frac{R_0}{D_{hc}} \cdot \delta \cdot f \quad (23)$$

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Donde (R_0) corresponde al radio del codo, (D_{hc}) diámetro hidráulico, (δ) ángulo de deflexión de la corriente en grados y el coeficiente de fricción de Darcy (f).

El factor de pérdida ocasionado por la deflexión del flujo en el codo se establece por.

$$K_\delta = A_1 \cdot B_1 \cdot C_1 \quad (24)$$

Donde los términos A_1 , B_1 y C_1 están en función del alto y ancho de la sección del codo h_o y b_o y se determinan con las formas de evaluación (Martínez Coza, 2016).

$$A_1 = \begin{cases} 0,9 \text{sen}(\delta_0) & \delta_0 < 70^\circ \\ 0,7 + 0,35 \frac{\delta_0}{90} & \delta_0 > 100^\circ \\ 1 & \delta_0 = 90^\circ \end{cases}$$

$$B_1 = \begin{cases} \frac{0,21}{\left(\frac{R_0}{b_0}\right)^{2,5}} & \frac{R_0}{b_0} < 1 \\ 0,21 & \frac{R_0}{b_0} \geq 1 \\ \left(\frac{R_0}{b_0}\right)^{0,5} & \end{cases}$$

$$C_1 = \begin{cases} 0,85 + \frac{0,125}{\frac{h_0}{b_0}} & \frac{h_0}{b_0} < 4 \\ 1,115 - \frac{0,84}{\frac{h_0}{b_0}} & \frac{h_0}{b_0} \geq 4 \end{cases}$$

Tobera o boquilla

Para estimar las pérdidas que se dan en este ducto, existe un método rudimentario en el cual se considera la existencia de pérdidas solo por fricción. Para determinar el factor de pérdidas primero se tiene la expresión de la caída de la boquilla o tobera a través de la ecuación de Darcy Weisbach (Barlow et al., 1999).

$$\Delta P_f = \int_0^{L_n} f \frac{\rho}{2} \cdot \frac{V_n^2}{D_n} dx \quad (25)$$

Donde:

L_n : Longitud de la zona de reducción, boquillas o tobera.

D_n : Diámetro hidráulico de cada sección de la tobera.

V_n : Velocidad media del ducto $V_n^2 = V_{sc} \left(\frac{D_{sc}}{D_n} \right)$

La caída de presión también se puede expresar en función del coeficiente de pérdidas en la boquilla fricción a través de la siguiente ecuación.

$$\Delta P_f = \frac{K_n}{q_{sc}}$$

Operando la ecuación 25 y sustituyendo las distintas equivalencias se puede encontrar la expresión para determinar las pérdidas en la zona de contracción.

$$k_n = \lambda \frac{L_n}{D_{hsc}} \int_0^1 \frac{D_{hsc}^5}{D_{hn}^5 \left(\frac{x}{L_n} \right)} d \left(\frac{x}{L_n} \right) \quad (26)$$

Donde D_{hsc} Diámetro hidráulico de la cámara de estabilización.

Según (Barlow et al., 1999) de la ecuación anterior se puede encontrar una expresión que permita hallar de forma razonable el coeficiente de pérdidas de la boquilla que fue establecida por *Wattendorf*. Ver ecuación 27

$$K_{nt} = 0,32 f_{av} \frac{L_n}{D_{hts}} \quad (27)$$

Donde:

D_{hts} : Diámetro hidráulico de la cámara de pruebas.

f_{av} : Coeficiente de fricción de la boquilla.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Ductos rectos

La expresión que facilita encontrar las pérdidas que se tiene en ductos de sección constante según (Benalcázar Venegas, 2015) es:

$$k_t = f_t \frac{L_t}{D_{ht}} \quad (28)$$

La ecuación anterior está en función de f_t factor de fricción, D_{ht} Diámetro hidráulico y L_t longitud, todos estos parámetros corresponden al ducto de sección constante.

Cámara de estabilización

Dentro de sus principales funciones ayuda a disminuir la turbulencia generada en los codos y a homogenizar el caudal de aire que entra a la boquilla, para cumplir con este trabajo, la cámara de estabilización está compuesta de una serie de ductos pequeños que tienen una sección determinada que generan pérdidas y pueden ser determinados por la ecuación 29.

$$K_h = f_h \left(\frac{L_h}{D_{hh}} + 3 \right) \left(\frac{1}{\beta_h} \right)^2 + \left(\frac{1}{\beta_h} - 1 \right)^2 \quad (29)$$

Donde:

L_h : Longitud de un ducto de la cámara de estabilización.

D_{hh} : Diámetro hidráulico de un ducto de la cámara de estabilización.

f_h : Factor de fricción de cada ducto de la cámara.

β_h : Porosidad (número de ductos cámara de estabilización).

Como la sección del ducto que se va a utilizar, para la cámara de estabilización, tiene forma hexagonal y dependiendo el rango en el que se encuentre con respecto al número de Reynolds que está basado en el espesor del material, se

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

puede utilizar las siguientes ecuaciones para determinar el factor de fricción f_h (Barlow et al., 1999).

$$\lambda_h = \begin{cases} 0,375 \left(\frac{\Delta_h}{D_h}\right)^{0,4} R_{e\Delta}^{-0,1} & \text{para } R_{e\Delta} \leq 275 \\ 0,214 \left(\frac{\Delta_h}{D_h}\right)^{0,4} & \text{para } R_{e\Delta} > 275 \end{cases}$$

Para encontrar las pérdidas de cada ducto, es necesario la obtención del factor de pérdidas de Darcy ver ecuación 7, la cual está en función de la rugosidad del material a utilizar ver tabla 4 y del número de Reynolds ver ecuación 5 que está en función de la viscosidad dinámica del fluido y de la densidad, para lo cual se utiliza la tabla 5 a la que se puede acceder por medio de la temperatura del fluido.

Tabla 4.

Rugosidades de materiales

Rugosidades	
Material	E(m)
Vidrio	liso
Plástico	3,00E-07
Tubo extruido; cobre; Latón y acero	1,50E-06
Acero, comercial o soldado	4,60E-05
Hierro galvanizado	1,50E-04
Hierro dúctil, recubierto	1,20E-04
Hierro dúctil, no recubierto	2,40E-04
Concreto, bien fabricado	1,20E-04
Acero Remachado	1,80E-03

(Mott & Brito, 2006)

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Tabla 5.

Propiedades Físicas del aire a presión atmosférica.

PROPIEDADES FÍSICAS DEL AIRE a presión atmosférica				
Temperatura	Densidad	Viscosidad dinámica	Viscosidad cinemática	Velocidad del sonido
°C	P kg/m ³	μ N.s/m ²	ν m ² /s	C m/s
-30	1,452	1,56E-05	1,08E-05	312
-20	1,394	1,61E-05	1,16E-05	319
-10	1,342	1,67E-05	1,24E-05	325
0	1,292	1,72E-05	1,33E-05	331
10	1,247	1,76E-05	1,42E-05	337
20	1,204	1,81E-05	1,51E-05	343
30	1,164	1,86E-05	1,60E-05	349
40	1,127	1,91E-05	1,69E-05	355
50	1,092	1,95E-05	1,79E-05	360
60	1,06	2,00E-05	1,89E-05	366
70	1,03	2,05E-05	1,99E-05	371
80	1	2,09E-05	2,09E-05	377
90	0,973	2,13E-05	2,19E-05	382
100	0,946	2,17E-05	2,30E-05	387
200	0,746	2,57E-05	3,45E-05	436
300	0,616	2,93E-05	4,75E-05	480

(UTN-FRBA, 2010)

Revisión de literatura

Para establecer la literatura utilizada en este proyecto se realizó una investigación bibliográfica de documentos indexados, libros, tesis, revistas, informes y páginas web, las cuales fueron seleccionados por la importancia y resultados obtenidos como: *Low Speed Wind Tunnel Testing*, Diseño y construcción de un túnel de viento cerrado para calibraciones de sensores e instrumentos de medición del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), *CFD Simulation of the Volvo Cars Slotted Walls Wind Tunne*, etc.

Población y muestra

La población para este proyecto se considera el parque automotor del Ecuador.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Alternativas de selección.

Para determinar las alternativas de selección se consideran los vehículos que más importaciones tienen al año y según Meléndez Sánchez (2014) son:

- A. Vehículos grandes: Camiones y buses.
- B. Vehículos medianos: Furgonetas y Camionetas.
- C. Vehículos pequeños: Automóviles.
- D. Vehículos Agrícolas: Tracto camiones.

Criterios de selección.

El proceso de selección se realiza bajo un cierto criterio de selección, que depende de las necesidades del país, que por su ubicación geográfica tiene fuertes corrientes de aire sobre todo en la región, los parámetros que se consideran son:

- I. Cantidad de vehículos en el país.
- II. Accidentes por efectos del viento.
- III. Cantidad de autopartes, para efectos del viento.

El proceso de selección se sigue el método de producto de matrices que es muy efectivo para seleccionar las alternativas factibles para un estudio. En la tabla 6 se muestran los resultados de la selección.

Tabla 6.

Matriz de selección de vehículos

Criterios de selección					
Alternativas	I	II	III	Ponderación	
A	0,2	0,23	0,28	0,4	I A= 22,72
B	0,32	0,32	0,25	0,4	II B= 30,53
C	0,4	0,36	0,25	0,2	III C= 35,55
D	0,08	0,09	0,21		IV D= 11,21
	1	1	1	1	100

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

De acuerdo con la tabla anterior el mayor porcentaje tiene la opción C, que corresponde a los vehículos pequeños y se realizará el estudio para la ciudad de Quito.

Para determinar la muestra se toma como base las medidas de vehículos pequeños que se utilizan en el país ver tabla 7.

Tabla 7.

Dimensiones de Vehículos

Marca	Modelo	Longitud	Anchura	Altura	Maletero	Foto
Suzuki	S-Cross	4300 mm	1785 mm	1585 mm	430 dm ³	
Skoda	Spaceback	4304 mm	1706 mm	1459 mm	415 dm ³	
Kia	cee'd	4310 mm	1780 mm	1470 mm	380 dm ³	
Kia	pro_cee'd	4310 mm	1780 mm	1430 mm	380 dm ³	
Ford	Kuga	4524 mm	1838 mm	1702 mm	456 dm ³	
Chevrolet	Cruze sw	4681 mm	1797 mm	1521 mm		
Renault	Mégane Coupé	4312 mm	1804 mm	1423 mm	344 dm ³	
Audi	A3 Sportback	4313 mm	1785 mm	1426 mm	365 dm ³	
Dacia	Duster	4315 mm	1822 mm	1695 mm	475 dm ³	
Mazda	CX-5	4550 mm	1840 mm	1675 mm	506 dm ³	
Nissan	X-Trail	4643 mm	1820 mm	1695 mm	135 dm ³	
Mercedes-Benz	Citan Tourer	4321 mm	1829 mm	1809 mm	685 dm ³	
Hyundai	Grand Santa Fe	4915	1885	1700	634 dm ³	

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Citroen	C4	4329 mm	1789 mm	1489 mm	408 dm ³	
BMW	Serie 1	4329 mm	1765 mm	1440 mm	360 dm ³	
Toyota	Yaris	4330 mm	1760 mm	1475 mm	360 dm ³	

(medidasdecoches.com, n.d.)

De los modelos que se tiene en la tabla anterior se desarrolla un análisis en base a las autopartes que tienen, de la cuales se mencionan las que ayudan a la aerodinámica de un vehículo y según Olivares de Jodar (2011) son las que se mencionan en la tabla 8.

Tabla 8.

Autopartes que ayudan a la aerodinámica de los vehículos

NOMBRE DE AUTOPARTES	DETALLE	FIGURA
Alerones	Existen delanteros, traseros y laterales	
Difusores de aire inferiores	Están en la parte inferior trasera del vehículo.	
Retrovisores	Existe algunos modelos	
Entradas de tomas de aire	Están instaladas en la parte delante del vehículo	
Para Golpes	Ubicados en la parte delantera	
Ruedas	Modificaciones en los aros que ayudan a la aerodinámica del vehículo.	

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Además de las autopartes que se mencionan anteriormente, también existen un sin número que son esenciales y que se fabrican en el país como son: Neumáticos radial y convencional, Alfombras, Asientos de vehículos (individuales, delanteros y posteriores), forros y tapicería, materiales para frenos de autos, silenciadores, partes del sistema de escape, Vidrios, parabrisas, paquetes, muelles, filtros de combustible, arneses de cables para sistemas de audio, acumuladores eléctricos y productos relacionados con el sistema de frenos y embragues (Proecuador.gob.ec, 2017).

De las autopartes que se mencionan anteriormente casi la mayoría de los vehículos la poseen pero los que tienen mejores modificaciones, mayor número son las marcas que más se comercializan en el país que según (patiodeautos.com, 2016) son: Chevrolet, Mazda, Nissan, Hyundai, Kia y Susuki. En el orden de las marcas anteriores se conformarían las alterativas a seleccionar que estarían representadas por las letras del alfabeto que van desde la A hasta la F respectivamente.

Por otra parte, también se menciona los parámetros del criterio de selección que son los siguientes:

- I. Mayor número de autopartes
- II. Marca más conocida en el país
- III. Menor costo de adquisición.
- IV. Capacidad.

A continuación, se muestra la tabla 9 en donde se realiza el proceso de selección de la alternativa adecuada para el estudio en este proyecto.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Tabla 9.

Matriz de selección de las marcas de vehículos

Alternativas	Criterios de Selección					Ponderación			Ponderación (%)
	I	II	III	IV	V				
A	0,20	0,19	0,18	0,17	0,18	0,35	I	A=	18,82
B	0,17	0,15	0,18	0,17	0,18	0,25	II	B=	16,59
C	0,13	0,15	0,15	0,17	0,20	0,20	III	C=	15,15
D	0,17	0,17	0,20	0,14	0,16	0,10	IV	D=	17,11
E	0,20	0,15	0,20	0,14	0,18	0,10	V	E=	17,97
F	0,13	0,19	0,10	0,20	0,09		VI	F=	14,36
Σ	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00			100

El resultado obtenido de este análisis matricial da como resultado tres marcas con mayor porcentaje que son: Chevrolet, Hyundai y Kia. Sin embargo, para este proyecto se considera la marca de mayor porcentaje que es Chevrolet.

Selección de instrumentos de investigación

Investigación documental, mediante la obtención de información en documentos de investigación como libros, publicaciones, tesis, ensayos, entre otros. Utilizando procedimientos sistemáticos de tratamientos de datos.

Para la obtención de resultados se utilizará herramientas computacionales como programas de diseño mecánico y programas para el desarrollo de los modelos matemáticos como son: *Solidworks*, *Ansys* y *Matlab*.

Solidworks: Es un programa de diseño mecánico que se utilizará para la creación de modelos 3-D del túnel de viento que tendrá dimensiones reales. La herramienta que este programa tienen facilita la creación de planos, el ensamblado de los ductos y la creación de los distintos componentes como son: Los difusores, codos, ventilador, zona de estabilización,

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

etc. Además, tiene una extensa biblioteca de distintos materiales con sus propiedades mecánicas y térmicas.

Ansys CFX: Se trata de un programa muy completo que se basa en elementos finitos que permite realizar la simulación y análisis del comportamiento de fluidos a través de CFD (*Computational Fluids Dynamics*), y será utilizado para la obtención de resultados, gráficas y ver el comportamiento del fluido en el interior los ductos del túnel de viento, especialmente en los codos, difusores, tobera y cámara de pruebas, en la figura 35 se puede ver el mallado en la cámara de ensayos desarrollado en *Ansys*.

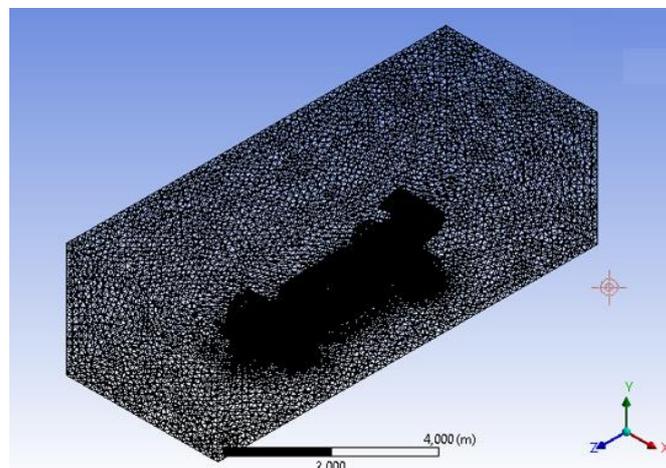


Figura 35. Mallado para la cámara de ensayos por *Ansys*

Matlab: En este proyecto se lo utilizará para desarrollar las distintas ecuaciones y encontrar las dimensiones de los codos, difusores y el perfil de la tobera. Así como también, facilita realizar el cálculo de las pérdidas que tiene cada ducto y la malla de la cámara de estabilización ya que al ser un software que utiliza matrices brinda la facilidad, de evaluar las distintas expresiones que se utilizan en este trabajo para el dimensionamiento del túnel.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Validez y confiabilidad de los instrumentos

Para la verificación de los resultados y la confiabilidad de los mismos, los programas que se van a utilizar son los más requeridos por científicos y empresas, ya que cuentan con la certificación necesaria para el desarrollo de investigación.

Estos programas facilitarán el tratamiento de datos para ver resultados en distintas zonas del túnel de viento, así como también mediante las gráficas con el historial de colores permitirán ver zonas críticas.

Materiales y equipos.

Al ser una investigación documental el equipo indispensable para el desarrollo de este trabajo es una computadora ya que al ser un proyecto a escala real y por la complejidad y procesamiento de datos se requieren que la máquina cuente con la capacidad y velocidad de disco y RAM. La computadora que se va a utilizar en este proyecto es de marca Xeon que presenta las siguientes características.

Memoria instalada en RAM 64 GB.

Tipo de sistema: Windows 10 pro

Procesador: Intel Xeon CPU E5-2609 v4

Sistema operativo: 64 bits.

Capacidad del disco: 1 T

Diseño e implementación y simulación

El diseño está basado en las dimensiones de los ductos y formas ya establecidas anteriormente, de acuerdo con esto se realiza la simulación pertinente del túnel de viento, que fue realizada con el uso del *software Design Modeler by Ansys*. Ver figura 36.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

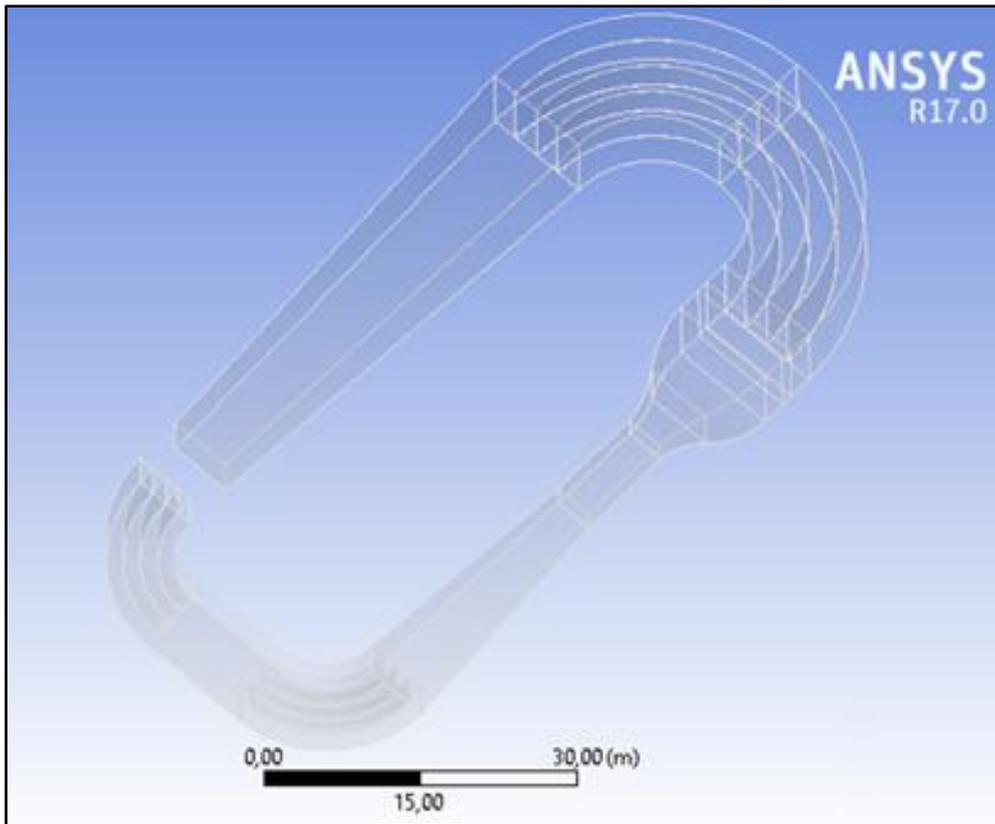


Figura 36. Modelo 3-D del túnel de viento en Ansys

El análisis fluido-dinámico será desarrollado con el software *Fluent by Ansys*, donde los parámetros para la simulación son los siguientes:

- Modelo en tres dimensiones 3D.
- Fluido Compresible.
- Fluido: Aire. (Densidad: 1,225 Kg/m³).
- Cálculo de fluido estacionario.
- Entrada definida como “Ingreso de Velocidad” (*Velocity Inlet*) (km/h de velocidad de aire que se inyecta con un ventilador).
- Salida definida como presión de Salida (Es una condición de abertura libre de una salida a presión atmosférica).
- Las velocidades son bajas (Subsónicas)

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

En la figura 37, se puede observar la ubicación de los puntos de entrada y salida del túnel de viento.

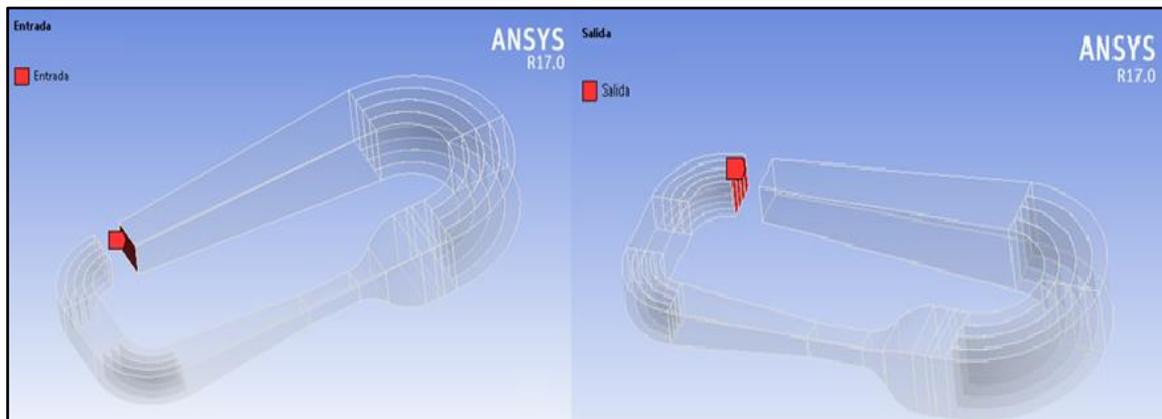


Figura 37. Entrada y salida del túnel de viento en Ansys

Simulación

El proceso de simulación se va a llevar a cabo en cuatro etapas con la finalidad de analizar los distintos parámetros de salida y el comportamiento del fluido en los ductos.

Primera simulación (túnel vacío y sin la malla de estabilización)

Para el desarrollo de esta simulación se utiliza el tipo de mallado tetraédrico fino la metodología de control es Sizing (Ajuste de la dimensión máxima de los elementos de la malla) el tamaño máximo del elemento o radio Jacobiano utilizado es de 0,05 m unificado y por todo el volumen del túnel de viento, la finalidad de la malla utilizada es proporcionar resultados ideales. Ver figura 38.

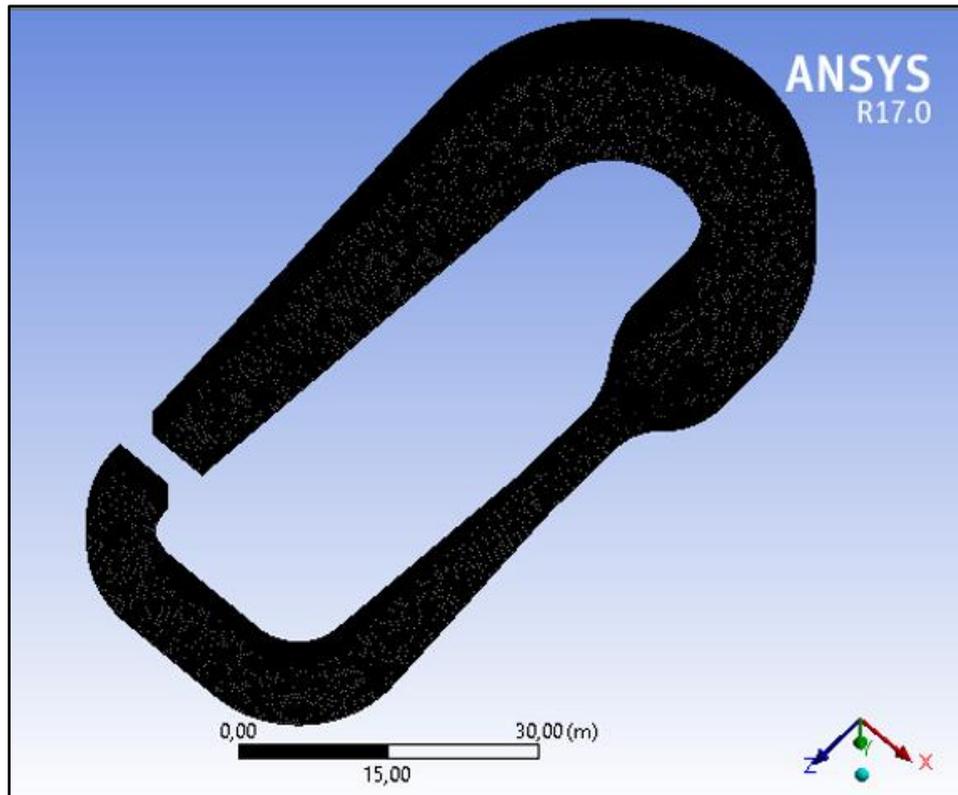


Figura 38. Mallado de 0,05m para los ductos del túnel sin malla de estabilización

En esta etapa se utilizará tres parámetros de velocidad a la entrada los cuales estarán enfocados en determinar velocidades en la cámara de pruebas que superen los 80 m/s (288 km/h) porque según P. Liu et al. (2017) a partir de esta magnitud se hacen pruebas en modelos reales ya que se considera como la más crítica para el diseño de cámara de ensayo, por el hecho de que se puede generar turbulencia en esta zona. Otro parámetro que se quiere analizar es la presión y el cambio que subiría con las distintas variaciones de velocidad. En la figura 39 se puede observar el comportamiento del aire para una condición determinada de entrada de aire. Cabe mencionar que las dimensiones que presentan corresponden a la velocidad del aire y está en Km/h.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

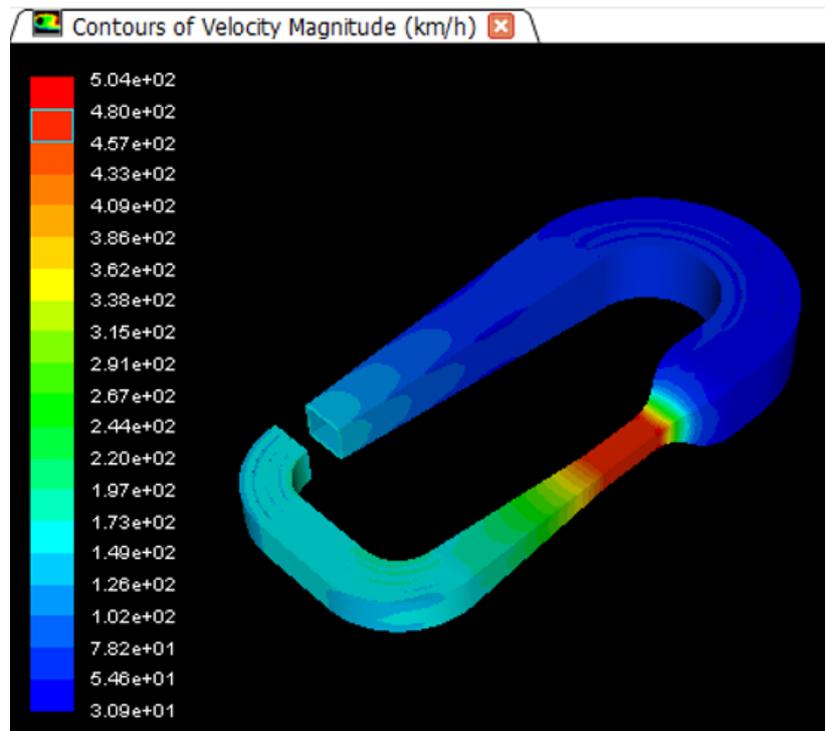


Figura 39. Túnel sin la malla de estabilización.

Dentro de esta etapa también se busca analizar los valores de velocidad y presión para el túnel de viento cuando se utiliza 2 materiales para la construcción de los ductos y con la velocidad máxima de generación de ventilador de 250 a 300 Km/h. Ver figura 40

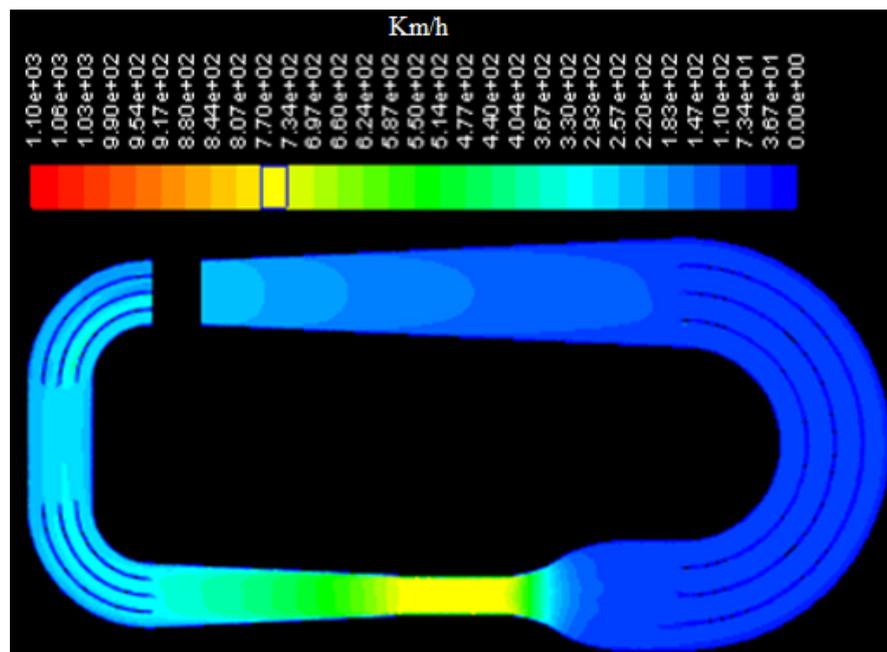


Figura 40. Túnel con un material determinado.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Segunda simulación (túnel vacío y con la malla de estabilización)

Para el desarrollo de esta simulación se utilizará la metodología de control que es Sizing específico para cada zona del túnel, los radios Jacobianos que se utilizan son 0.35m para los ductos rectos y difusores, de 0.05 m para los codos y de 0,001 m para la malla de la cámara de estabilización, ver el proceso en el anexo C, este proceso de mallado se realiza con la finalidad de obtener aproximaciones reales en las zonas más críticas del túnel. Ver figura 41.

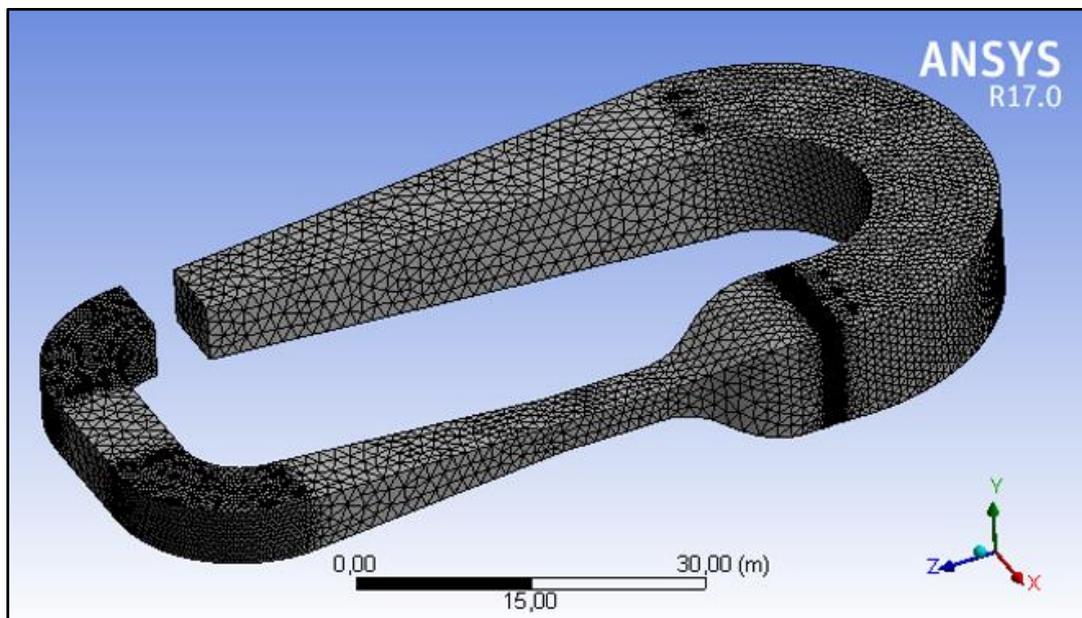


Figura 41. Mallado de túnel con la malla de estabilización.

La simulación que se llevará a cabo en esta parte es con el fin de ver las líneas de flujo del viento a través de la malla, mostrar resultados de temperatura, velocidad y presión en todo el túnel de viento y analizar el comportamiento del fluido a través de los orificios de la malla de estabilización y ver el índice de turbulencia existente. Los parámetros a utilizar son velocidades máximas de trabajo de ventilador que están entre 250 y 300 Km/h y temperatura ambiente para la ciudad de Quito 22°C. En la figura 42 se tiene una simulación de este proceso.

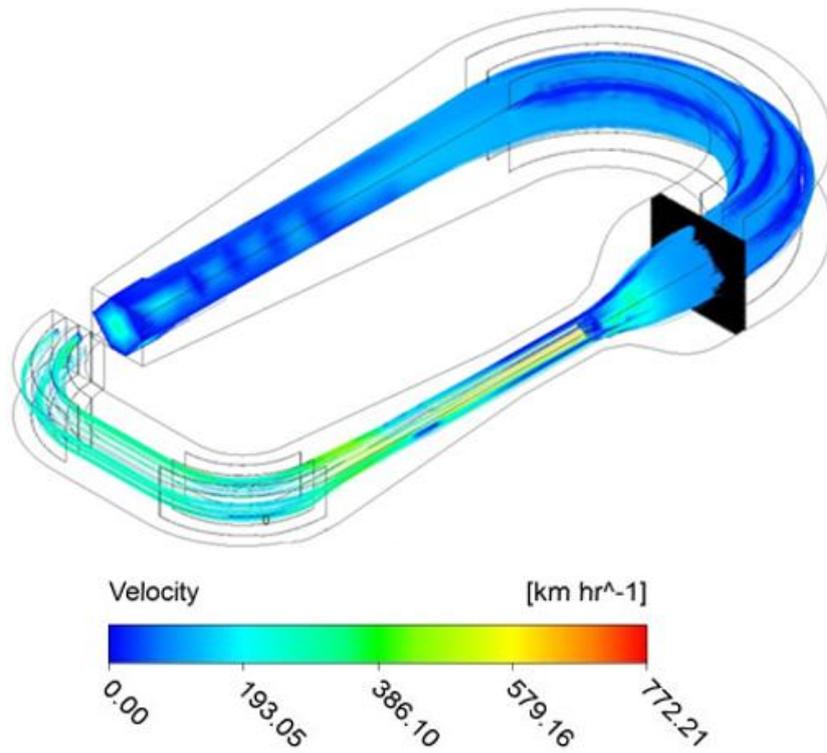


Figura 42. Túnel con la malla de estabilización.

Tercera simulación (túnel con vehículo y con la malla de estabilización)

En esta parte se realizará la implementación del vehículo en el interior de la cámara y el modelado del volumen *SpaceClaim*. Ver figura 43

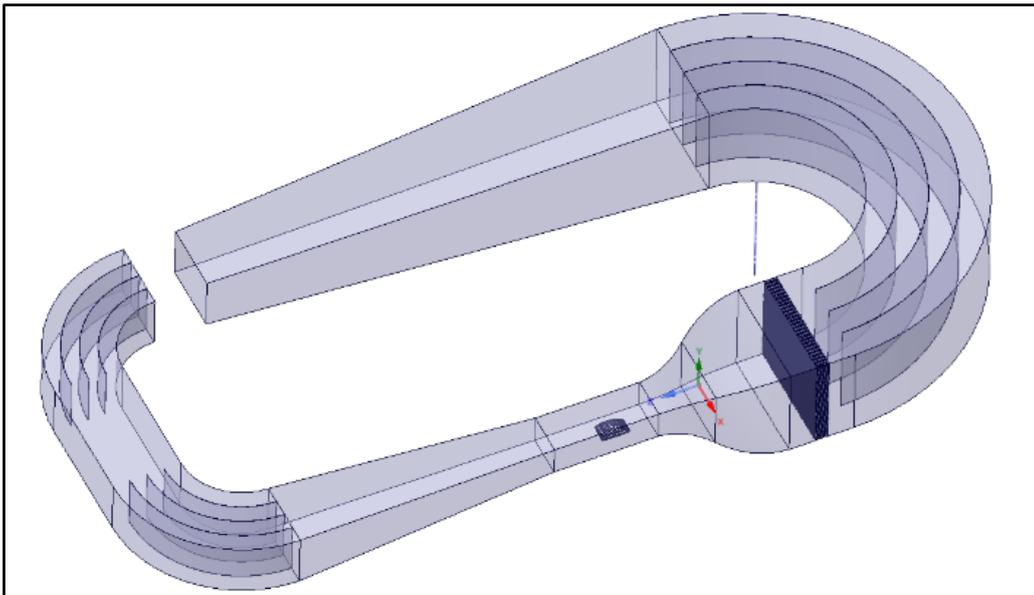


Figura 43. Túnel de viento con el vehículo en el interior.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Posteriormente se elabora la esquematización de los módulos para iniciar la simulación en *Fluid Flow (Fluent)* y el mallado del volumen con un radio jacobiano de 0,03 m, en la zona de la cámara de pruebas con 0,01 m y en la malla de estabilización de 0,001m, la metodología es Sizing para cada zona, este proceso tiene el objetivo de obtener resultados reales en las partes críticas que son las que se mencionan anteriormente. Ver figura 44.

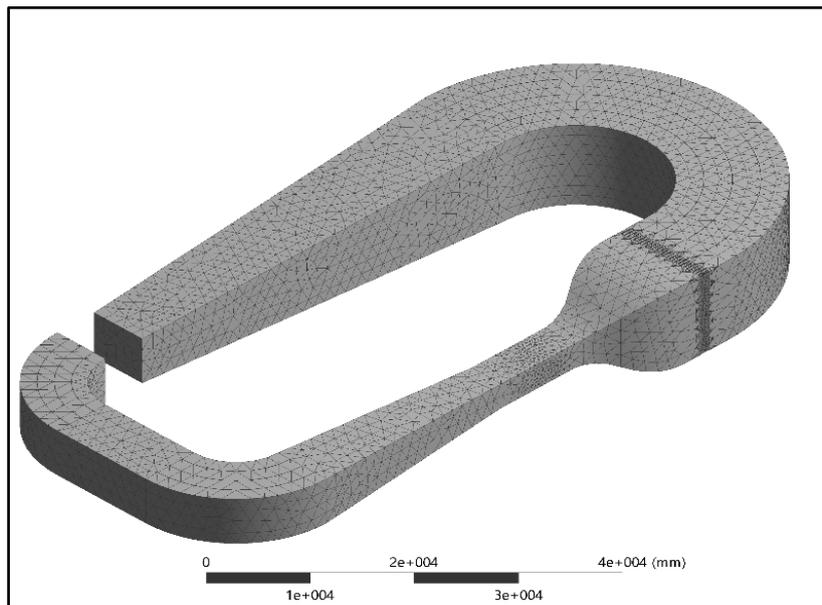


Figura 44. Mallado del túnel de viento con el vehículo.

Las condiciones utilizadas para el ensayo se pueden observar en la figura 45.

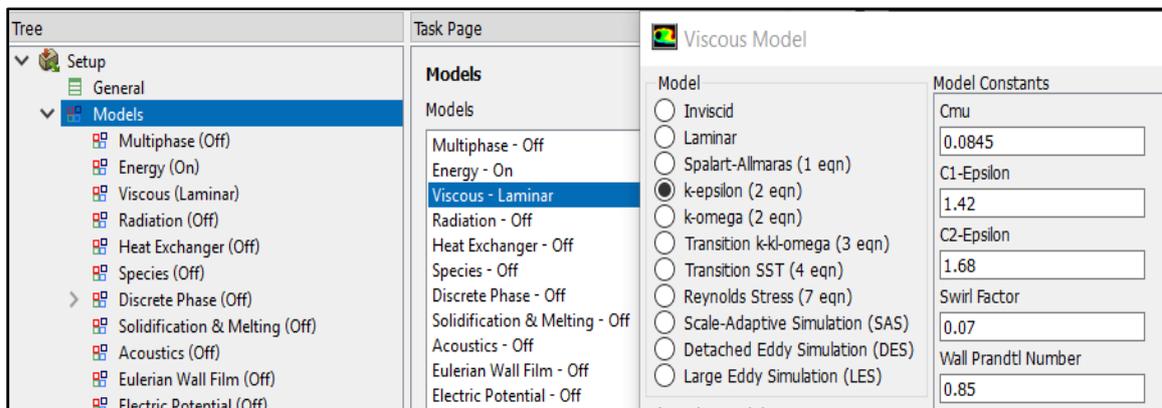


Figura 45. Esquematización de los módulos para la simulación.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

En la tabla 10 se detalla, el tipo de estudio utilizado para la simulación que es viscoso y laminar, también el modelo matemático k-epsilon y las constantes con las que trabajo por defecto.

Tabla 10.

Modelo matemático de la simulación

Parámetros		
Tipo de estudio	Modelo matemático	Constantes del modelo
Viscoso-laminar	k-epsilon	C _{mu} : 0.0845 C1-epsilon: 1,42 C2-epsilon: 1,68 Factor de Swirl: 0,07 Número de Prandl: 0,85

Posteriormente las condiciones de contorno de presión y velocidad son establecidas de resultados obtenidos en la segunda simulación y corresponden a 73281 (Pa) y 300 km/h.

Por último, se presenta en la figura 46 la simulación obtenida del túnel con el vehículo en la cámara, el objetivo de este proceso es ver cómo se comportan el fluido en la zona de pruebas y después de ella. Así como también, obtener valores de velocidad y presión en condiciones de operación críticas, donde se tenga la máxima velocidad producida por el ventilador.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

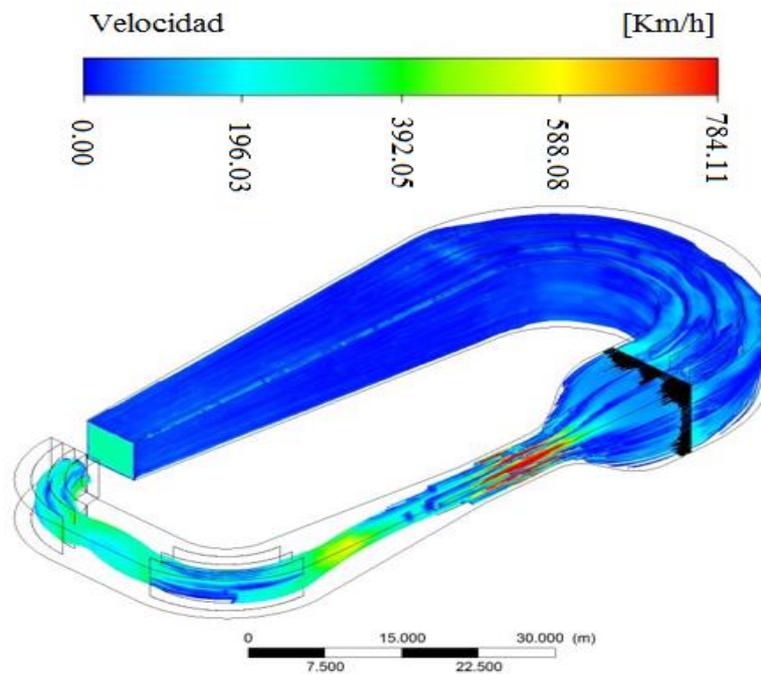


Figura 46. Simulación del túnel con el vehículo.

Construcción del prototipo del túnel de viento

Una vez que se tiene el diseño del túnel de viento, con todos sus componentes se procede a realizar una impresión 3D de un prototipo a escala para mostrar la geometría de todas las partes que la conforman y analizar el comportamiento de la velocidad, la temperatura y presión. Por último, comparar resultados obtenidos en la cámara de pruebas con los datos de la simulación de la misma zona.

Para la impresión se utilizó la siguiente impresora: *FLASHFORGE Finder 3D Printer* que se muestra en la figura 47.

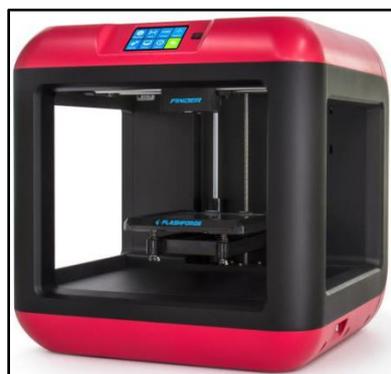


Figura 47. Resultados de la presión del viento con malla (Flashforge Finder 3D Printer, 2017)

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Especificaciones:

Tamaño del embalaje: 500 mm x 500 mm x 500 mm

Tamaño actual: 420 mm x 420 mm x 420 mm

Peso del embalaje: 31.5 libras

Peso real: 27 libras

Precisión de posicionamiento: 0.0001 "en el eje Z, 0.0004" en el plano xy

Resolución: 0.004 "

Construir volumen: 140 mm x 140 mm x 140 mm

Compatibilidad del filamento: PLA / PVA

Volumen de construcción: 14.0 x 14.0 x 14.0 cms.

Velocidad de impresión: 24 cms. Cúbicos / h

De los diferentes materiales con que puede trabajar la impresora, el material utilizado en la impresión es: Plástico ABS, obteniendo el siguiente prototipo del túnel de viento como se muestra en la figura 48.



Figura 48. Resultados de la presión del viento con malla.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Una vez que se tiene el prototipo, la siguiente fase fue colocarle un sensor de velocidad, presión y temperatura a la salida del ventilador y entrada de la cámara de pruebas de manera que luego de haber realizado la programación de los sensores podamos obtener las gráficas del comportamiento del fluido dentro del túnel de viento. A continuación se detalla de forma breve como se elaboró la programación, donde se utilizó el arduino y su respectivo lenguaje de programación.

Programación

El módulo de control utilizado para los sensores es un integrado programable conocido como arduino UNO, se usó un total de 4 salidas de información, análogos para los sensores de presión, temperatura y altitud.

- En Windows solo usamos Arduino Genuino Versión 1.8.3 (Solo pruebas del Arduino)
- En Linux usamos Ubuntu Versión 16.04-02
 - Arduino 1.8.3
 - Pip
 - Python 2.7
 - Librería Serial
 - Librería Matplotlib
 - Librería time
 - Librería Sys
 - Librería math

En el anexo D se tiene el proceso de programación detallado completamente, así como también la explicación de cómo se obtuvo las figuras de presión, temperatura y velocidad.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Propuesta de costos.

Para determinar el costo que tendrá el túnel de viento, primero se describen los materiales de construcción y para ello se establecen las cuatro partes importantes como son: Cámara de pruebas, cámara de estabilización, ventilador y ductos. De los cuales se define lo siguiente:

Cámara de pruebas: Como ya se había mencionado anteriormente es la parte de túnel más compleja ya que tiene diversos materiales de construcción, debe estar equipada con tecnología de punta para que permita recrear el comportamiento de los fenómenos naturales que afectan a un automóvil, así como también sus paredes laterales deben ser transparentes para que se pueda visualizar el fenómeno ocurrido en el interior. De acuerdo con algunas publicaciones es la zona que mayor costo presenta por la tecnología empleada, razón por la cual no se puede tener una cifra exacta o aproximada de su costo de fabricación.

Cámara de estabilización: Esta zona consta principalmente de la malla de estabilización de flujo que son varios ductos hechos de acero, para determinar su costo aproximado debe calcular el tonelaje de acero necesario para la fabricación de toda la malla y con el precio del tonelaje se podría tener una cifra aproximada del costo de material a utilizar.

Ventilador: Su costo se podría conseguir a través de catálogos en los cuales se buscaría parámetros de potencia, velocidad y dimensionamiento general como su diámetro requerido.

Ductos: Están conformados por los codos, difusores y ductos rectos, al tener dimensiones extremadamente grandes los materiales de construcción son el acero y el hormigón armado. Se puede tener un costo aproximado a través de la cotización del metro cuadrado de construcción en obra civil.

Posteriormente se describen los componentes electrónicos que lleva el túnel con sus respectivos precios, que son:

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Instrumentos de medición:

Medidores de presión: Elementos que van instalados en distintas zonas del túnel, que pueden ser en la cámara de pruebas, tobera, codos y difusores.

Medidores de flujo másico: Instrumentos que permiten medir la cantidad de aire que va por cada ducto.

Medidores de velocidad: Facilitan verificar la velocidad del viento, en las distintas zonas del túnel.

Medidores de temperatura: Instrumentos que van colocados en la cámara de ensayos, siempre y cuando esté climatizada.

Resultados

Presentación y análisis de resultados

En esta sección se mostrarán los resultados obtenidos del dimensionamiento de los ductos, pérdidas generadas por los elementos de todo el túnel de viento y los resultados generados de la simulación de CFD, en el software Ansys. En la figura 49 se muestra las dimensiones generales del túnel con sus respectivos elementos.

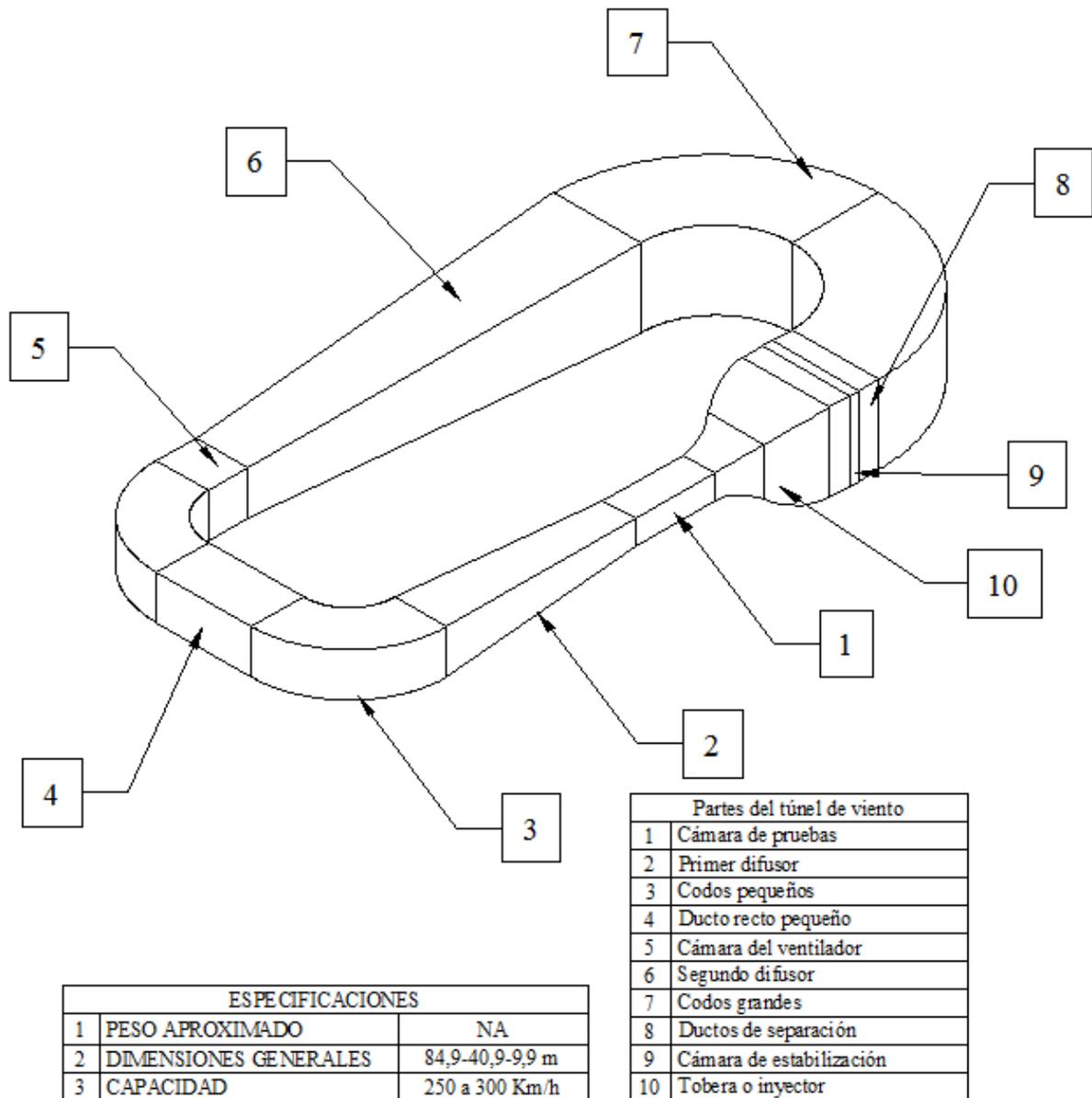


Figura 49. Túnel de viento completo.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Dimensionamiento de ductos.*Cámara de pruebas*

Tomando como base la alternativa seleccionada de la marca de vehículo Chevrolet que es una de las más comercializadas en el Ecuador y el dimensionamiento que se encuentra en la tabla 7 y que corresponde al modelo Cruze sw. Las medidas son:

- Longitud: 4,681 m
- Ancho: 1,797 m
- Alto: 1,521m

Además, de las sugerencias para el dimensionamiento mínimo y considerando que la cámara de pruebas es la más importante del sistema y que deber tener dimensiones grandes para que se pueda probar los modelos sin mayores inconvenientes (Olivares de Jodar, 2011). Entonces se tiene que las medidas para la cámara de ensayos son:

$$\text{Largo} = 4,681 * (2) = 9,362 \text{ m extendiendo a } 10 \text{ m}$$

$$\text{Ancho} = (1,797 * 0,3) * 2 + 1,797 = 2,875 \text{ m extendiendo a } 4 \text{ m}$$

$$\text{Alto} = (1,521 * 0,5) * 2 + 1,521 = 2,28 \text{ m extendiendo a } 3 \text{ m}$$

Ver figura 50.

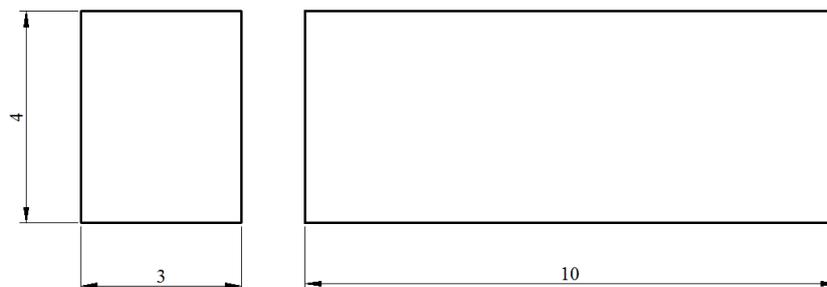


Figura 50. Cámara de ensayos.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Las extensiones que se hace a las dimensiones de la cámara de pruebas son realizadas con el fin de proporcionar mayor espacio para la instalación de equipos de medición. En el plano (TVD-101) se puede observar las especificaciones de la cámara.

Difusores

Las dimensiones fueron encontradas en base a la fórmula 9 que se muestra en el método, además se utiliza consideraciones como $AR = 3$ cuyo ángulo ideal debe ser de $\theta_e \leq 3$ según Barlow et al. (1999), entonces la longitud aproximada del difusor es:

$$L = \frac{3,43(\sqrt{3} - 1)}{2\tan(3)} = 23,95 \text{ m}$$

Aproximado a un valor entero se considera una longitud de 25 m, y se recalcula el ángulo de inclinación del ducto.

$$\theta_e = \arctan\left(\frac{3,43(\sqrt{3} - 1)}{2 * 25}\right) = 2,87^\circ$$

Entonces a través de fórmulas se establece las especificaciones para cada difusor y se muestran a continuación.

Dimensiones del primer difusor.

Longitud = 25 m.

Área de entrada: Ancho 4 m y alto 3 m

Área de salida: Ancho 6,52 m y alto 5,52 m

Angulo de inclinación = 2,87°. Ver figura 51.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

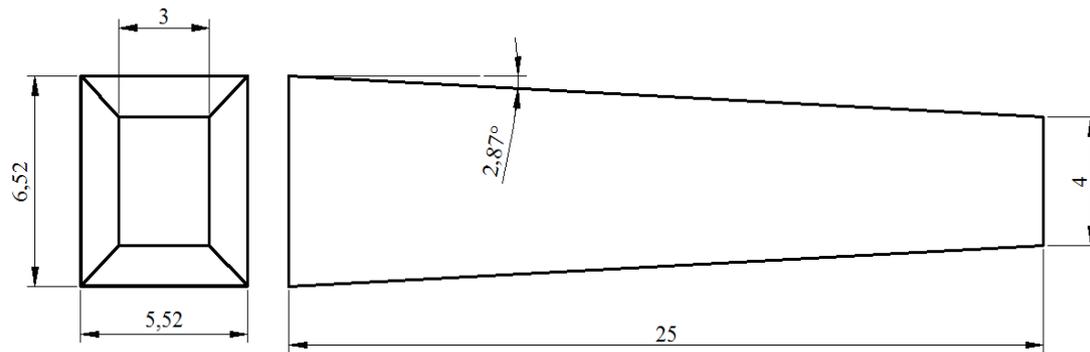


Figura 51. Primer difusor.

Dimensiones del segundo difusor.

Longitud = 47,2 m.

Área de entrada: Ancho 6,52 m y alto 5,52 m

Área de salida: Ancho 10,9 m y alto 9,9 m

Ángulo de inclinación = $2,65^\circ$ ver figura 52

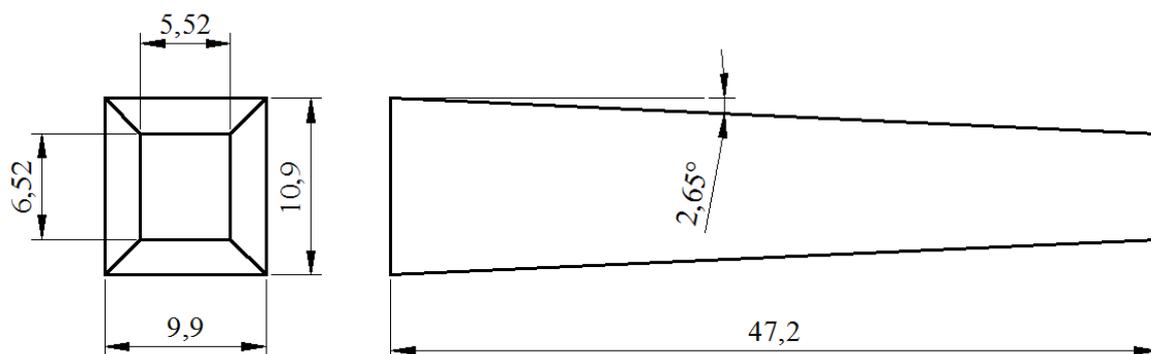


Figura 52. Segundo difusor.

Las medidas de los dos difusores están en los planos TDV-102 y TDV-106

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Codos

Las dimensiones de los codos para los perfiles corresponden al área de salida del primero y segundo difusor, mientras que para determinar el radio de curvatura se analiza el coeficiente de pérdidas que está en función del radio de curvatura del codo con la ecuación 21 especificada en la metodología.

$$K_c = 0,0175 \frac{R_0}{D_{hc}} \cdot \delta \cdot f + A_1 \cdot B_1 \cdot C_1$$

En la figura 53 se puede ver los datos generados por la ecuación de pérdidas de codos que es una comparación entre las pérdidas y el radio de curvatura para los codos pequeños.

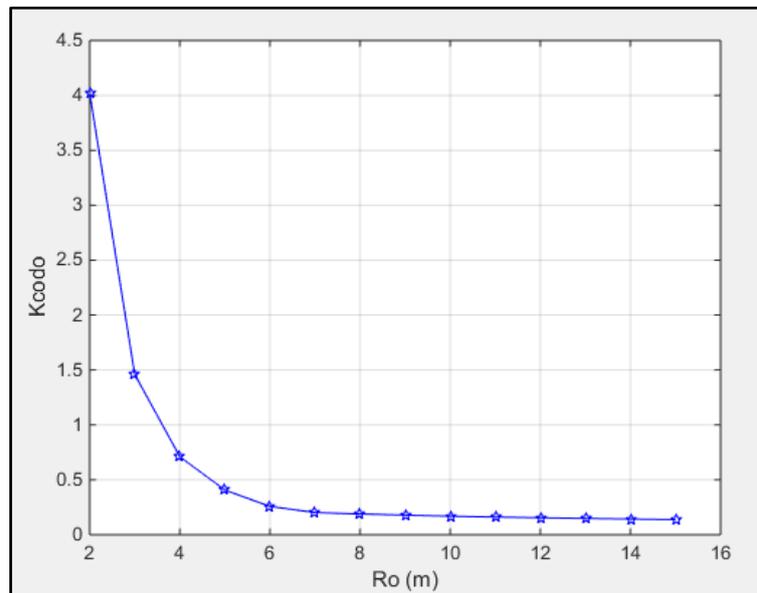


Figura 53. Pérdidas en los codos inferiores.

Como se puede ver en la figura anterior las pérdidas menores se tiene cuando mayor es el radio del codo, para tener simetría en el modelo del túnel, en este proyecto se considera un radio de 9 m, en figura 54 de muestran todas las dimensiones para los codos pequeños, así como también la ubicación de los álabes directores.

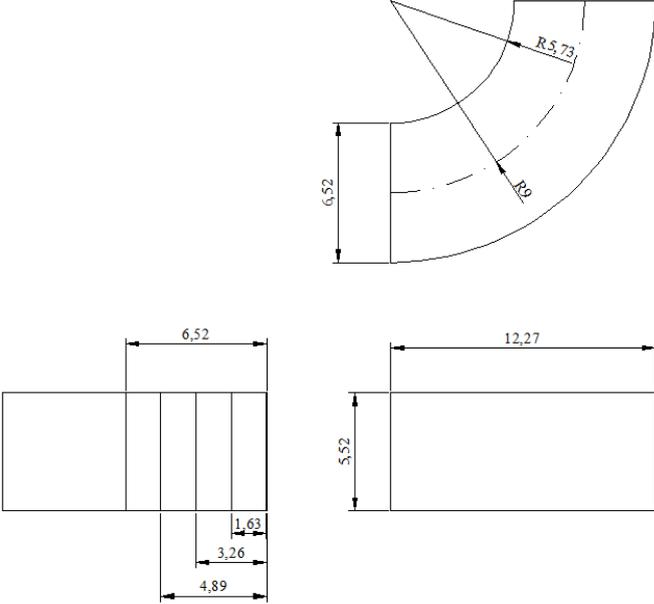


Figura 54. Medidas de los codos pequeños.

Del mismo modo para determinar el radio de los codos grades se opta por realizar la gráfica de pérdidas vs radio que se puede ver en la figura 55.

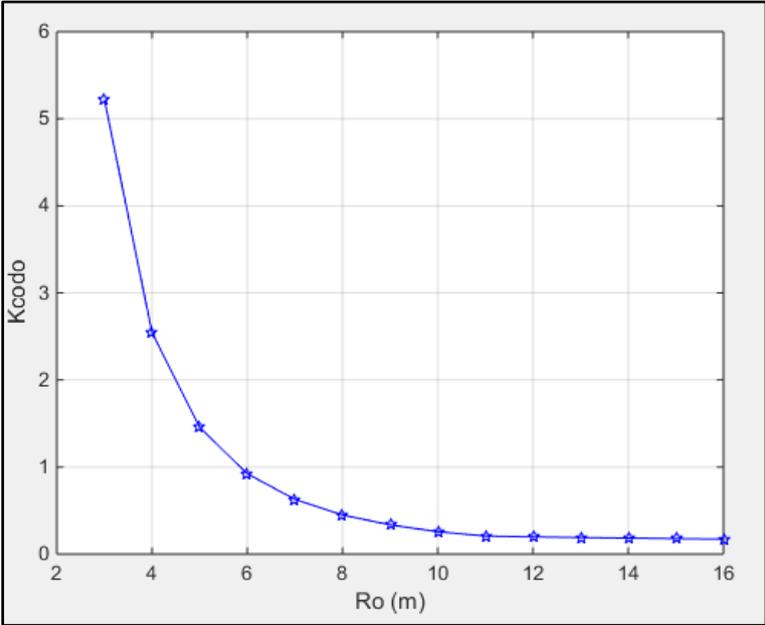


Figura 55. Pérdidas en los codos superiores.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Por simetría del túnel y bajas pérdidas se considera un radio de 15 metros. Ver dimensiones en la figura 56.

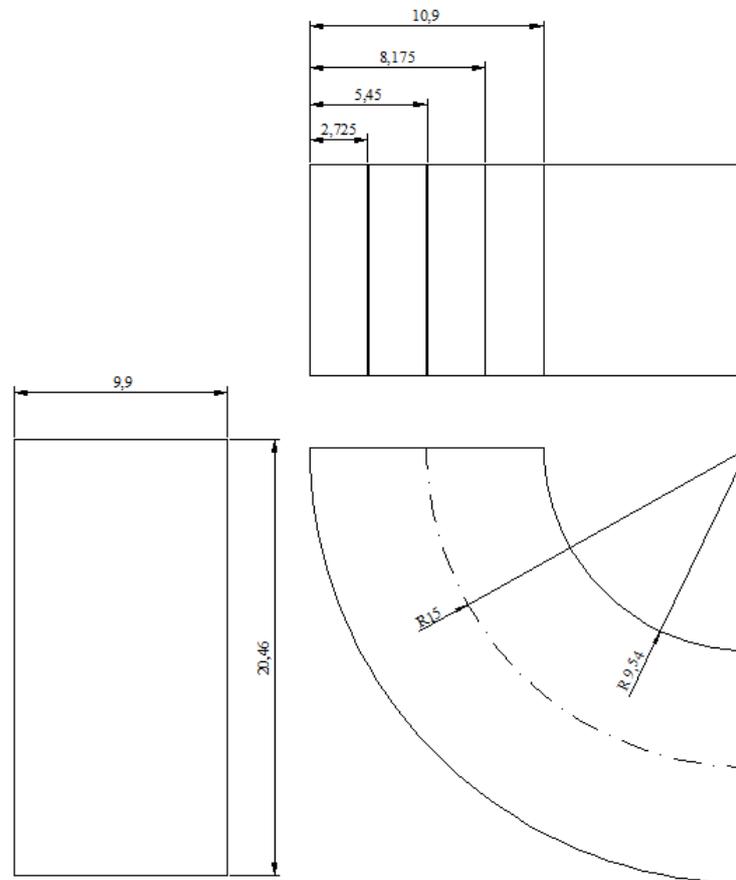


Figura 56. Medidas de los codos grandes.

En los planos (TDV-103 y TDV-) se tiene las especificaciones para los codos pequeños y grandes respectivamente.

Tobera/injector.

La dimensión de la entrada de la tobera es la misma que se tiene en la cámara de estabilización y de la salida corresponde a la cámara de pruebas. El perfil se evalúa por medio del siguiente polinomio.

$$h(x) = 3,475 \left(-\frac{10}{1331} x^3 + \frac{15}{14641} x^4 - \frac{6}{161051} x^5 \right) + 5,19$$

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

El polinomio mostrado anteriormente se generó por medio de las fórmulas establecidas en el método para el diseño de la tobera. A través del *software Matlab* y dando valores para la variable (x) dentro del siguiente rango $0 \leq x \leq 11$, se obtuvo la figura 57, que muestra el perfil de la tobera.

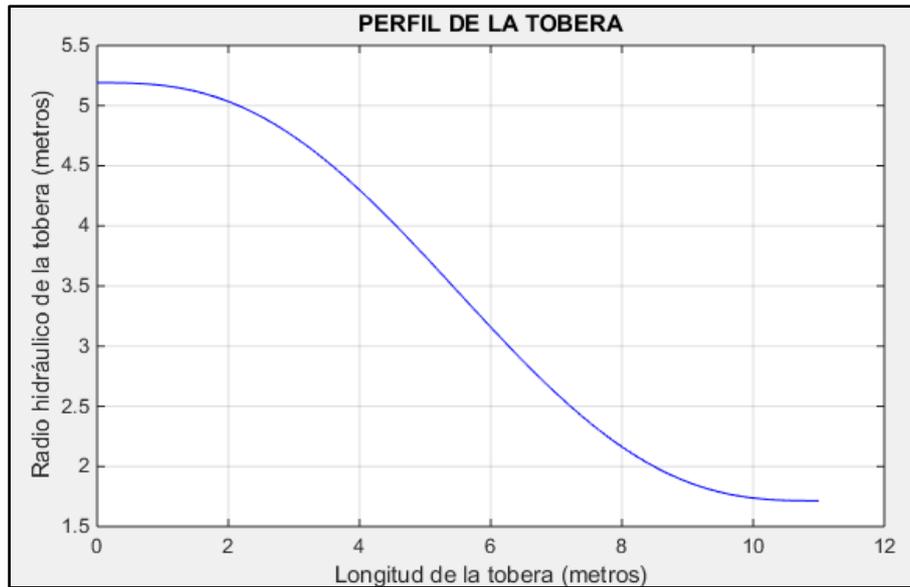


Figura 57. Pérdidas en los codos superiores.

Las dimensiones de la tobera son:

Perfil rectangular de entrada = 10,9 x 9,9 m

Perfil rectangular de salida = 4 x 3 m

Longitud = 11 m

Relación de compresión (Rc) = 8,99.

Ver figura 58, las dimensiones mencionadas anteriormente que fueron obtenidos del TVD-110.

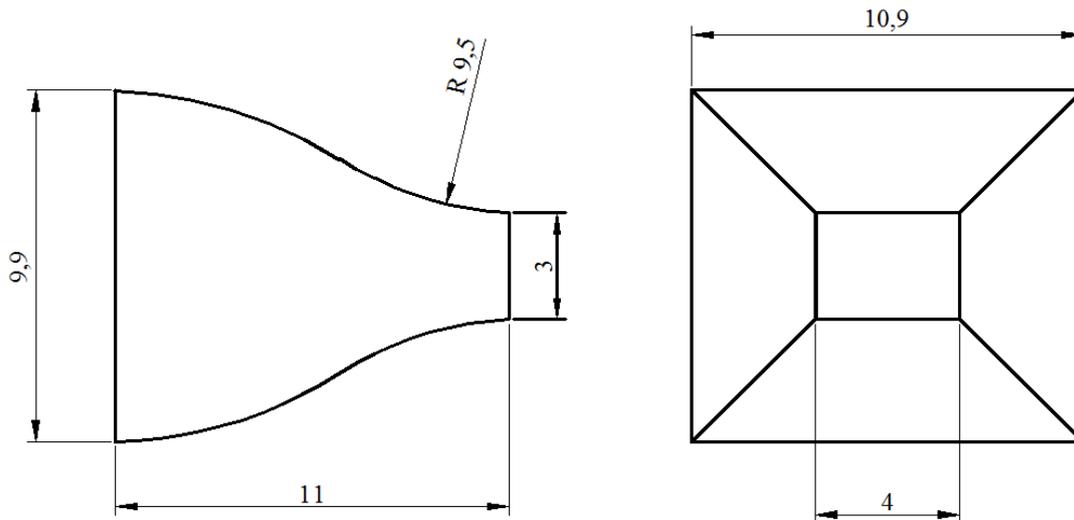


Figura 58. Dimensiones de la tobera.

Cámara de Estabilización.

Para determinar las dimensiones de cada ducto, primero se establece el área que ocupen en el túnel y para este caso corresponde a la formada por la sección de los perfiles de entrada y salida de los codos grandes del túnel y es de $107,91 \text{ m}^2$.

A través de la siguiente relación se puede encontrar la longitud.

$$\frac{L_h}{D_h} = 6$$

El diámetro hidráulico del ducto es de $0,2 \text{ m}$ valor que se considera para este proyecto por facilidad de distribución en el panel de la cámara de estabilización.

$$L_h = 6 * 0,2 = 1,2 \text{ m}$$

Entonces cada ducto de la cámara de estabilización tendría una forma hexagonal por las ventajas mencionadas en el método. Donde sus dimensiones son:

Diámetro hidráulico = $0,2 \text{ m}$

Longitud = $1,2 \text{ m}$. Ver figura 59

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

En el plano TDV-111 se puede ver cómo está constituida la malla y el número de ductos que tiene.

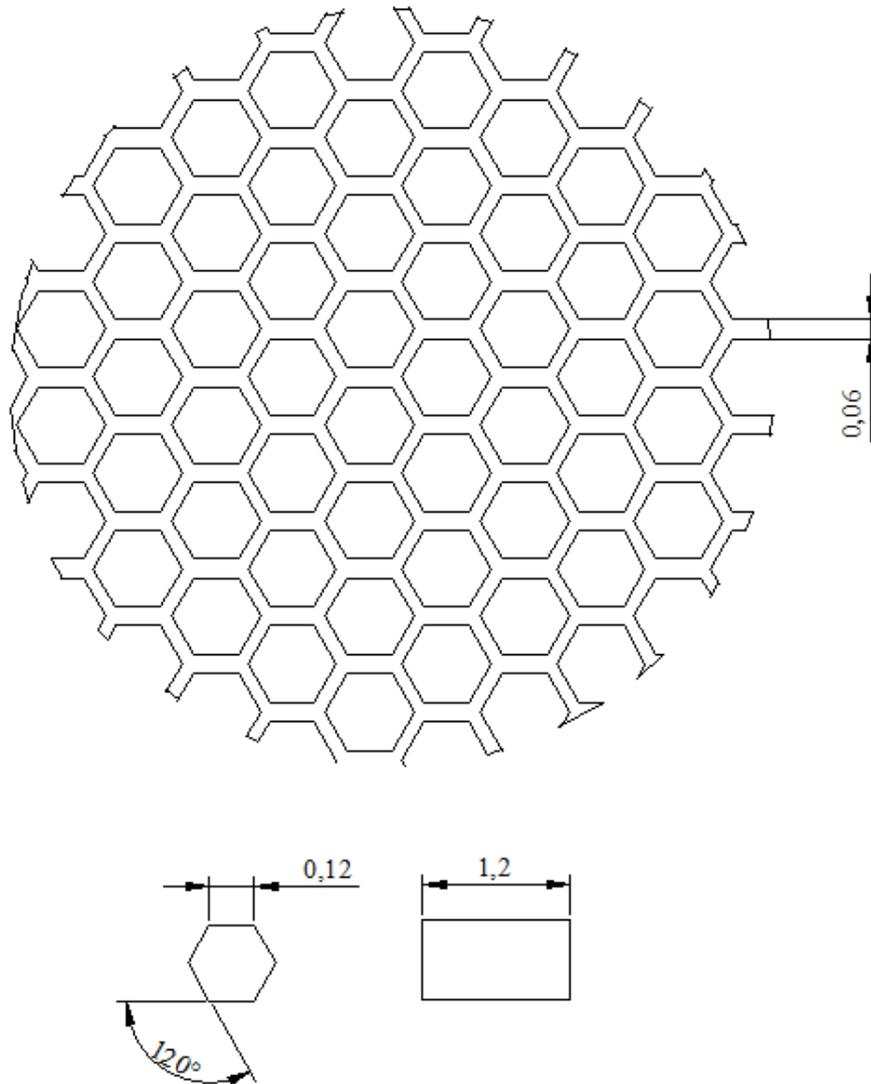


Figura 59. Dimensiones de la tobera.

Cálculo de Pérdidas generadas en los ductos.

Para determinar el valor de las pérdidas generadas en cada ducto se utilizan las ecuaciones establecidas para cada uno en el método y a través del *software Matlab* se realiza el modelo matemático (Ver anexo E). Con ayuda de los parámetros ambientales y de operación del túnel como son: Temperatura de 22 °C, presión de

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

728,75 hPa, la velocidad en el rango $250 \leq V \leq 300$ y el fluido que es aire, cuyas propiedades se pueden ver en la tabla 5, se evalúan las distintas ecuaciones de pérdidas.

Y a continuación, se muestra el resultado obtenido de las pérdidas para cada ducto de túnel de viento con materiales de acero y concreto. Ver tabla 11 y 12.

La tabla 9 muestra los valores de pérdidas para materiales como el acero para la mayoría de los ductos, acrílico para la cámara de ensayos y concreto para el ducto del ventilador.

Tabla 11.

Primer cálculo de pérdidas para los ductos.

N	Ductos	Pérdidas	%	Material
1	Primer codo pequeño	0,1783	9,29	Acero
2	Segundo codo pequeño	0,1783	9,29	Acero
3	Primer codo grande	0,1768	9,21	Acero
4	Segundo codo grande	0,1768	9,21	Acero
5	Primer difusor	0,0954	4,97	Acero
6	Segundo difusor	0,1046	5,45	Acero
7	Tobera	0,0017	0,09	Acero
8	Cámara de ensayos	0,0038	0,20	Acrílico
9	Ducto Recto pequeño	0,003	0,16	Acero
10	Primer ducto separador	0,000336	0,02	Acero
11	Segundo ducto separador	0,000336	0,02	Acero
12	Cámara de estabilización	0,9981	52,01	Acero
13	Cámara del fan	0,0014	0,07	Concreto
Total		1,918872	100	

En la tabla 12 se tiene las pérdidas para los ductos con material de hormigón armado para la mayoría de ducto con la excepción de la cámara de pruebas y la cámara de estabilización que son de acrílico y acero respectivamente.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Tabla 12.

Segundo cálculo de pérdidas para los ductos.

N	Ductos	Pérdidas	%	Material
1	Primer codo pequeño	0,1783	9,19	Concreto
2	Segundo codo pequeño	0,1783	9,19	Concreto
3	Primer codo grande	0,1768	9,11	Concreto
4	Segundo codo grande	0,1768	9,11	Concreto
5	Primer difusor	0,0956	4,93	Concreto
6	Segundo difusor	0,1047	5,40	Concreto
7	Tobera	0,019	0,98	Concreto
8	Cámara de ensayos	0,0038	0,20	Acrílico
9	Ducto Recto pequeño	0,0035	0,18	Concreto
10	Primer ducto separador	0,00038	0,02	Concreto
11	Segundo ducto separador	0,0038	0,20	Concreto
12	Cámara de estabilización	0,9981	51,44	Acero
13	Cámara del fan	0,0013	0,07	Concreto
	Total	1,94038	100	

Cálculo del costo de un túnel con concreto.

De acuerdo con el plano de conjunto del túnel de viento (TVD:001) el túnel ocupa una superficie de 3472,41 m² y el costo del m² de terreno en la ciudad de Quito bordea los 160 dólares (quito.olx.com.ec, 2017). Entonces el costo de terreno necesario para la construcción del túnel tendría un valor de.

$$\text{Costo de terreno: } 3472,41\text{m}^2 * 160 \frac{\text{dólares}}{\text{m}^2} = 555586,6 \text{ dólares}$$

Si se considera que los ductos son construidos de hormigón y según (eluniverso.com, n.d.) el m² de construcción varía entre los 400 a 1500 dólares dependiendo los acabados, para este proyecto se toma el precio más alto por la complejidad de los ductos y se tendría los siguientes valores para cada ducto.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

$$\text{Primer difusor: } 100\text{m}^2 * 1500 \frac{\text{dólares}}{\text{m}^2} = 150.000,00 \text{ dólares}$$

$$\text{Segundo difusor: } 307,74\text{m}^2 * 1500 \frac{\text{dólares}}{\text{m}^2} = 461.616,00 \text{ dólares}$$

$$\text{Codos pequeños: } 301,10\text{m}^2 * 1500 \frac{\text{dólares}}{\text{m}^2} = 451.659 \text{ dólares}$$

$$\text{Codos grandes: } 837,22\text{m}^2 * 1500 \frac{\text{dólares}}{\text{m}^2} = 1'255.834,80 \text{ dólares}$$

$$\text{Tobera: } 119,9 * 1500 \frac{\text{dólares}}{\text{m}^2} = 179.850,00 \text{ dólares}$$

$$\text{Ductos rectos: } 178,42 * 1500 \frac{\text{dólares}}{\text{m}^2} = 267.630,00 \text{ dólares}$$

Los costos aproximados que se detallaron anteriormente se considera que corresponden al 20% de la construcción general y es de 3'322.175,80 dólares y aproximándole al 100% se asume que la construcción del túnel de viento tendría un costo de 16'610.870,00 dólares.

Cálculo del costo de un túnel con acero

Para determinar la cantidad de material y el costo se calcula el área total de cada ducto y con el espesor de 7,5 mm, considerado por la existencia de planchas de acero disponibles en el mercado nacional y también por el dimensionamiento que presenta cada ducto. Además su precio según (alibaba.com, n.d.) $430 \frac{\text{usd}}{\text{ton}}$ y la densidad es de 7850 kg/m^3 (vaxasoftware.com, n.d.), en la tabla 13 se puede ver, el costo de material por cada ducto.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Tabla 13.

Costos de cada ducto.

Elementos	Área total m ²	Volumen m ³	Cantidad de material Toneladas (ton)	Costos usd
Primer difusor	478,43	3,588225	28,16756625	12112,0535
Segundo Difusor	1555,5	11,66625	91,5800625	39379,4269
Primer codo Pequeño	575,14	4,31355	33,8613675	14560,388
Segundo codo pequeño	575,14	4,31355	33,8613675	14560,388
Primer codo Grande	1716,92	12,8769	101,083665	43465,976
Segundo codo Grande	1716,92	12,8769	101,083665	43465,976
Ducto recto inferior	289,92	2,1744	17,06904	7339,6872
Primer Ducto reparador	104,2	0,7815	6,134775	2637,95325
Segundo ducto separador	104,2	0,7815	6,134775	2637,95325
Cámara de estabilización	50	0,375	2,94375	1265,8125
Cámara del fan	120,8	0,906	7,1121	3058,203
Total	7287,17	54,653775	429,0321338	184483,818

Costo de la malla de la cámara de estabilización

La cámara de estabilización tiene 1053 ductos y cada uno tiene un volumen de material de:

$$\text{volumen de cada ducto: } 1,2 * 0,06 * 0,12 * 6 = 0,00864 \text{ m}^3$$

Con la densidad del acero de 7850 kg/m³(vaxasoftware.com, n.d.) se puede obtener la masa total de la malla de la siguiente forma:

$$0,00864 \text{ m}^3 * 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{1\text{ton}}{1000\text{kg}} * 1053 = 71,42 \text{ ton}$$

El costo de material que se tendría es el siguiente:

$$71,42 \text{ ton} * 430 \frac{\text{usd}}{\text{ton}} = 30.710,6 \text{ usd}$$

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Costo de dispositivos electrónicos

Los dispositivos electrónicos del túnel de viento corresponden a los elementos de medición y son:

Medidores de presión: Dispositivos electrónicos encargados medir las distintas variaciones de presión en los ductos y en la cámara de pruebas su costo es de 100 usd según (articulo.mercadolibre.com, n.d.) ver figura 60 ver especificaciones en el anexo F



Figura 60. Medidor de presión (GmbH, n.d.)

Medidores de velocidad: Este dispositivo se denomina anemómetro y facilita medir la velocidad del aire en el interior de los ductos su costo es de 69 usd (spanish.alibaba.com, n.d.-b). ver figura 61



Figura 61. Medidor de velocidad (spanish.alibaba.com, n.d.-b)

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Medidores de flujo másico: Según (spanish.alibaba.com, n.d.-a) tiene un costo de 300 usd y son dispositivos que facilitan la medición de la cantidad de masa de aire que fluye por cada ducto. Ver figura 62 en el anexo G se puede ver sus especificaciones.



Figura 62. Medidor de velocidad (Products, n.d.)

Medidores de temperatura: Dispositivos que transforman la variación de temperatura en impulsos eléctricos que luego pueden ser procesados por un ordenador, su costo varía de los 10 a los 392,57 usd (articulo.mercadolibre.com.ec, n.d.) según su tipo en el anexo H se tiene las especificaciones. Ver figura 63



Figura 63. Medidor de velocidad (Products, n.d.)

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Simulación

Primera simulación. Túnel de viento vacío y sin malla de estabilización.

Velocidad de entrada 155 Km/h

En la figura 64 se tienen los resultados obtenidos de la simulación donde se puede observar el comportamiento del flujo en cada uno de los ductos, por medio de un historial de colores, las unidades están en Km/h. Haciendo una aproximación en la cámara de pruebas se tiene que la máxima velocidad se alcanza a la entrada, mientras que en el centro se tiene un rango de 433-480 Km/h.

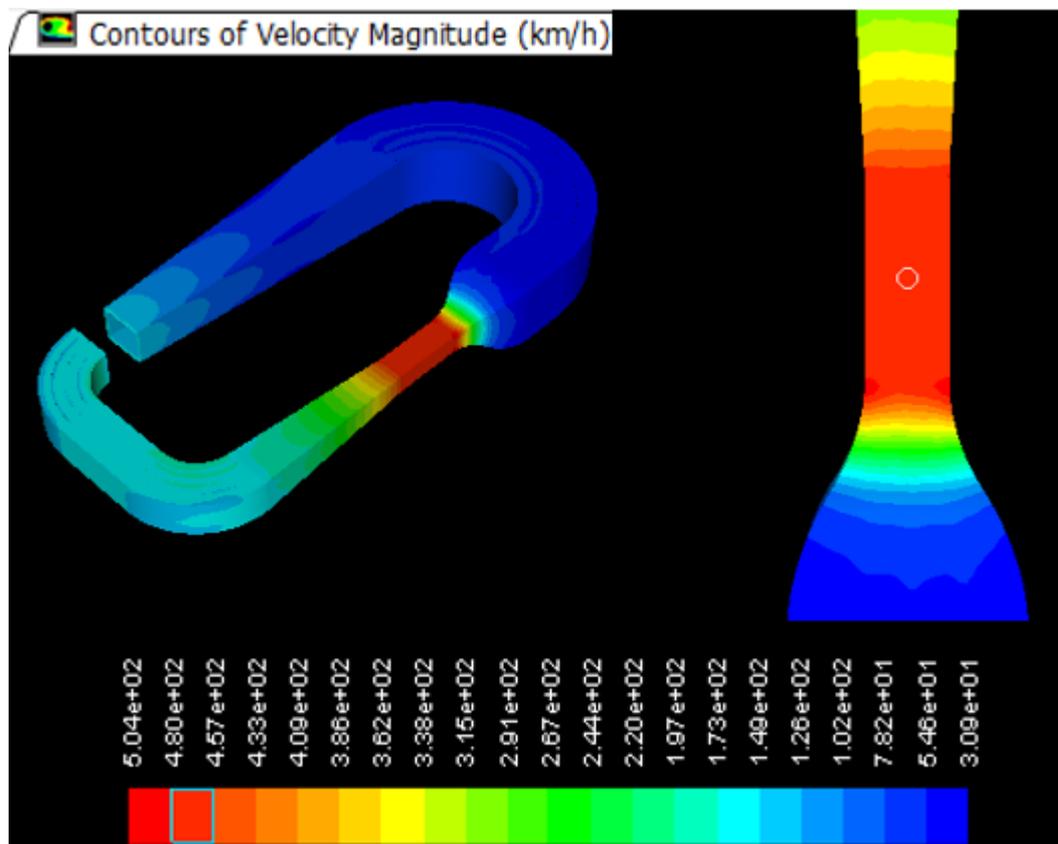


Figura 64. Velocidad en el túnel y la cámara de pruebas. (entrada 155 Km/h)

Con una velocidad de entrada 155 Km/h se obtiene una velocidad del flujo en la cámara de prueba de aproximadamente 456 Km/h, hay un comportamiento homogéneo en toda el área. Con lo cual se corrobora que, desde el punto de vista de configuración

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

geométrica del túnel, el mismo podría trabajar en este rango de velocidades pudiendo realizar pruebas con un flujo homogéneo en la cámara de pruebas.

Con respecto a las presiones se puede observar que existe mayor presión en los codos superiores del túnel e inferiores. Ver figura 65

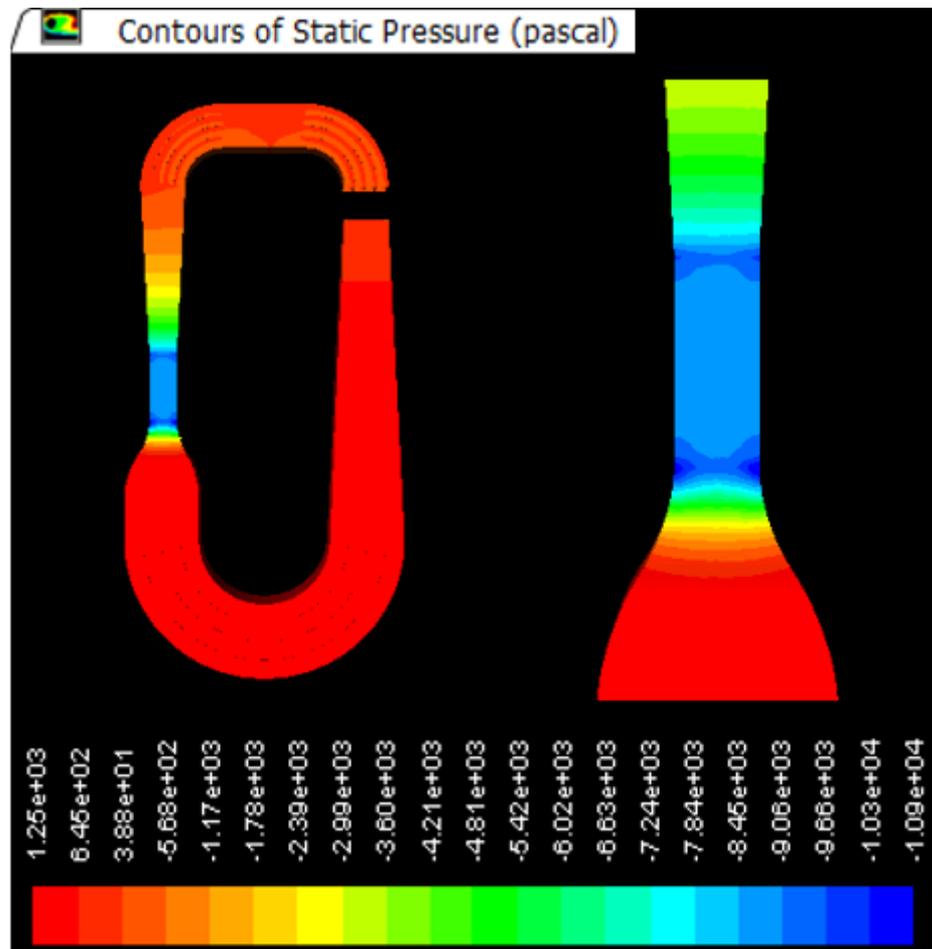


Figura 65. Presión el túnel y la cámara. (velocidad de entrada 155 K m/h)

Observando detenidamente los datos de presión se puede ver que en la cámara de ensayos si hay presiones estáticas negativas especialmente en la entrada y en la salida de la misma.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Velocidad de entrada de 103 Km/h

En la figura 66 se tiene los resultados de la simulación, cuando se hace ingresar 103 Km/h.

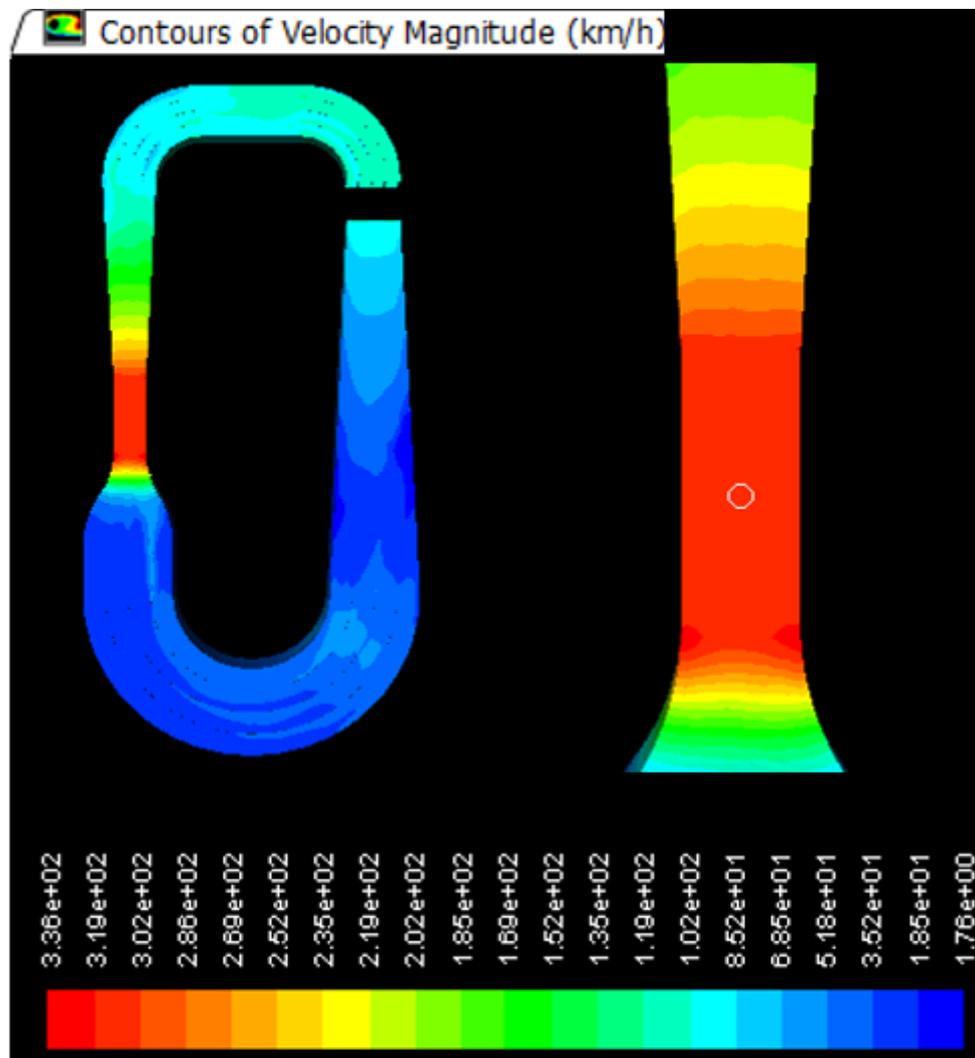


Figura 66. Velocidad en el túnel y cámara, velocidad de entrada 103 Km/h.

Con una velocidad de entrada 103 Km/h se obtiene una velocidad del flujo en la cámara de pruebas de aproximadamente 302,26 Km/h, hay un comportamiento homogéneo en toda el área. Este es el rango máximo de trabajo para el cual está diseñado el túnel de viento.

Del mismo modo que los resultados obtenidos en la figura 61, la presión estática que se tiene en la cámara de pruebas en la figura 67 es negativa.

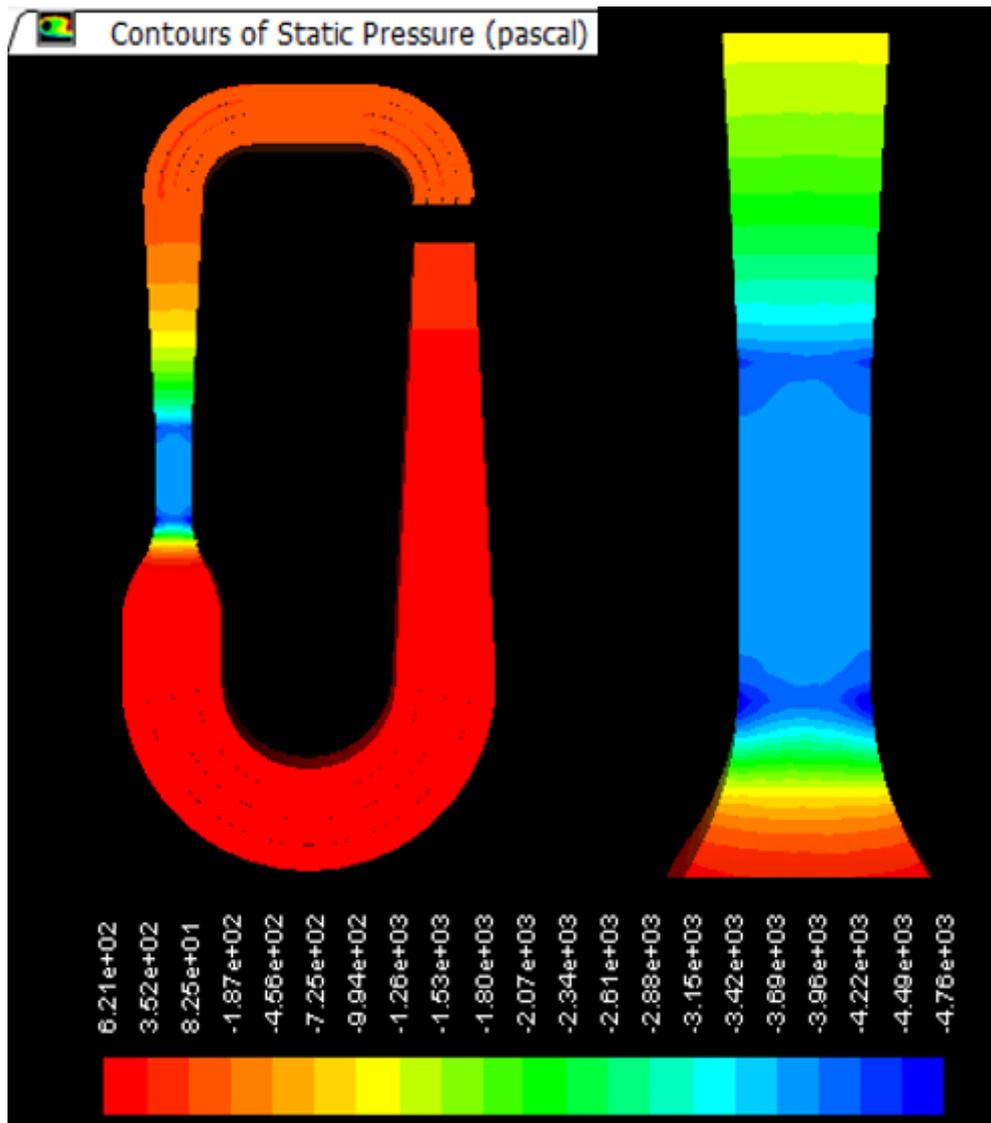


Figura 67. Presión en el túnel y cámara, velocidad de entrada 103 Km/h.

Velocidad de Entrada 86 Km/h

Los resultados que se muestran en la figura 68 corresponden a la velocidad presente en todos los ductos del túnel cuando se hace ingresar un flujo de 86 km/h.

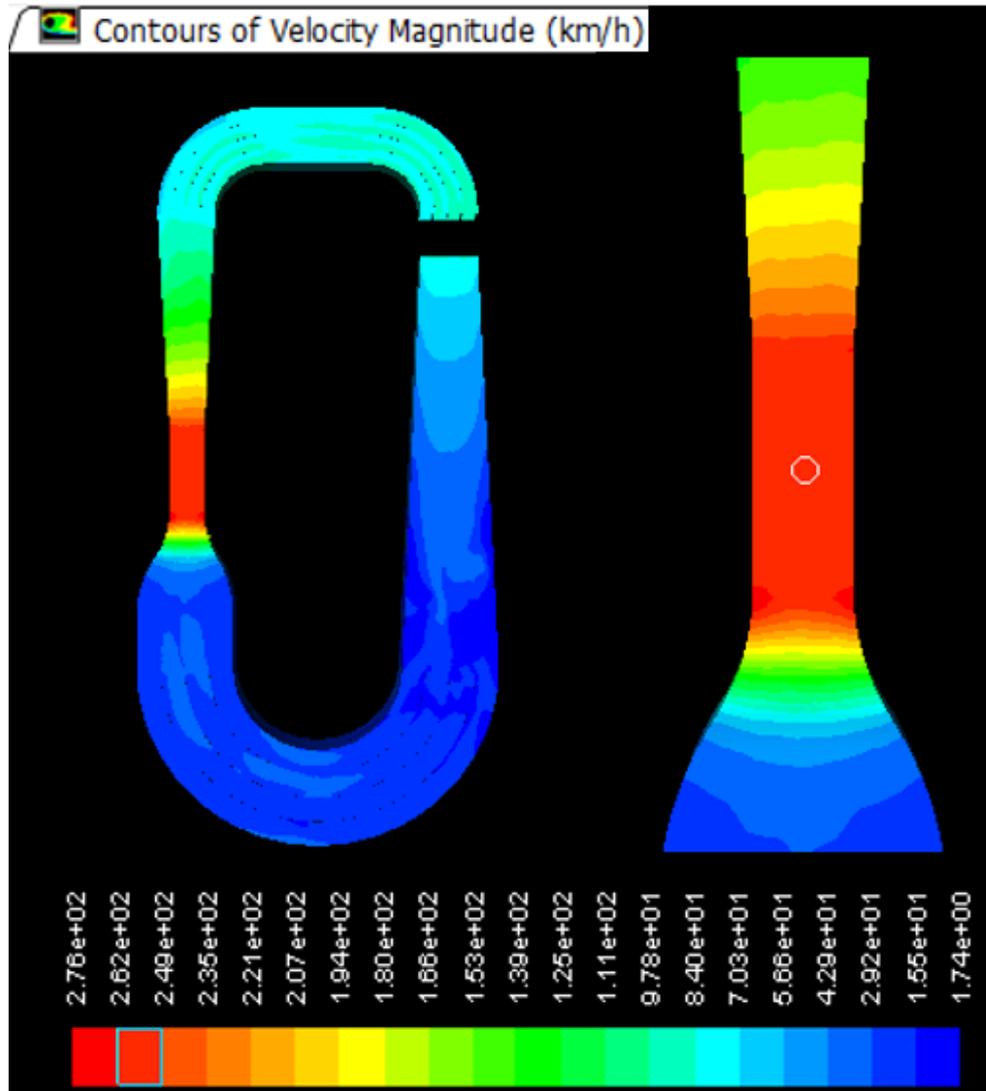


Figura 68. Velocidad en el túnel y cámara, velocidad de entrada 86 Km/h.

Con una velocidad de entrada 86 Km/h se obtiene una velocidad del flujo en la cámara de pruebas de aproximadamente 248,06 Km/h, hay un comportamiento homogéneo en toda el área. Este es el rango mínimo de trabajo para el cual está diseñado el túnel de viento.

En la figura 69 se puede ver que la presión estática tiene el mismo comportamiento anterior con la diferencia en los rangos.

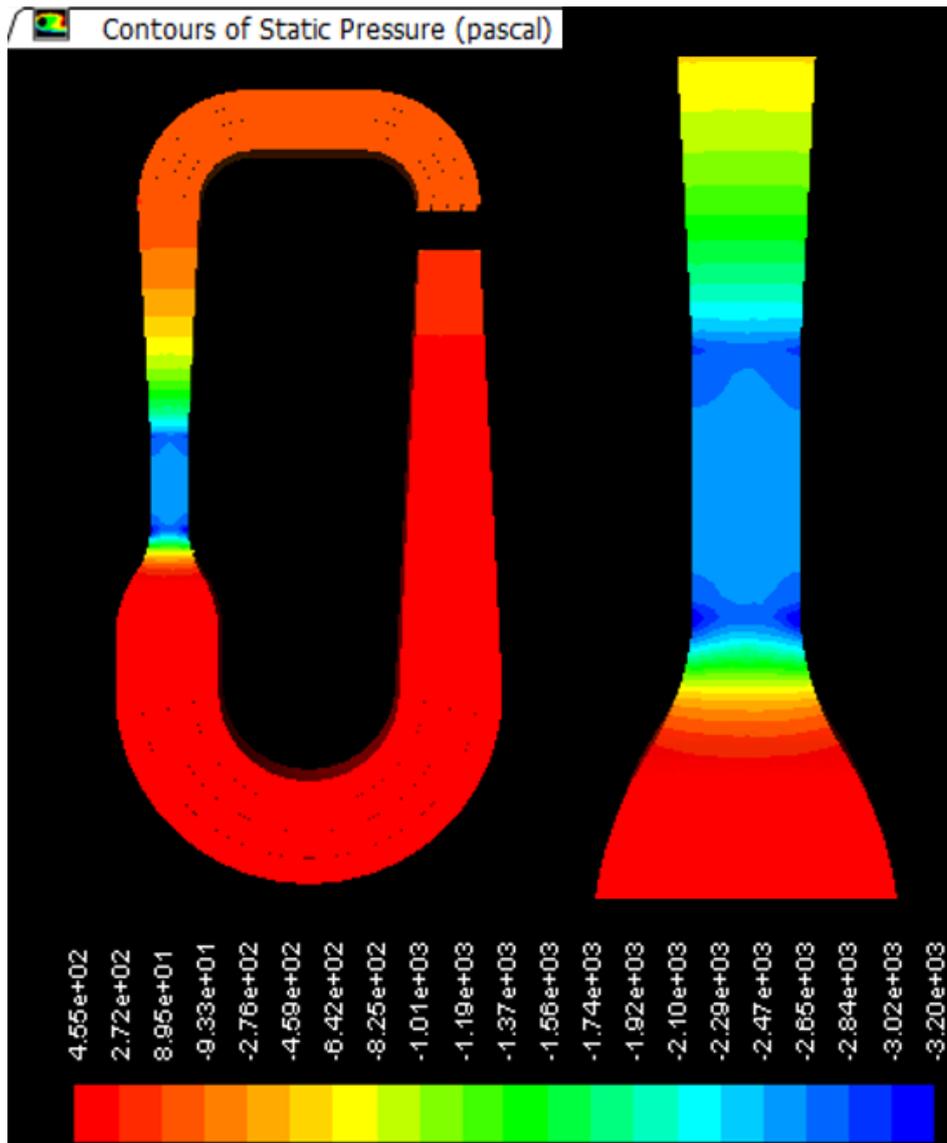


Figura 69. Presión en el túnel y cámara, velocidad de entrada 86 Km/h.

Resultados CASO 1 material de paredes Concreto

Los resultados obtenidos de la simulación con el coeficiente absoluto de rugosidad $k = 1,2 \text{ e-}4 \text{ m}$ obtenido de (Mott & Brito, 2006) para ductos de concreto bien fabricado, se muestran en la figura 70.

Donde se puede ver que la velocidad máxima que se tiene en la cámara de ensayos es de 770 km/h, además en el difusor pequeño se tiene que la velocidad disminuye a 385 km/h en la salida del difusor. Además, se tiene que la velocidad más

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

baja del túnel se encuentra ubicada en la zona de los codos superiores. Con respecto a la presión se puede observar que en la zona de pruebas se tiene una presión absoluta de 77400 Pascales.

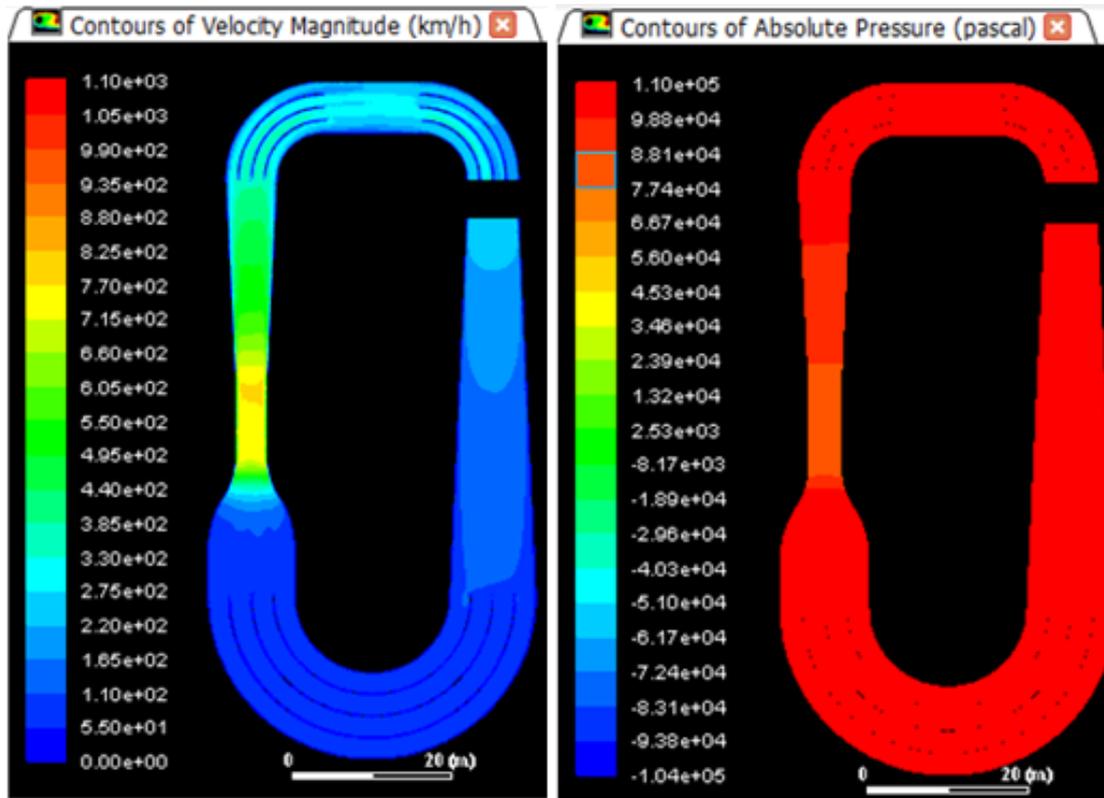


Figura 70. Comportamiento del fluido con concreto.

Resultados CASO 2 material de paredes Acero al carbono

Los resultados que se tiene de la simulación con el coeficiente absoluto de rugosidad $k = 1,5e-6$ m valor establecido según (Mott & Brito, 2006) para ductos de acero comercial al carbono se presentan en la figura 71.

Los valores de la velocidad máxima que se muestran es de 734 Km/h y están en la zona de pruebas y después de esta etapa en el difusor pequeño se tiene que la velocidad disminuye de forma drástica a 330 Km/h en la salida. También, se puede observar la velocidad inferior está en los codos superiores. Analizando los valores de la presión se puede

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

ver que en la cámara de pruebas hay una presión absoluta de 71000 Pascales, que es un poco inferior a la presión atmosférica de Quito.

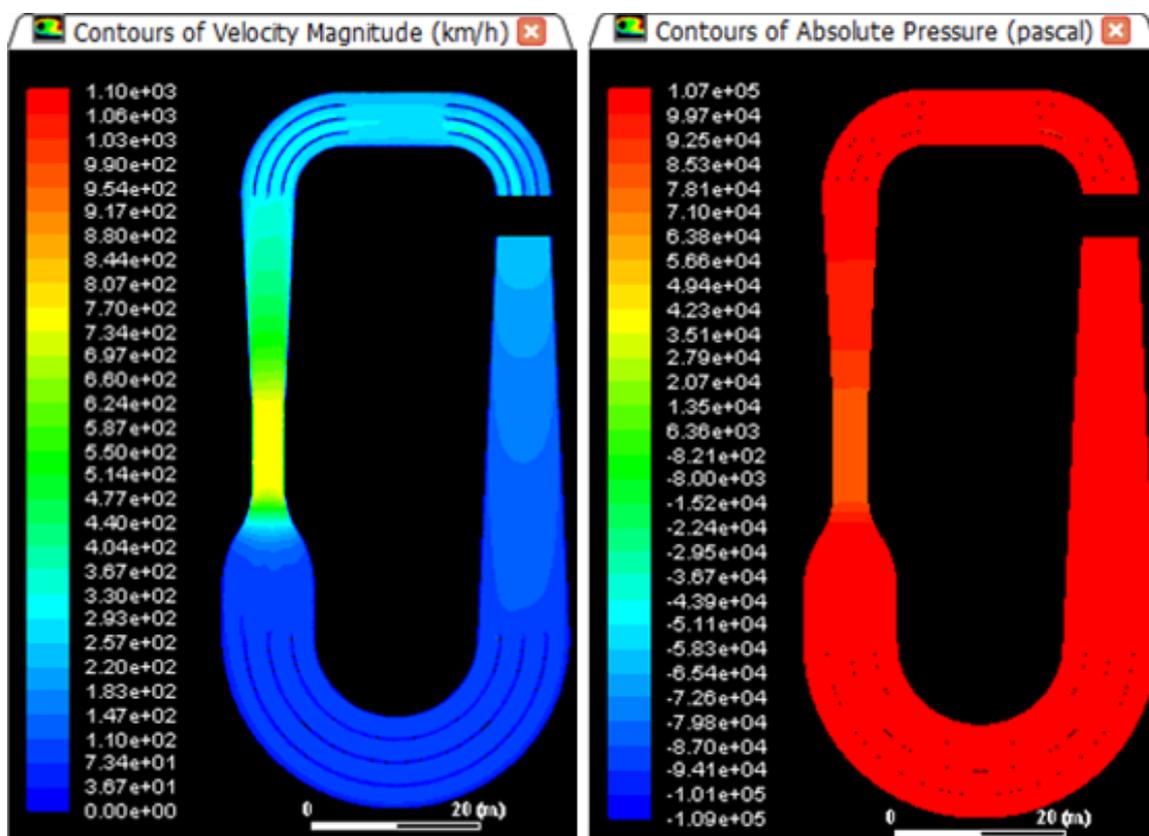


Figura 71. Comportamiento del fluido con acero.

Segunda simulación (Túnel de viento vacío y con malla de estabilización).

La simulación para el túnel de viento con la malla se lo realiza en las condiciones más críticas de funcionamiento y la velocidad de entrada está en un rango de 250 Km/h y 300 Km/h, velocidades máximas generadas por el ventilador, los parámetros que se analizan son:

Temperatura

Velocidad

Presión

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

En la figura 72 se puede observar que la temperatura tiene un comportamiento homogéneo en todo el túnel y que corresponde a los 22 °C.

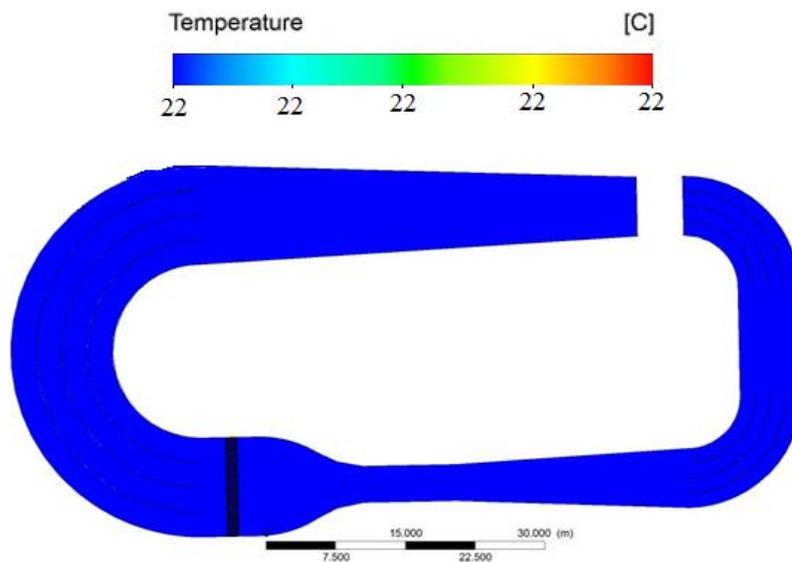


Figura 72. Temperatura en túnel de viento.

A continuación, se muestra el comportamiento de las líneas de flujo del viento en el interior y se puede ver que con presencia de la malla de estabilización no existe turbulencia alguna. Ver figura 73.

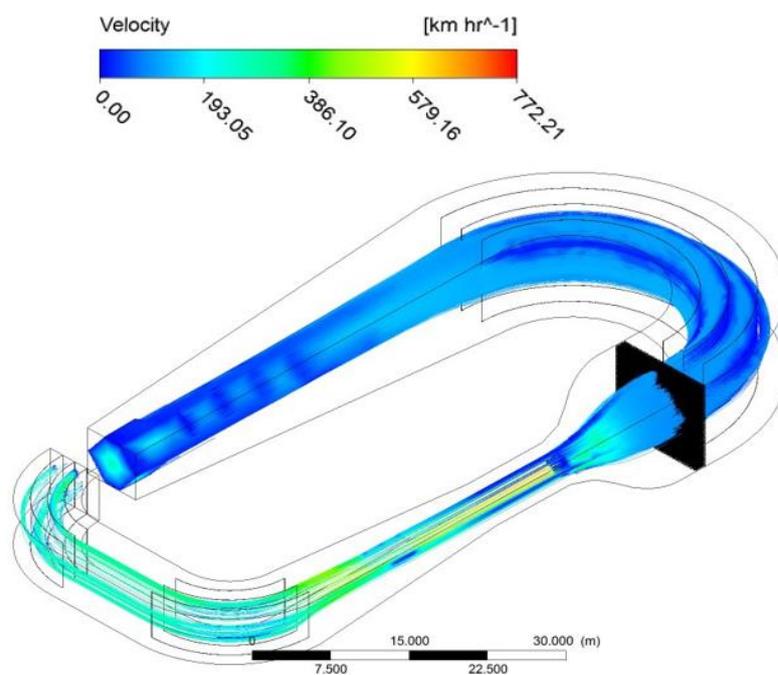


Figura 73. Líneas de flujo del túnel de viento.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Los resultados obtenidos de la simulación con la malla de estabilización con respecto a la velocidad son: Altas velocidades en la cámara de pruebas donde se llega a tener hasta 772 Km/h, existen zonas especialmente cerca de los bordes del túnel y en los álabes de los codos donde la velocidad de viento es baja. Ver figura 74.

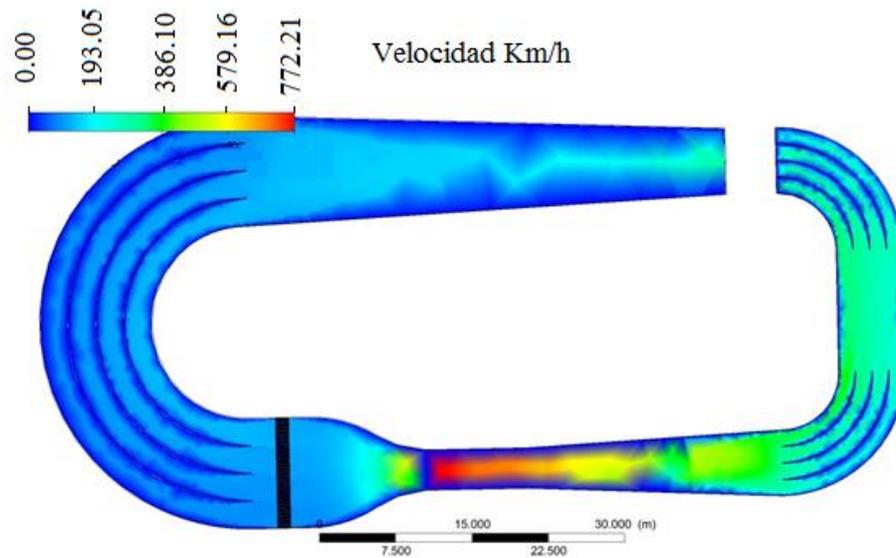


Figura 74. Velocidad del túnel de viento con malla - velocidad de entrada 250 Km/h.

En la figura 75 se puede observar que se tiene mayor intensidad de la presión en los codos superiores del túnel de viento, mientras que, por efecto de la cámara de estabilización en la zona de pruebas se tiene una presión absoluta positiva.

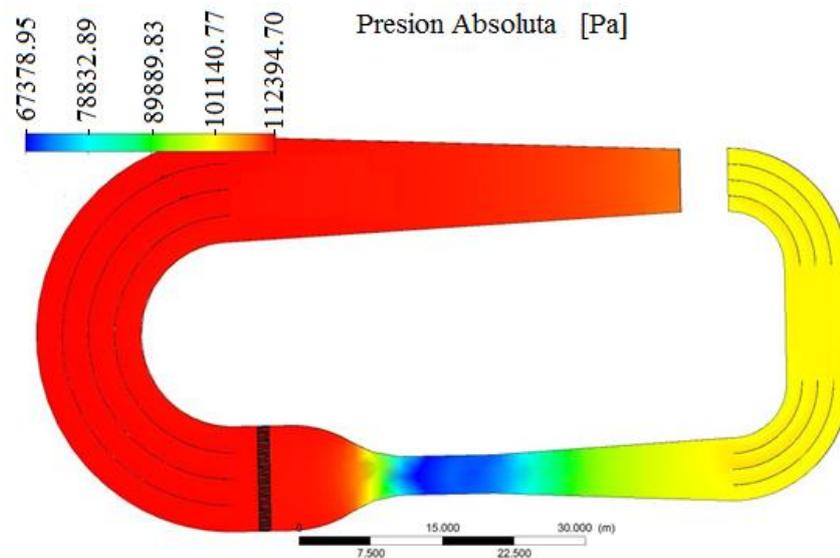


Figura 75. Resultados de la presión del viento con malla, velocidad de 250 km/h.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Aumentando la velocidad de ingreso a 300 km/h se tiene los resultados que se muestran en la figura 76, donde se puede ver que la velocidad en la cámara de pruebas llega a los 838 km/h y que en las superficies del túnel se tiene velocidades cercanas a cero.

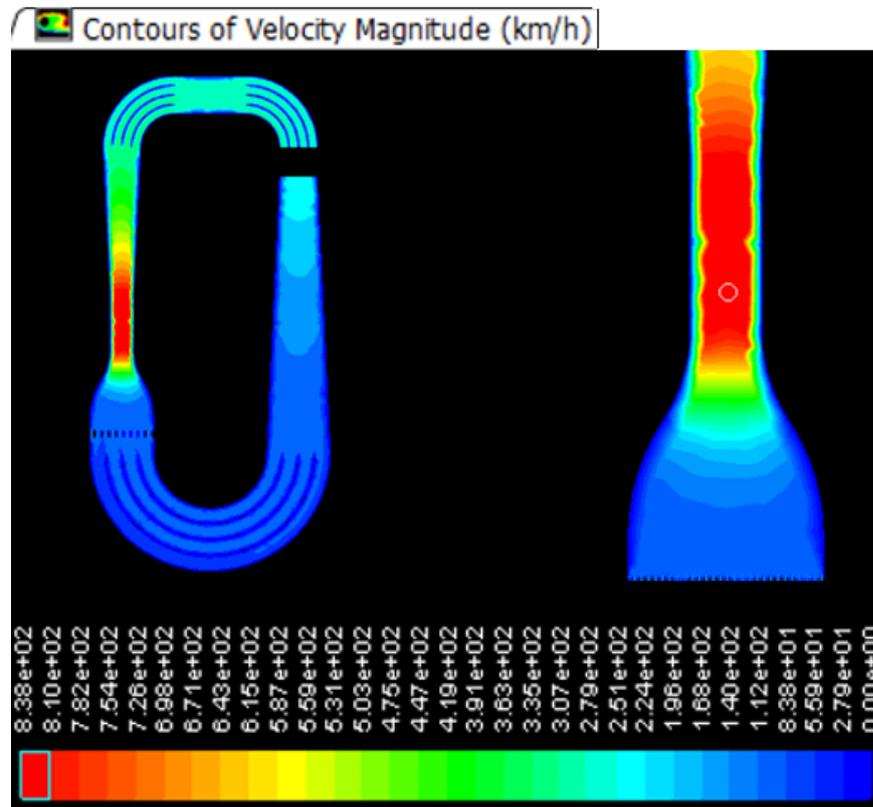


Figura 76. Resultados de la presión del viento con malla, velocidad de 250 km/h.

Tercera simulación (Túnel de viento con vehículo y con malla de estabilización).

El propósito de esta simulación es ver el comportamiento del fluido en los ductos que están después de la cámara de ensayos para lo cual se utiliza las gráficas de la simulación en distintas vistas y los resultados obtenidos son:

En la figura 77 se puede ver la animación de las líneas de flujo donde se observa el comportamiento del fluido cuando encuentra un obstáculo en la cámara de pruebas, cambiando de vista en la figura 78 se ve el efecto ondulado en el ducto recto inferior y el espacio entre formado por el tercer álabe y el segundo codo inferior, no tiene fluido alguno.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

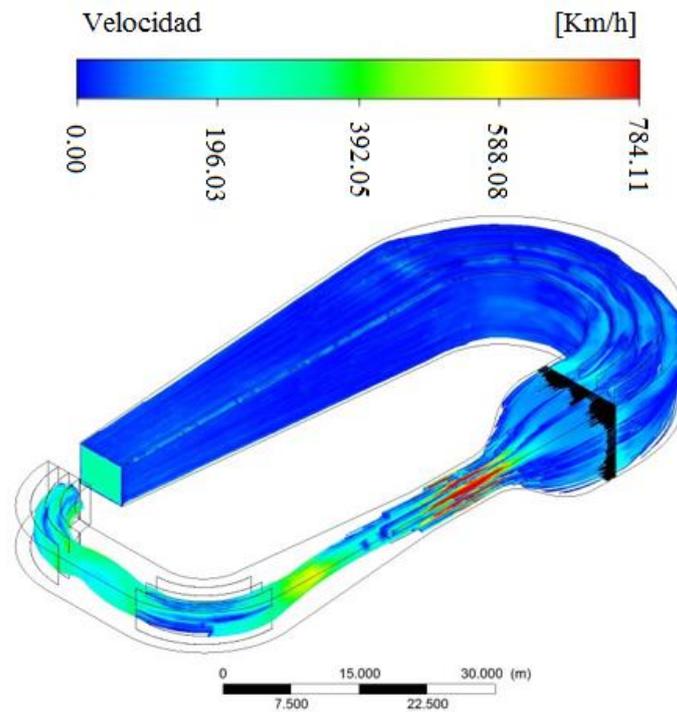


Figura 77. Túnel de viento con vehículo vista isométrica.

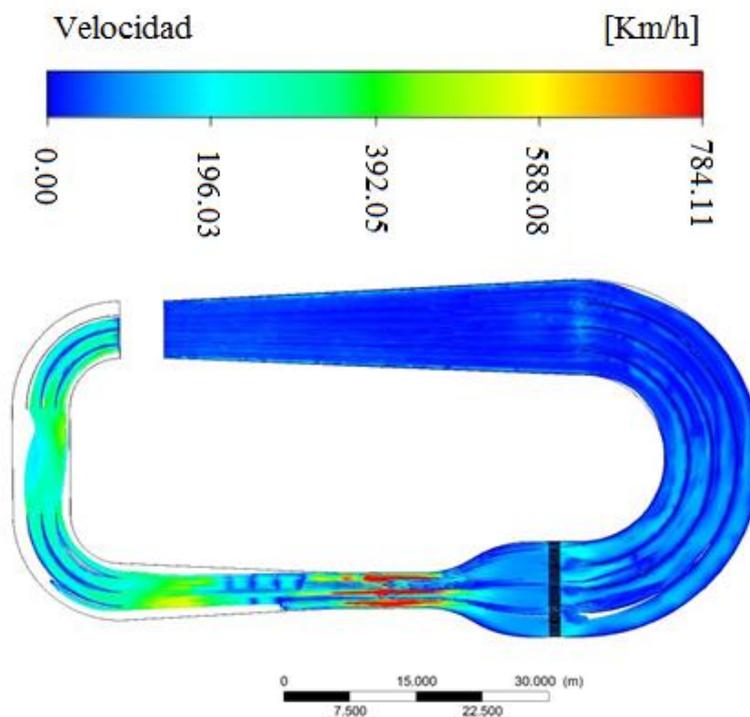


Figura 78. Túnel de viento con vehículo, vista superior.

En la figura 79 se puede apreciar el túnel desde la parte inferior del vehículo y se observa que el fluido después de entrar en contacto con el auto se generan turbulencias que direccionan el fluido de forma indistinta.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

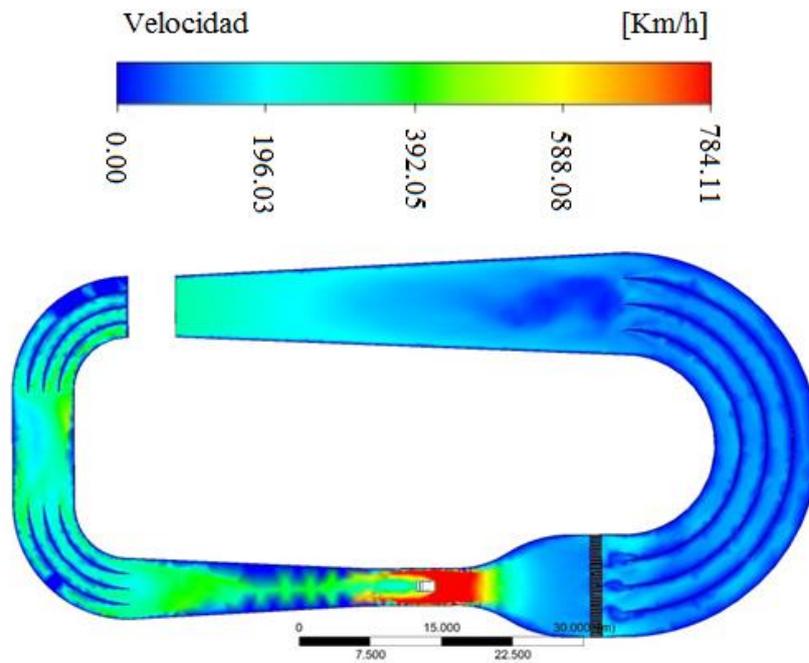


Figura 79. Túnel de viento con el vehículo vista inferior.

La presión que se tiene desde el primer difusor hasta la malla de estabilización se mantiene homogénea y superior a la atmosférica. Ver figura 80

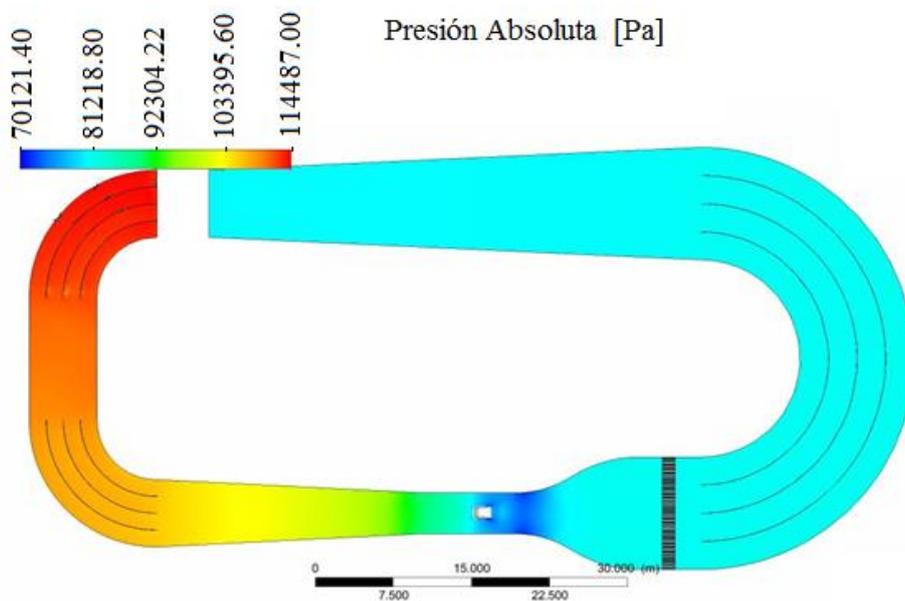


Figura 80. Presión del túnel de viento con el vehículo.

También se distingue que en la salida de la tobera la presión absoluta llega a ser inferior a la presión atmosférica 70121 Pa y cuando el fluido entra en contacto con el vehículo su presión aumenta drásticamente a 81212,80 Pa superando la atmosférica este

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

efecto ocasiona que la presión siga aumentada hasta tener la mayor magnitud a la salida del túnel con un valor de 114487 Pa.

Prototipo

Gráficas obtenidas del túnel de viento a través del programa Arduino.

Gráfico de la presión

En la figura 81 se puede ver la gráfica de la presión que se da en el prototipo del túnel de viento, en donde se puede relacionar dos gráficas que muestran el comportamiento de la presión a la salida del ventilador y a la entrada de la cámara de pruebas.

La presión a la salida del ventilador aumenta de 1033.25 mba hasta 1033.35 mba mostrando un ligero incremento de la presión, a la entrada de la cámara de pruebas se ve una disminución de la presión de 1033.05mba hasta 1033mba por el aumento de la velocidad en esta parte del túnel de viento.

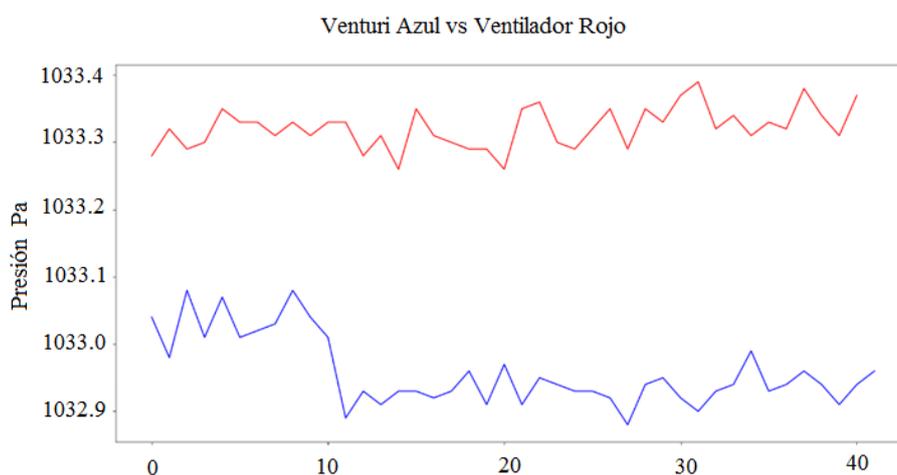


Figura 81. Gráfico de presión del prototipo.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Gráfico de la temperatura

En la figura 82 se puede ver la gráfica de la temperatura la cual se comporta de la misma forma tanto a la salida del ventilador como a la entrada de la cámara de pruebas con un pequeño incremento que va desde 22.50 °C hasta 22.60 °C

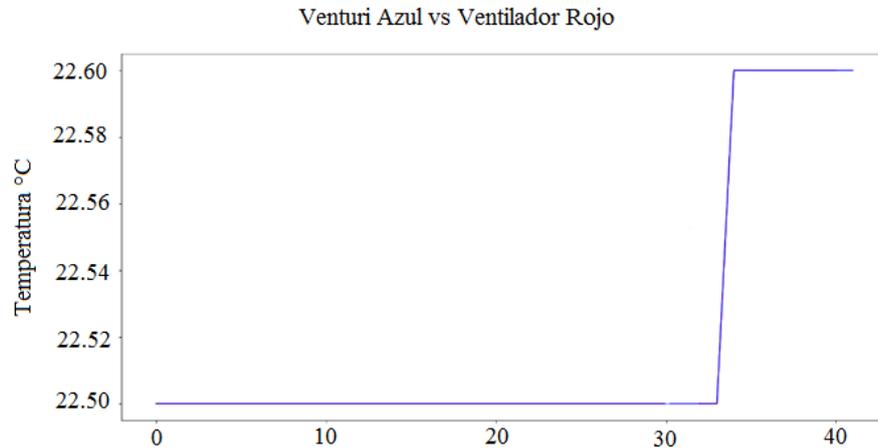


Figura 82. Gráfico de temperaturas del prototipo.

Gráfica de la velocidad

En la figura 83 se puede observar las gráficas de las velocidades, la velocidad a la salida del ventilador se encuentra constante a 5 m/s, mientras que a la entrada de la cámara de pruebas la velocidad se incrementa de 5.04 m/s hasta 5.06, este incremento se debe al diseño de la tobera tipo Venturi para incrementar la velocidad del aire en el interior del túnel.

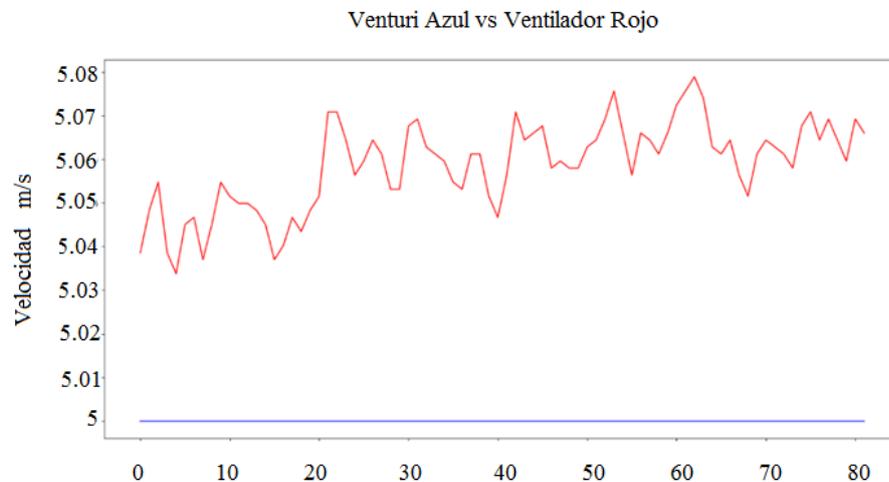


Figura 83. Gráfico de temperaturas.

Discusión de resultados

El diseño del túnel de viento realizado en este proyecto concuerda en forma geométrica con modelos a escala donde se realizan análisis subsónicos como el estudio de optimización realizado por Fouatih, Medale y Imine (2016) donde el túnel que se realiza el estudio, presenta características como la cámara de pruebas rectangular, del mismo modo los codos y el número de álabes directores utilizados en este trabajo se presenta un túnel en donde se analizan los indicadores de calidad para el fluido en la sección de pruebas (Moonen, Blocken, & Carmeliet, 2007).

Los valores obtenidos en las tablas 9 y 10 con respecto a las pérdidas presentan mayor porcentaje en la cámara de estabilización que superan el 50%, seguidas de esta se tiene las pérdidas ocasionadas en los codos que superan el 9% y en las toberas que tiene valores que bordean el 4 y 5 %. Los ductos que generan mayor cantidad de pérdidas concuerdan con los diseños realizados por (Benalcázar Venegas, 2015) y (Martínez Coza, 2016) con la diferencia en el porcentaje ya que en la cámara de estabilización los diseños realizados tienen valores de un 30% o menos y se debe a que en esa zona se cuenta con otros tipos de mallas que tiene la misma finalidad que es refinar el flujo de aire.

En la simulación del túnel de viento sin la malla de estabilización se realizó tres tipos de simulaciones con distintos parámetros de entrada de aire, que van desde los 85 Km/h (23,6 m/s) hasta los 250 Km/h (69,44 m/s), donde se tiene valores de velocidades en la cámara de pruebas de 248 Km/h (68,88m/s) y 772 Km/h (214.24 m/s) Km/h respectivamente si se analiza detenidamente la velocidad de ingreso se triplica en la cámara de pruebas, sin embargo por la presencia del difusor que se encuentra después del ventilador la velocidad baja y se mantiene homogénea hasta antes de llegar a la zona de la tobera donde por causa de la contracción el fluido se

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

acelera extremadamente casi llegando a ser 5 veces superior a la velocidad que sale de la cámara de estabilización, este fenómeno se puede corroborar en el rediseño de la boquilla realizado por (Leifsson & Koziel, 2015) donde la velocidad del fluido antes de llegar al inyector es de 5 m/s, y al llegar a la cámara de pruebas supera los 25 m/s.

Análisis de resultados

Dimensionamiento

Las dimensiones que tienen los distintos elementos que conforman el túnel, están dentro del rango sugerido por la mayoría de libros y documentos científicos, donde se mencionan que la cámara de ensayos conforma la zona principal del túnel de viento, por lo tanto, debe ser de gran longitud, de tal forma que esté lo más alejado de la cámara de estabilización ya que el flujo debe tener un elevado nivel de homogeneidad en este proyecto la cámara tiene 10 metros de longitud y su construcción y dimensionamiento fue basado en las dimensiones del modelo Chevrolet cruze. Los difusores tienen los ángulos que están dentro de lo sugerido que es de $\leq 3^\circ$ para el primer difusor se tiene $2,87^\circ$ y para el segundo es de $2,65^\circ$ por último los codos tienen un ángulo de deflexión de 90° y tres álabes directores con el fin de minimizar las pérdidas que se producen por la deflexión del flujo y el cambio brusco de dirección que se da en los codos, pero aumentan las pérdidas por fricción.

Análisis de pérdidas

Las pérdidas generadas por la utilización de concreto en la construcción de los ductos son ligeramente superiores, con respecto al tener una construcción con otro material como el acero, es así que el valor total de pérdidas es 1,918 y 1,940 para el concreto y acero respectivamente. Esta pequeña diferencia puede ser como un punto importante a hora de tomar una decisión para la selección del tipo de material, ya que las construcciones de concreto son más costosas con respecto al acero y al tener un rango de pérdidas superior

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

obliga a que la potencia del ventilador sea más elevada. La principal ventaja que tiene este material con respecto al acero es que minimiza el nivel de ruido.

Dentro del túnel el elemento que produce mayor cantidad de pérdidas es la cámara de estabilización en este proyecto genera un porcentaje que supera el 50% más las que se tiene en los codos llegan incluso a existir más del 70 %, es así que en la construcción de estas edificaciones se pone gran énfasis en el diseño de ductos y álabes directores que conforman la cámara de estabilización y los codos de túnel.

Costos de fabricación

El costo de fabricación de un túnel de viento a escala real que se obtuvo llegó a los 16 millones de dólares, valor que a pesar de que se consideró los precios más elevados existentes en el país, es muy bajo; ya que dentro de esta aproximación no se menciona los gastos que se generan en una construcción como: Estudios topográficos, mano de obra, estudios geológicos, impacto ambiental, diseño arquitectónico, diseño estructural, diseño de interiores, copias planas, ambientaciones, presentaciones, diseño aislamiento acústico, diseño eléctrico, equipos electrónicos y de iluminación, diseño aislamiento y acondicionamiento climático, diseño saneamiento de aguas, etc.(Razura Beltrán, 2012).

Simulación.

Primera simulación. Túnel vacío sin malla de estabilización

De los resultados obtenidos por medio de la simulación del túnel de viento sin la cámara de estabilización se realiza una comparación con las velocidades alcanzadas en la zona de pruebas ver figura 84.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

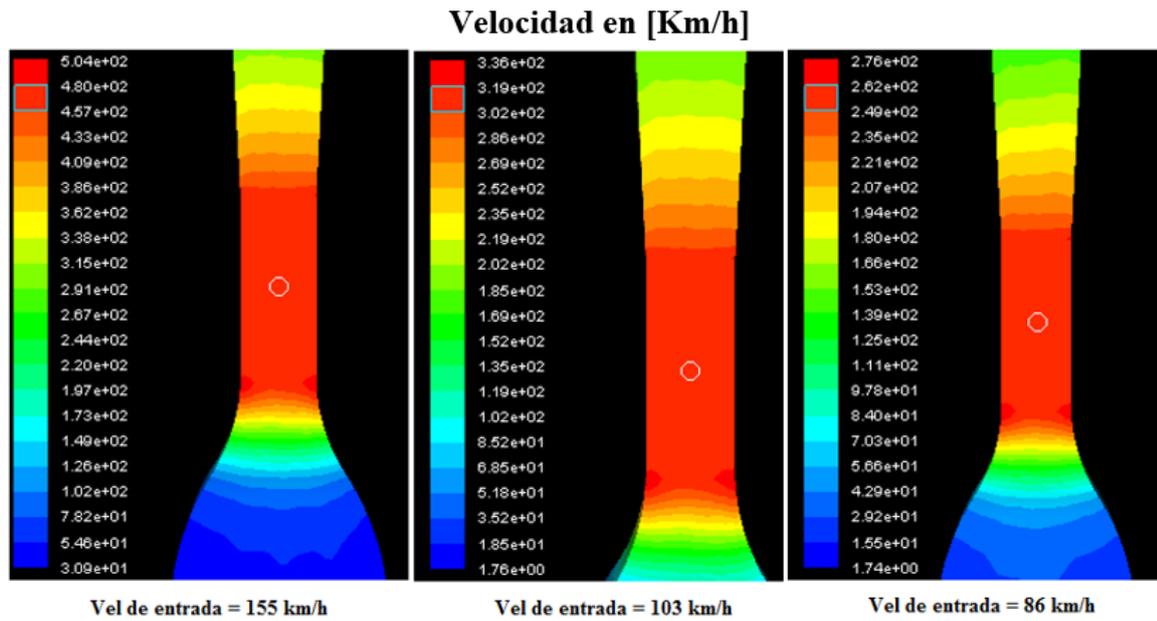


Figura 84. Comparación de velocidades en la cámara de ensayos.

Mediante esta comparación se puede comprobar que la velocidad en la cámara de ensayos, se tiene una velocidad que es casi tres veces superior la magnitud a la generada por el ventilador.

Mientras que el comportamiento de la velocidad en los ductos se analiza por medio de la siguiente comparación. Ver figura 85.

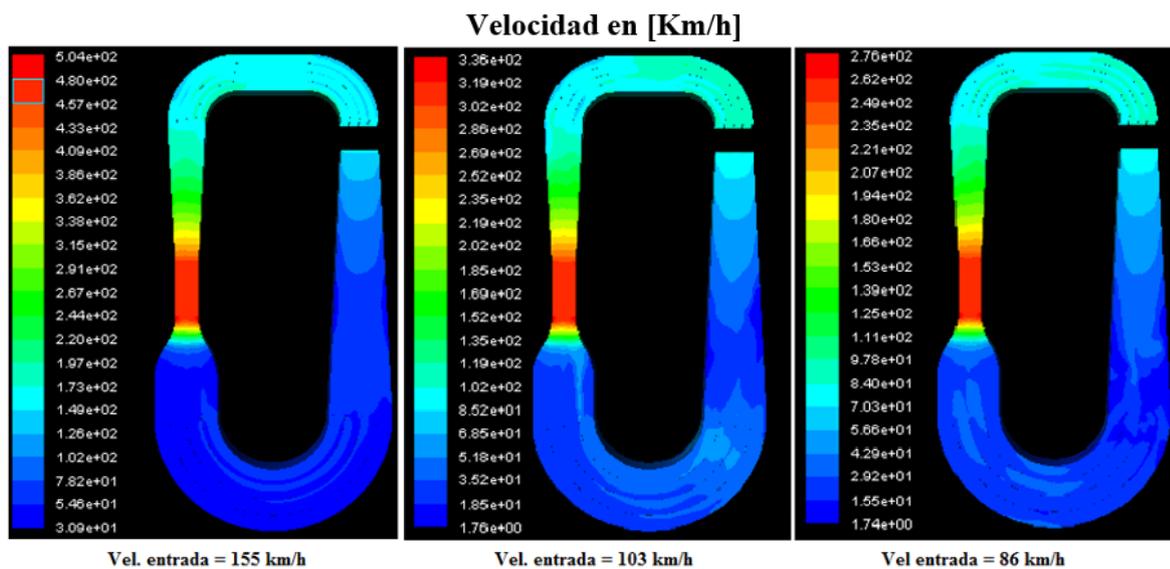


Figura 85. Comparación de velocidades en los ductos.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

La apreciación que se tiene del comportamiento del fluido en el difusor grande es que, si la velocidad es alta, esta se homogeniza antes de llegar a la tobera caso contrario ocurre si la velocidad es baja, porque según la simulación aumentan las pérdidas en los codos la velocidad no tiene un comportamiento homogéneo. Al ingresar al inyector este se encarga de suministrarle energía al fluido de tal forma que compensando en gran parte las pérdidas producidas en los codos, el mismo proceso ocurre en los codos donde la magnitud de la velocidad disminuye de tal forma que en la salida se tiene casi la misma magnitud para los tres casos.

Para visualizar el comportamiento de las presiones en las distintas zonas del túnel de viento se utiliza la figura 86.

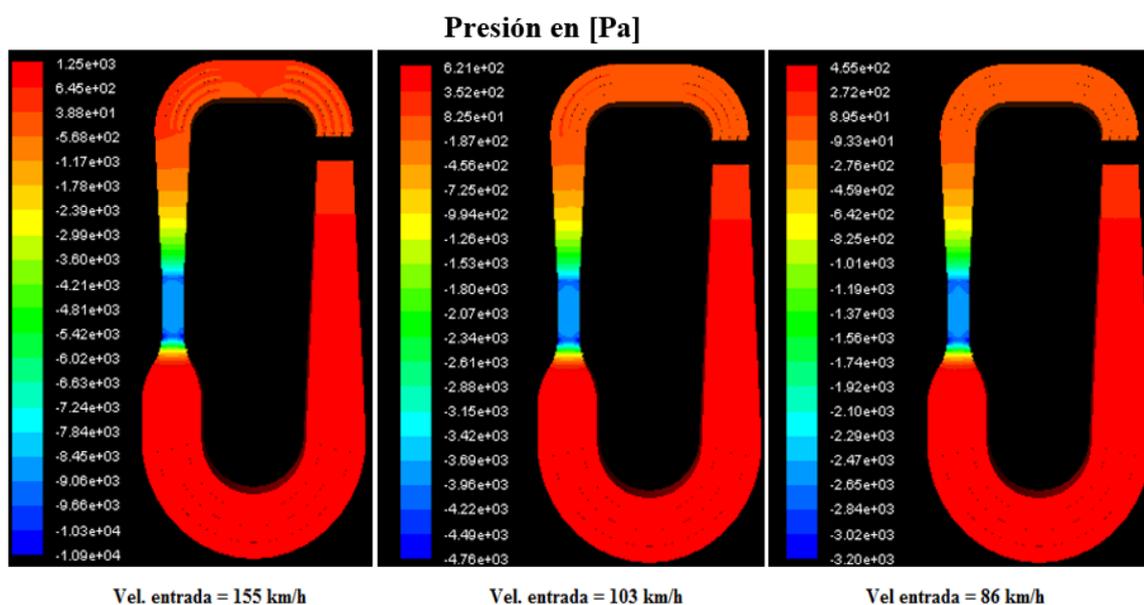


Figura 86. Comparación de las presiones estáticas.

De la figura anterior se puede observar que la presión en los ductos aumenta si la velocidad que ingresa es alta, especialmente en la zona de los codos grandes donde se tiene la presión más elevada de todo el sistema, al pasar la tobera ocurre lo contrario la velocidad aumenta y la presión absoluta del túnel disminuye a niveles que son inferiores a la atmosférica, este fenómeno ocurre por la reducción de áreas y el

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

efecto Venturi que se produce en la zona de pruebas por efectos del difusor y la tobera.

Otro análisis que se desarrolló es la comparación de velocidades y presiones cuando se utiliza distintos materiales para la construcción de los ductos de túnel y a una velocidad de entrada de 250 Km/h. tal como se puede ver en las figuras 87 y 88.

Comparación de velocidades con los materiales de acero y concreto

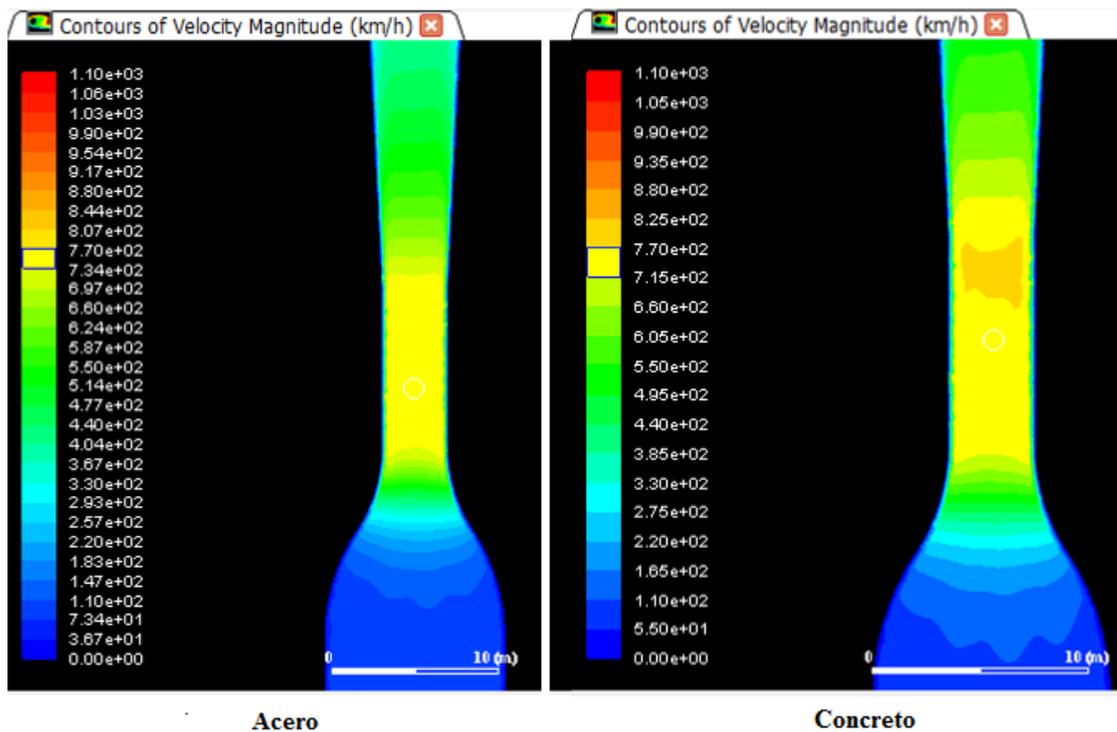


Figura 87. Comportamiento de la velocidad con distintos materiales.

De las figuras anteriores se tiene que la velocidad en la cámara de pruebas en el caso con paredes de acero es 715 Km/h lo cual es mayor que con paredes de concreto que es de 733 Km/h. la diferencia es mínima y eso comprueba la baja diferencia de pérdida que se tiene en las tablas 9 y 10.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

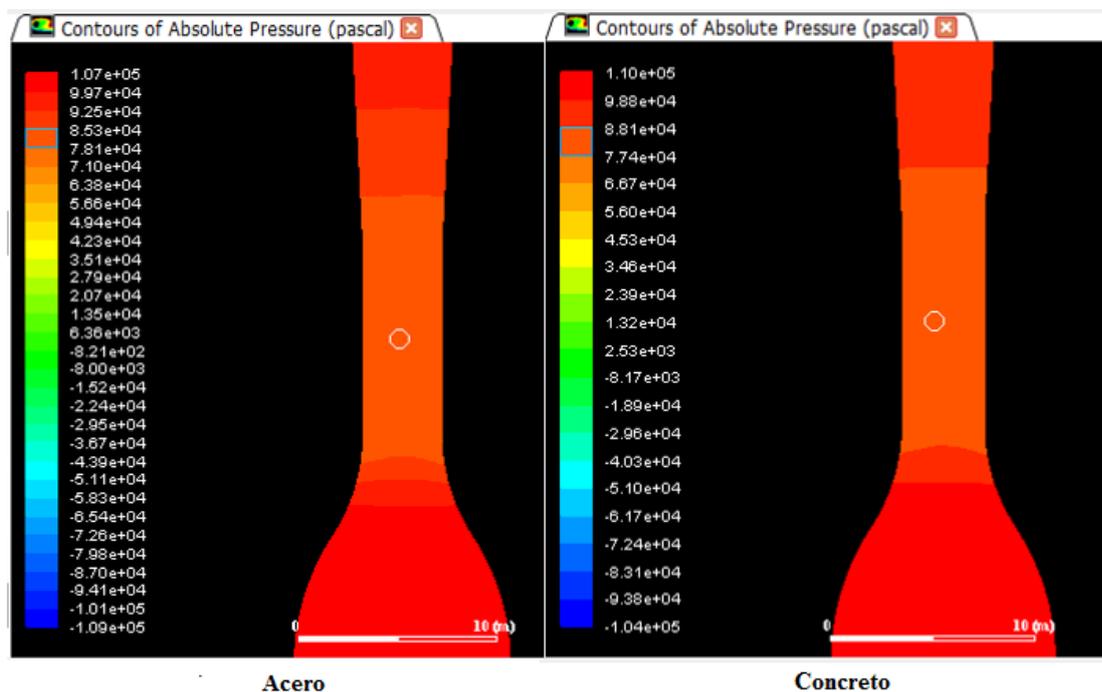
Comparación de presiones con los materiales de acero y concreto

Figura 88. Comportamiento de la presión con distintos materiales.

La presión absoluta en la cámara de pruebas con material de concreto es 77439 Pa y en el caso de acero al carbono la presión es 78143 Pa. Lo cual indica que la rugosidad superior del concreto y que genera una mayor pérdida de presiones en el recorrido del fluido.

La presión estática en la salida del circuito del túnel es -2482 Pa utilizando el concreto y para el acero al carbono es -1645 Pa., lo cual confirma el comportamiento de mayor cantidad de pérdidas en el caso de paredes de concreto, debido a la mayor rugosidad de la superficie.

Segunda simulación. Túnel con malla estabilizadora.

Los resultados que se tiene con respecto a la velocidad y presión presentan el mismo comportamiento en los ductos que se encuentra antes de la malla de

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

estabilización, donde se tiene un incremento de la velocidad y la presión. Es así que en esta parte se pone énfasis en el comportamiento que ocurre en la cámara de estabilización donde se analiza el fluido por la presencia de la malla tal como se muestra en la figura 89.

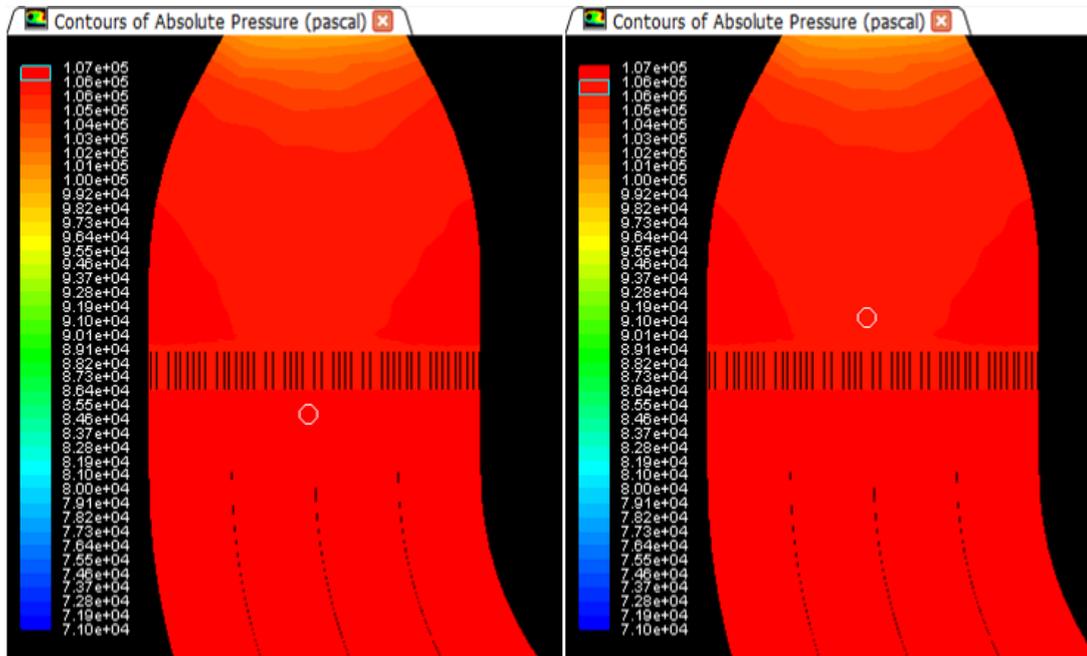


Figura 89. Comportamiento del fluido con acero.

En la figura anterior se muestra el cambio de presión que se presenta antes de la malla y después. El delta de presión es de 1000 Pa indica que en efecto la cámara de estabilización ayuda a rectificar el flujo que va a ingresar a la zona de pruebas.

Otro comportamiento que se analiza es el índice de turbulencias y como se puede ver en la figura 90 se tiene que en la zona de la cámara de pruebas el índice es bajo.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

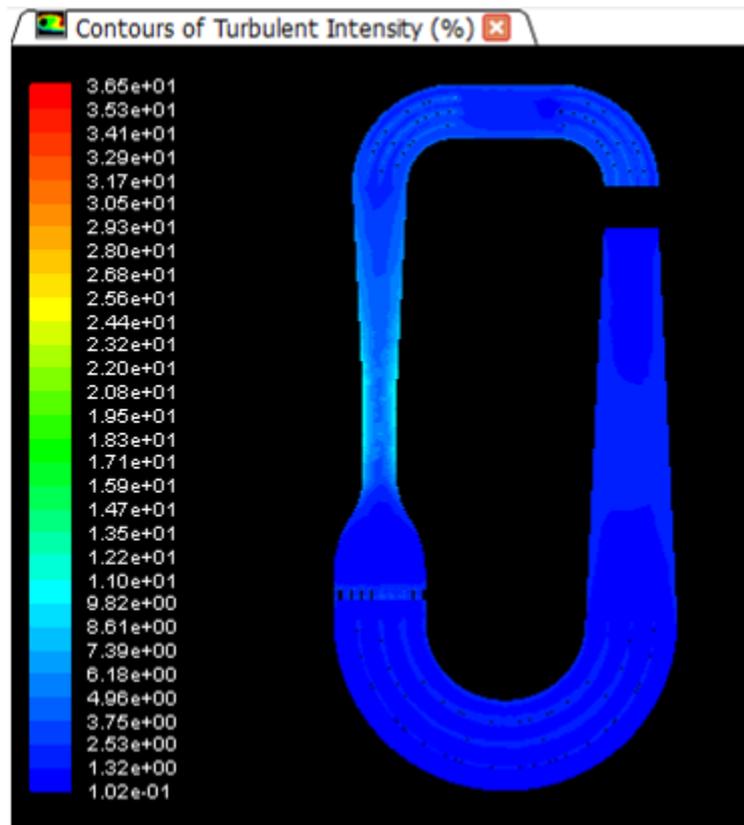


Figura 90. Índice de turbulencias.

En la figura 91, se visualiza cómo se comportan los vectores de velocidad en la zona donde están los ductos y claramente se puede ver que la cámara de estabilización reordena las líneas de flujo del fluido.

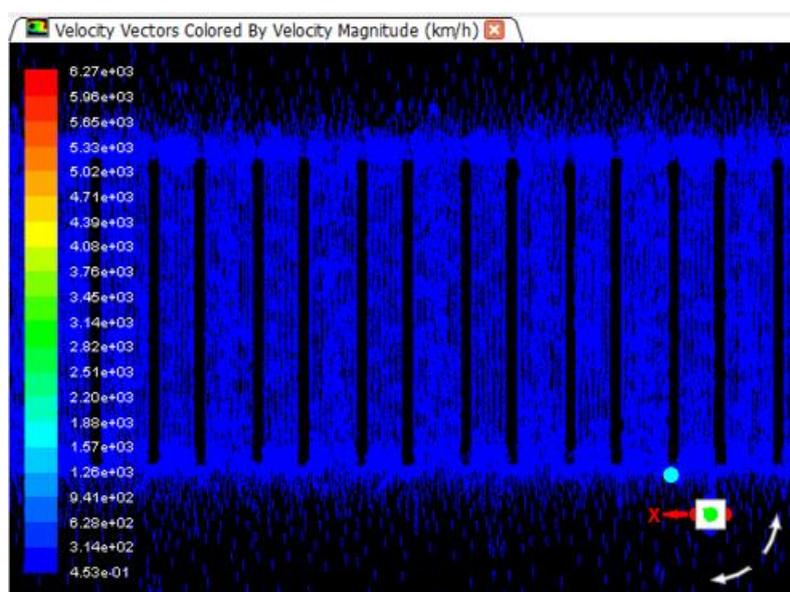


Figura 91. Índice de turbulencias.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Tercera Simulación. Túnel con el vehículo y la cámara de estabilización.

El comportamiento que tiene el fluido en la figura 92, muestra que cuando el aire entra en contacto con el vehículo la velocidad máxima con la que choca el aire es de 784 Km/h, debido al perfil que tiene el auto hace que el aire se desvíe para la parte superior y por los lados se genera turbulencia ocasionado efectos adversos en el difusor como turbulencia y aumentos drásticos de presión ver figura 88 donde se muestra que la presión aumenta de forma exuberante después que el aire ha sido desviado por el vehículo, finalmente se puede ver que en el difusor se tiene distintos colores lo que indica que el aire adquiere distintas velocidades que van desde cero hasta los 392 Km/h.

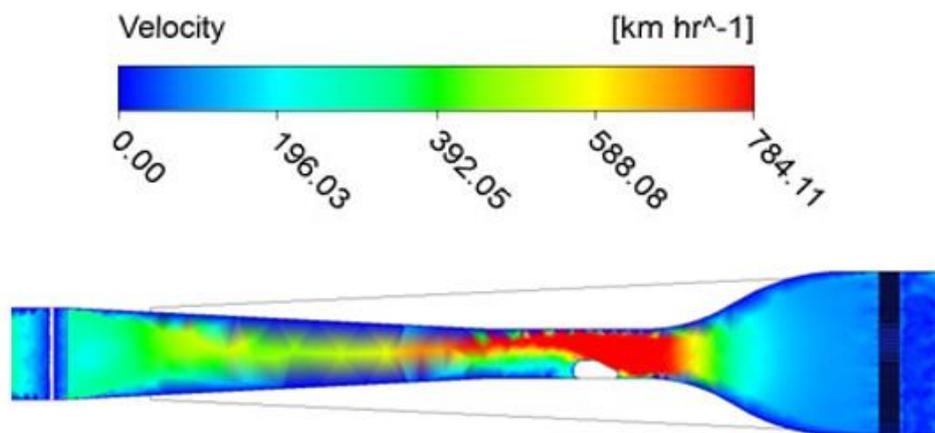


Figura 92. Vista frontal.

Otro fenómeno que ocurre cuando se hacen pruebas en los túneles de viento es el desvío de la velocidad hacia los lados tal como se puede apreciar en la figura 93, anteriormente se había mencionado los problemas que se generan en la cámara de ensayo y el difusor que va después de la cámara, mediante esta vista se puede observar de mejor forma la turbulencia que se produce en esta zona.

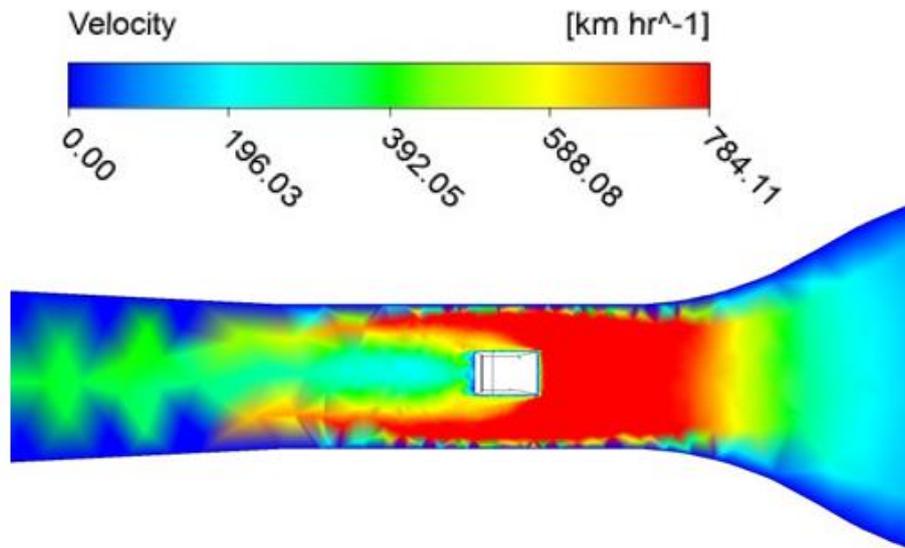


Figura 93. Índice de turbulencias.

Conclusiones

El modelo determinado para el diseño del túnel de viento presenta 13 elementos principales y la malla de estabilización que está compuesta de 1053 ductos, sus dimensiones fueron establecidas a través del dimensionamiento de la cámara de pruebas que tiene unas dimensiones de 3x4x10 metros y que fue basado en el modelo de un vehículo de gama común tipo sedán.

A través de la utilización del software Matlab se determinó las pérdidas que se tiene en los ductos. Dichos porcentajes muestran que la mayor cantidad de pérdidas se genera en la malla de estabilización y en los ductos que tiene grandes variaciones geométricas como es el caso de los codos.

El modelo 3D que se simula y que incluye la mayoría de las características aproximadas a la realidad es el que se realiza con todos los elementos del túnel, así como también la ubicación del vehículo en el interior.

Los valores obtenidos de las distintas simulaciones facilitaron analizar el comportamiento del fluido, permitiendo encontrar los puntos críticos del diseño propuesto.

Los valores de velocidad y presión obtenidos por la simulación y la obtención de los resultados al utilizar distintos materiales de construcción en el túnel de viento muestran que las pérdidas que se producen por el cambio de materiales son relativamente bajas y que el efecto que tiene sobre la velocidad del viento es bajo. Dicho análisis sirvió también para corroborar los cálculos relativos a las pérdidas desarrollados en las tablas 9 y 10.

El diseño y dimensionamiento planteados cumplen con la respuesta aerodinámica esperada en la zona de prueba donde se obtiene la mayor velocidad y presión constante, muy cercana a la presión atmosférica.

Un ventilador de capacidad de velocidad del flujo de 103 km/h es requerido para obtener una velocidad de 250 km/h en la cámara de pruebas valor cercano a los 288 Km/h

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Los dos tipos de materiales que se proponen para la construcción del túnel de viento son: el acero y el hormigón armado, las ventajas que ofrece el acero es el bajo costo de construcción con referencia al hormigón, así como también que existen de menor cantidad de pérdidas, dentro de las desventajas se tiene que el acero proporciona bajo aislamiento acústico en comparación con el concreto.

Los planos elaborados del túnel de viento están conformados por un plano de conjunto y 11 planos de taller, el plano del ensamble global está realizado en un formato A2 y a escala de 1:500 en el cual se detalla los nombres de cada elemento, el material y las dimensiones generales del túnel, por otro lado, en los planos de taller se especifican las dimensiones de cada ducto y en sus respectivas vistas se puede ver la forma que tiene cada elemento.

Recomendaciones

Se debería realizar un estudio del comportamiento del material, en las zonas donde la presión es elevada. Para efectos de este proyecto se halla localizada en los codos superiores.

Se sugiere realizar un análisis disminuyendo longitudes de los deflectores localizados en los codos para ver el comportamiento del fluido y los efectos que produce.

Un estudio para analizar el comportamiento del material en las zonas donde están los deflectores de los codos es necesario, ya que al existir grandes velocidades de flujo con mucha energía la erosión en el material se podría estar afectando el rendimiento del túnel si alguno de ellos llegase a desprenderse de su zona.

Es necesario estudiar los efectos que ocasionaría la instalación de una malla de estabilización a la salida de la cámara de pruebas con el fin de comprobar si se reordena el flujo y la presión disminuye, con la finalidad de evitar daños en el ventilador por las elevadas presiones que tendría cuando se desarrollan las investigaciones en el túnel.

Bibliografía

- alibaba.com. (n.d.). Espesor De La Chapa de Acero estándar/Alta Calidad Corten Placa de Acero/prime C45 laminado en caliente MS placa de acero al carbono-Hojas de acero- Identificación del producto:60423237047-spanish.alibaba.com. Retrieved from <https://spanish.alibaba.com/product-detail/standard-steel-plate-thickness-high-quality-corten-steel-plate-prime-c45-hot-rolled-ms-carbon-steel-plate-60423237047.html>
- aprendiendoarduino.wordpress.com. (2017). Programación Arduino | Aprendiendo Arduino. Retrieved from <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2017/01/23/programacion-arduino-5/>
- articulo.mercadolibre.com. (n.d.). Barometro Vaisala Ptb110 - U\$S 100,00 en Mercado Libre. Retrieved August 6, 2017, from https://articulo.mercadolibre.com.pe/MPE-425948138-barometro-vaisala-ptb110-_JM
- articulo.mercadolibre.com.ec. (n.d.). Termocupla Con Cabezal Tipo K -200..1150 °c - U\$S 392,57 en Mercado Libre. Retrieved August 6, 2017, from https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-412158460-termocupla-con-cabezal-tipo-k-2001150-c-_JM
- Barila, D., & Zucas, D. (n.d.). Tunel de Viento de Capa Límite.
- Barlow, J. B., Rae Jr, W. H., & Pope, A. (1999). *Low Speed Wind Tunnel Testing* (Third). United States: John Wiley & Sons.
- Benalcázar Venegas, J. F. (2015). *Diseño y construcción de un túnel de viento cerrado para calibraciones de sensores e instrumentos de medición del Instituto Nacional de Metereología e Hidrología (INAMHI)*. Universidad de las Fuerzas armadas.
- Blevins, R. D. (1984). *Applied Fluid Dynamics Handbook*. Krieger Pub. Retrieved from <https://books.google.com.ec/books?id=WGJDPgAACAAJ>
- Calautit, J. K., Hughes, B. R., & Shahzad, S. S. (2015). CFD and wind tunnel study of the

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

performance of a uni-directional wind catcher with heat transfer devices. *Renewable Energy*, 83, 85–99. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.005>

Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2008). *Thermodynamics: An Engineering Approach*.

McGraw-Hill Higher Education. Retrieved from

<https://books.google.com.ec/books?id=8G6NSQAACAAJ>

Chicas, F. (2012). *Diseño y construcción de un túnel de viento*. Universidad

Centroamericana. El Salvador.

EL Telegrafo. (2017). La industria automotriz crecerá entre 16 y 19%. Retrieved July 9,

2017, from <http://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/economia/8/la-industria-automotriz-crecera-entre-16-y-19>

elcomercio.com. (2011). Fabricantes de autopartes amplían su negocio | El Comercio.

Retrieved August 15, 2017, from

<http://www.elcomercio.com/actualidad/negocios/fabricantes-de-autopartes-amplian-negocio.html>

elmundo.es. (2015). Túneles de viento: en manos del aire | Motor | EL MUNDO. Retrieved

July 4, 2017, from

<http://www.elmundo.es/motor/2015/08/20/55d5bc5c268e3ed31d8b457f.html>

eluniverso.com. (n.d.). Oferta se ubica entre \$ 400 y \$ 1.500 por metro construido | Economía

| Noticias | El Universo. Retrieved from

<http://www.eluniverso.com/noticias/2013/07/05/nota/1117806/oferta-se-ubica-400-1500-metro-construido>

F1aldia. (2010). Túneles de viento. Retrieved from <http://www.f1aldia.com/web/nosotros/>

Flashforge Finder 3D Printer. (2017). Flashforge Finder 3D Printer User Guide. Retrieved

from <http://static.creativetools.se/misc/doc/flashforge/finder/Finder-User-Guide.pdf>

Fondevila Martinez, C. (2011). Capítulo 1 características del vehículo 1.1., 1–146.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

- Fouatih, O. M., Medale, M., Imine, O., & Imine, B. (2016). Design optimization of the aerodynamic passive flow control on NACA 4415 airfoil using vortex generators. *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, 56, 82–96.
<https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2015.11.006>
- Gherardelli, C. (n.d.). Capa Límite. *Mecánica de Fluidos*, 116–131.
- Gmbh, A. M. (n.d.). Barometric Pressure Sensor Vaisala PTB110 Barometric Pressure Sensor Vaisala PTB110 Specifications S32100 / S32200 / S32300, 1–3.
- Leifsson, L., & Koziel, S. (2015). Simulation-driven design of low-speed wind tunnel contraction. *Journal of Computational Science*, 7, 1–12.
<https://doi.org/10.1016/j.jocs.2014.12.004>
- Liu, P., Xing, Y., Guo, H., & Li, L. (2017). Design and performance of a small-scale aeroacoustic wind tunnel. *Applied Acoustics*, 116, 65–69.
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.09.014>
- Liu, X., Han, Y., Cai, C. S., Levitan, M., & Nikitopoulos, D. (2016). Wind tunnel tests for mean wind loads on road vehicles. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 150, 15–21. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.12.004>
- Martínez Coza, D. E. (2016). Diseño y construcción de un tunel de viento para ensayos de régimen Subsónico y Transónico.
- medidasdecoches.com. (n.d.). Buscador de coches nuevos por tamaño y maletero. Retrieved July 3, 2017, from <http://www.medidasdecoches.com/buscador-coches.php>
- Meléndez Sánchez, Á. (2014). El sector automotor, empeñado en su sobrevivencia. Retrieved from http://www.revistagestion.ec/wp-content/uploads/2013/07/219_005.pdf
- Moonen, P., Blocken, B., & Carmeliet, J. (2007). Indicators for the evaluation of wind tunnel test section flow quality and application to a numerical closed-circuit wind tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95(9–11), 1289–1314.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2007.02.027>

Mott, R. L., & Brito, J. E. (2006). *Mecánica de fluidos*. Pearson Educación. Retrieved from

<https://books.google.com.ec/books?id=LbMTKJ4eK4QC>

Muñoz, A. (2012). *Diseño y análisis computacional para túnel de viento de baja velocidad*.

Universidad Carlos III de Madrid. Madrid.

Olivares de Jodar, J. (2011). Estudio aerodinámico aplicado en el campo de la automoción.

Upc, I(Estudio aerodinámico), 1–29. Retrieved from

https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/14663/PFC_I.pdf?sequence=2

patiodeautos.com. (2016). Las marcas de autos más vendidas en Ecuador en 2016. Retrieved

from [http://patiodeautos.com/revista/generales/marcas-autos-mas-vendidas-ecuador-](http://patiodeautos.com/revista/generales/marcas-autos-mas-vendidas-ecuador-2016)

2016

Pineda, D., & Vega, W. (2010). *Escuela politécnica del ejército. Diseño y construcción de un*

túnel de viento subsónico con sistema de adquisición de datos para el estudio de

aerodinámica de los vehículos. Escuela politécnica del ejército. Ecuador. Latacunga.

Products, E. (n.d.). Eldridge Products, Inc.

proecuador.gob.ec. (n.d.). Automotriz | PRO ECUADOR. Retrieved August 15, 2017, from

<http://www.proecuador.gob.ec/compradores/oferta-exportable/automotriz/>

Proecuador.gob.ec. (2017). ANÁLISIS SECTORIAL AUTOMOTRIZ 2017. Retrieved from

[http://www.proecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2017/02/PERFIL-AUTOMOTRIZ-](http://www.proecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2017/02/PERFIL-AUTOMOTRIZ-FINAL.pdf)

FINAL.pdf

quito.olx.com.ec. (2017). Terreno Espectacular 9366m2 Ruta Viva - Quito. Retrieved from

<https://quito.olx.com.ec/terreno-espectacular-9366m2-ruta-viva-iid-922016509>

Ramírez, R. M. (2010). La industria de automoción : su evolución e incidencia social y

económica. Retrieved from

<http://revistas.ucm.es/index.php/CESE/article/viewFile/CESE9393110289A/11097>

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Razura Beltrán, Á. (2012). *Costos y Presupuestos*.

Rosas, P. (2010). *Caracterización del túnel de viento de velocidad baja del LABINTHAP*.

Instituti Técnico Nacional. México.

Silva Treviño, C. J. (2005). *Diseño y Construcción de un Túnel de Viento Bidimensional Subsónico de Circuito Abierto por Inyección*. Universidad de Colima.

solidworks. (n.d.). Dinámica de fluidos computacional (CFD) | SOLIDWORKS. Retrieved July 4, 2017, from <http://www.solidworks.es/sw/products/simulation/computational-fluid-dynamics.htm>

spanish.alibaba.com. (n.d.-a). Flujo de masa de aire sensor precio, Sensor de flujo de aire, Medidor de flujo de argón-Medidores de flujo -Identificación del producto:60446050492-spanish.alibaba.com. Retrieved August 6, 2017, from <https://spanish.alibaba.com/product-detail/mass-air-flow-sensor-price-airflow-sensor-argon-flow-meter-60446050492.html?spm=a2700.8698675.29.1.68ed8ad1dekyxB&s=p>

spanish.alibaba.com. (n.d.-b). RK100-02 Muy caliente venta de Bajo costo de Velocidad Del Viento Del Anemómetro-imagen-Instrumentos de medida de velocidad-Identificación del producto:60559231073-spanish.alibaba.com. Retrieved August 6, 2017, from <https://spanish.alibaba.com/product-detail-img/rk100-02-muy-caliente-venta-de-bajo-costo-de-velocidad-del-viento-del-anem-metro-60559231073.html>

Su, Y.-X. (1991). Flow analysis and design of three-dimensional wind tunnel contractions. *AIAA Journal*, 29(11), 1912–1920. <https://doi.org/10.2514/3.10818>

Tajadura, R. B. (2005). Turbulencia. *Universidad de Oviedo, Área de Me*, 1–25.

Universidad Nacional de La Plata. (2014). Motores alternativos.

UTN-FRBA. (2010). Gráficas y Tablas. Retrieved from

http://www.civil.frba.utn.edu.ar/Materias/hidraulica/archivos/tablas_graficos.pdf

vaxasoftware.com. (n.d.). Tabla de densidades. Retrieved from www.vaxasoftware.com

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

White, F. (2010). *Fluid Mechanics SI.2.* (J. P. Holman & J. Lloyd, Eds.), *Refrigeration And Air Conditioning* (Fourth, Vol. 6). McGraw-Hill.

<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2004.09.010>

Anexos

Anexo A: Parámetros para el dimensionamiento del fan

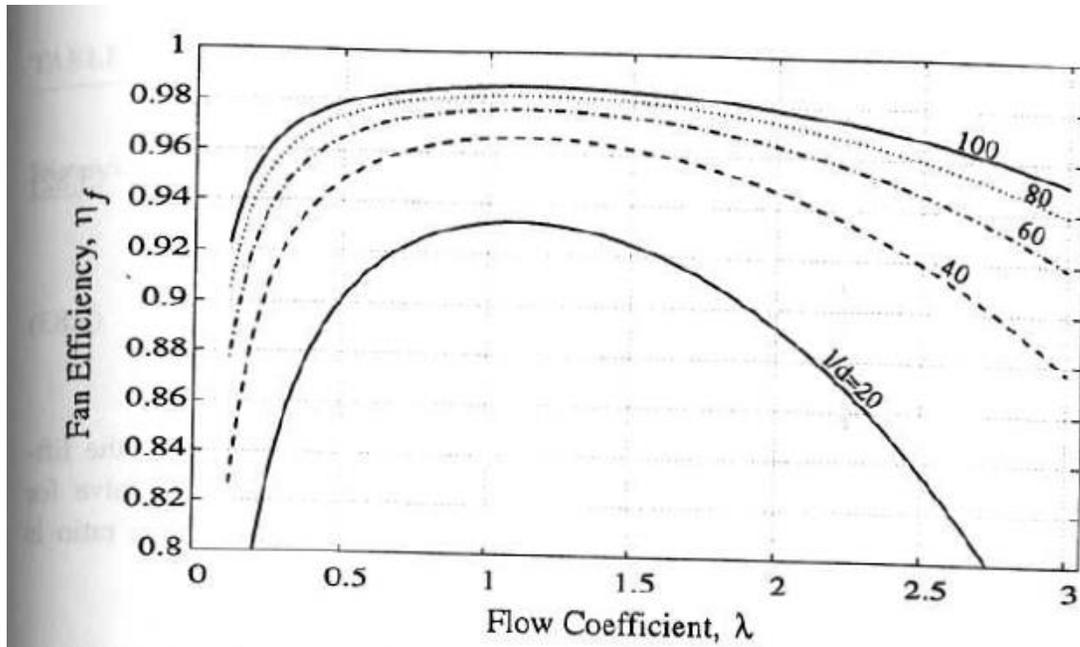


FIGURE 3.19 Approximate fan efficiency as a function of flow coefficient for a range of section lift-to-drag ratio.

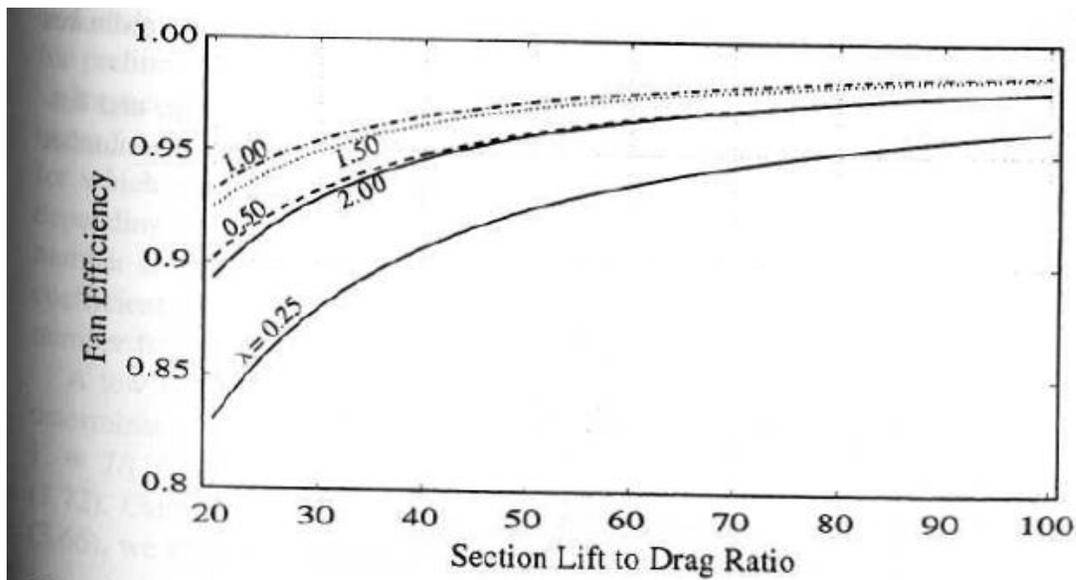


FIGURE 3.20 Approximate fan efficiency as a function of section lift-to-drag ratio at selected values of flow coefficient.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Anexo B: Parámetros para el dimensionamiento de los álabes

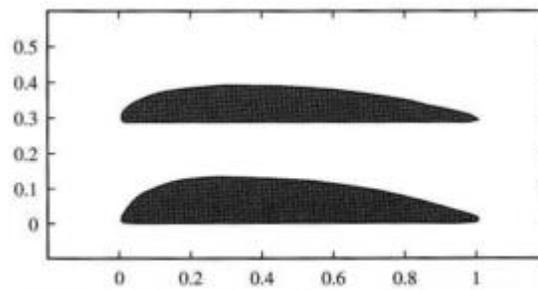


FIGURE 3.21 Typical early airfoils for fan sections.

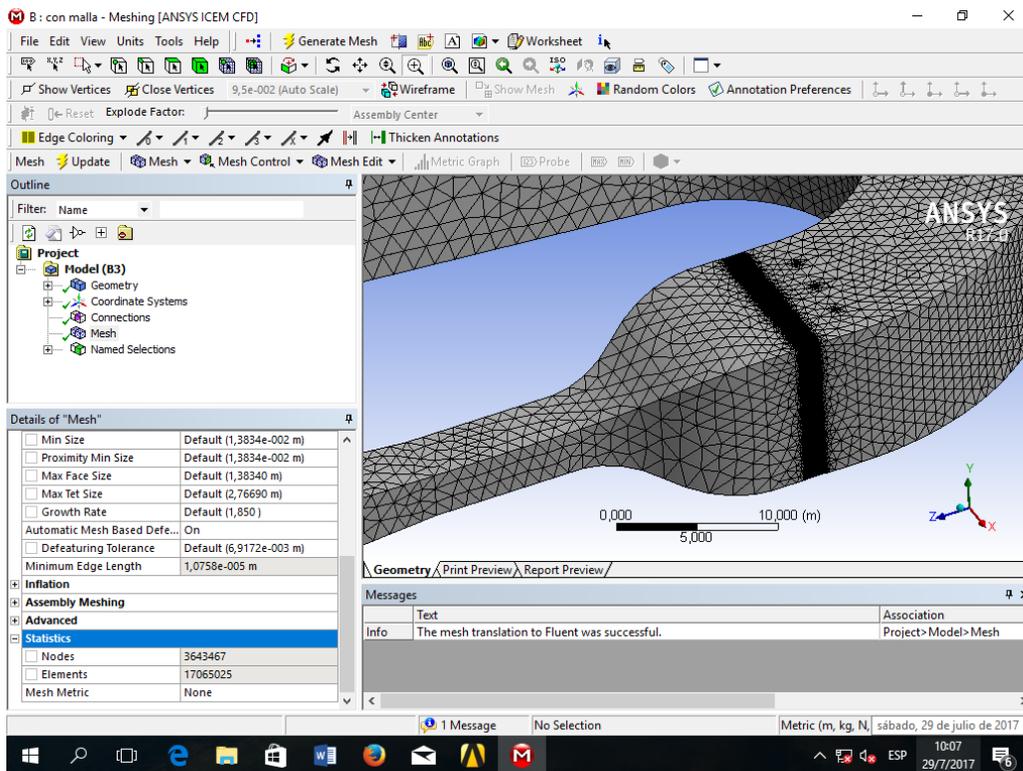
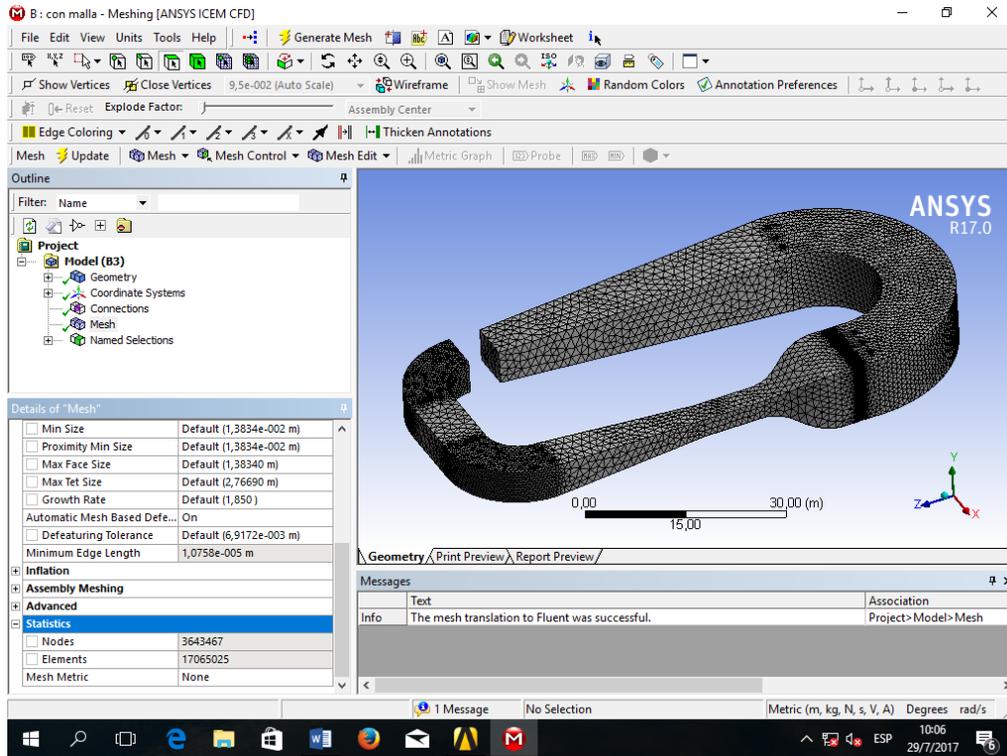
TABLE 3.4. Ordinates of Fan Profiles D and E

Distance from Leading Edge ^a	Height above Flat Undersurface	
	D	E
0	0.0135	0.0115
0.0125	0.0370	0.0319
0.0250	0.0538	0.0442
0.0500	0.0780	0.0610
0.0750	0.0925	0.0724
0.1000	0.1030	0.0809
0.1500	0.1174	0.0928
0.2000	0.1250	0.0990
0.3000	0.1290	0.1030
0.4000	0.1269	0.1022
0.5000	0.1220	0.0980
0.6000	0.1120	0.0898
0.7000	0.0960	0.0770
0.8000	0.0740	0.0591
0.9000	0.0470	0.0379
0.9500	0.0326	0.0258
1.0000	0.0100	0.0076
L.E. rad	0.0135	0.0115
T.E. rad	0.0100	0.0076

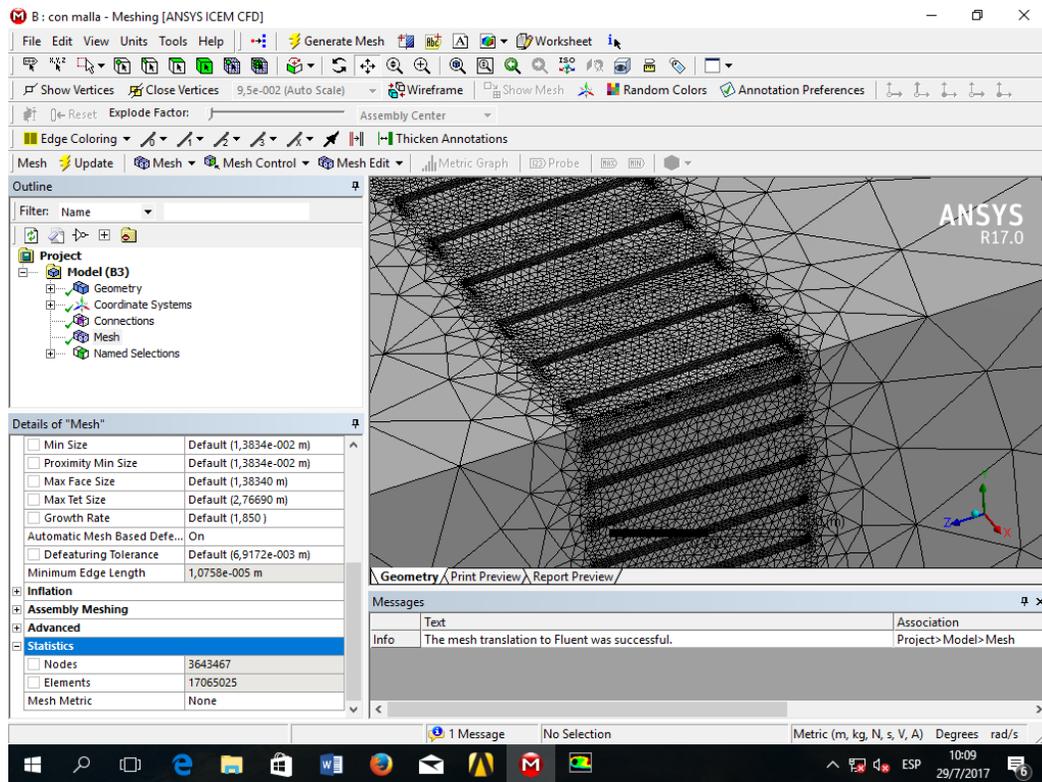
^aT.E. means Trailing Edge. L.E. means Leading Edge.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Anexo C: Proceso de mallado del túnel con la cámara de estabilización



DISEÑO TÚNEL DE VIENTO



Anexo D: Programación para el desarrollo las gráficas del prototipo

El módulo de control utilizado para los sensores es un integrado programable conocido como arduino UNO, usamos un total de 4 salidas de información, análogos para los sensores de presión, temperatura y altitud.

- En windows solo usamos Arduino Genuino Versión 1.8.3 (Solo pruebas del arduino)
- En Linux usamos Ubuntu Versión 16.04-02
 - Arduino 1.8.3
 - Pip
 - Python 2.7
 - Librería Serial
 - Librería Matplotlib

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

- Librería time
- Librería Sys
- Librería math

Arduino

El lenguaje de programación de arduino es uno de los más amigables para proyectos de robótica y electrónica, se basa en C+, en términos simples para programar un arduino se debe especificar las entradas a usar es decir que puertos se van a abrir ya sean digitales o análogos (void setup) y que acción van a realizar cada puerto (void loop).

Para los sensores se usaron 2 entradas análogos, ya que vamos a medir factores físicos y el arduino los va a interpretar y transformar a datos digitales por lo tanto tenemos que tener el circuito de conexión y realizar las pruebas en un protoboard previa a su colocación en la maqueta final.

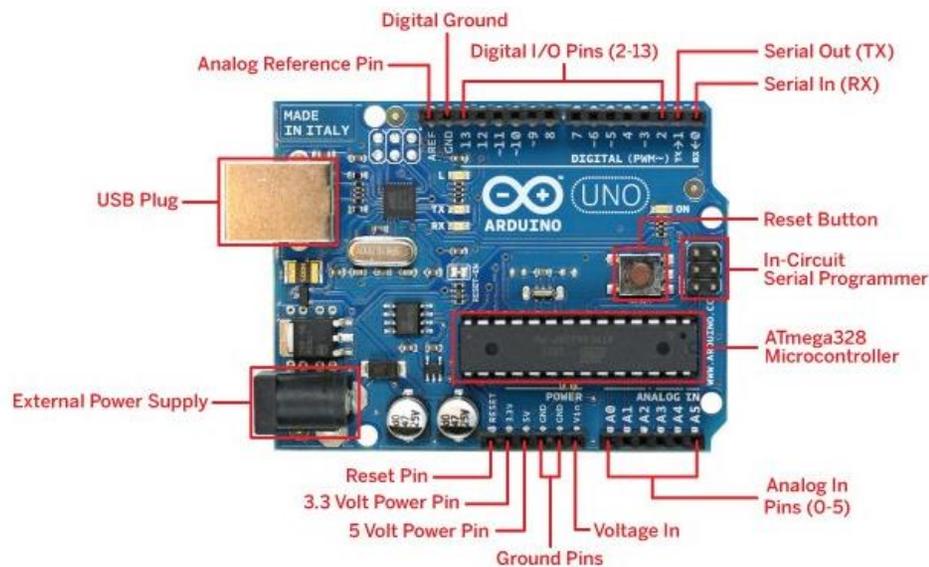


Figura 49. Detalle de los principales componentes del Arduino UNO

(aprendiendoarduino.wordpress.com, 2017)

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

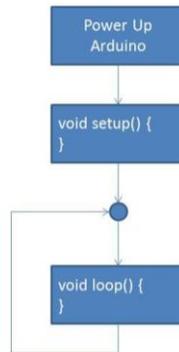


Figura 50. Esquema grafico de como funciona un sketch en arduino
(aprendiendoarduino.wordpress.com, 2017)

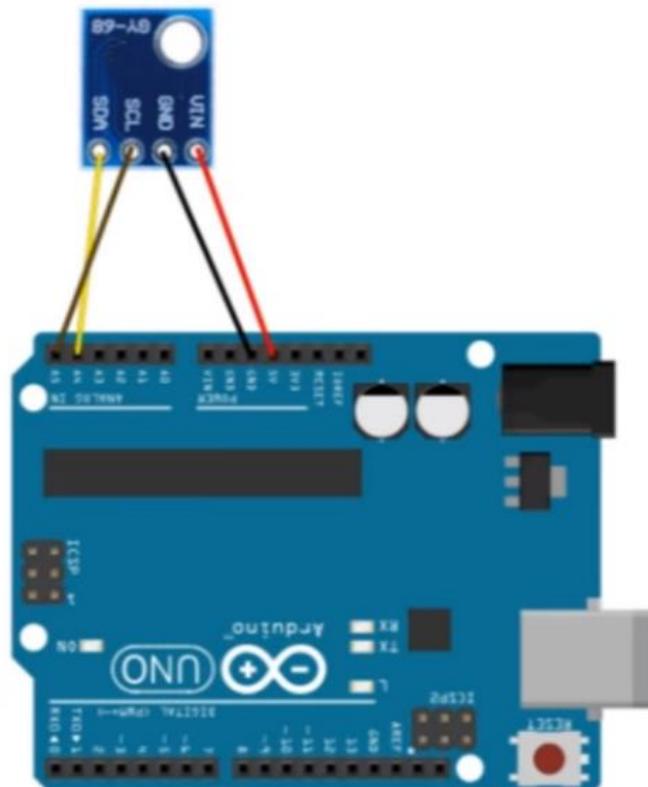


Figura 50. Esquema grafico de conexión del sensor BMP180.

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

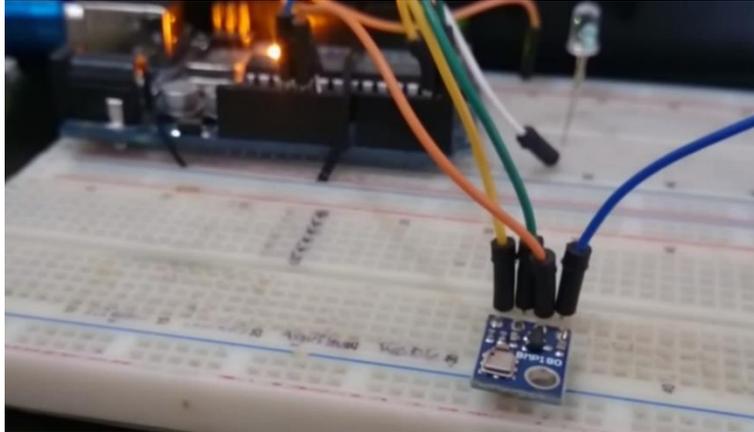


Figura 51. Conexiones en la protoboard del sensor BMP180

```
COM3 (Arduino Uno)
Temperature: 26.60 C
Altitude: 934.80 m
Pressure: 911.82 hPa
Temperature: 26.60 C
Altitude: 934.60 m
Pressure: 911.83 hPa
Temperature: 26.60 C
Altitude: 934.50 m
Pressure: 911.80 hPa
Temperature: 26.60 C
Altitude: 934.80 m

Connections
=====
Connect SCL to analog 5
Connect SDA to analog 4
Connect VDD to 3.3V DC
Connect GROUND to common ground

History
=====
2013/JUN/17 - Updated altitude calculations (KTOWN)
2013/FEB/13 - First version (KTOWN)
*/

Adafruit_BMP085_Unified bmp = Adafruit_BMP085_Unified(10085);
```

Figura 52. Monitoreo del sensor BMP180

Sketch Usado para conectar 2 sensores BMP-180

A continuación, se detalla la programación realizada para conectar los dos sensores BMP – 180:

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

```
#include <MyWireLib.h> // Libreria usada para la configuracion de los integrados por
defecto
MyWireLib Sens[2]
//vars
int16_t ac1[2], ac2[2], ac3[2], b1[2], b2[2], mb[2], mc[2], md[2]; // Valores PROM de stock
del sensor BMP180
uint16_t ac4[2], ac5[2], ac6[2]; // Valores PROM de stock del sensor BMP180
const uint8_t oss = 3; // Establecer el ajuste de sobremuestreo
const uint8_t osd = 26; // Con el correspondiente retardo de sobremuestreo
float T[2], P[2]; // Establecer variables globales para temperatura y
presión
void setup() Selecion de puertos a abrir en arduino y bajo que parametros
{
Serial.begin(9600); Tipo de comunicacion y frecuencia dada en BAUDIOS
//declare pins Apertura de pines en el arduino, puede modificar tanto entre analagos
y digitales
Sens[0].SCLpinI=2; PIN DEL ARDUINO
Sens[0].SDApinI=3; PIN DEL ARDUINO
Sens[1].SCLpinI=4; PIN DEL ARDUINO
Sens[1].SDApinI=5; PIN DEL ARDUINO
Sens[0].Soss=oss; PIN DEL ARDUINO
Sens[1].Soss=oss; PIN DEL ARDUINO
//> for test Prueba de muestreo de los sensores ( Confirmacion de comunicacion)
Serial.print("SCLPIN for sensor 0: "); Serial.println(Sens[0].SCLpinI);
Serial.print("SDAPIN for sensor 0: ");Serial.println(Sens[0].SDApinI);
Serial.print("SCLPIN for sensor 1: ");Serial.println(Sens[1].SCLpinI);
Serial.print("SDAPIN for sensor 1: ");Serial.println(Sens[1].SDApinI);
//< for test
delay(500); Tiempo de toma de muestra dada en milisegundos
Sens[0].InitWire();
Sens[1].InitWire();
init_SENSOR(0);
init_SENSOR(1);
}
void loop() Acciones a realizar por los puertos
{
int32_t b5[2]; Parametros de calculo de presion y temperatura a la hora de monitoreo y
for(int eachsens = 0; eachsens < 2 ; eachsens++)
{
b5[eachsens]= temperature(eachsens); // Read and calculate temperature (T)
P[eachsens] = pressure(b5[eachsens],eachsens); // Read and calculate pressure (P)
Serial.print("Sensor ");
Serial.print(eachsens);
Serial.print(" => ");
Serial.print("Temperature: ");
Serial.print(T[eachsens], 2);
```

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

```
    Serial.print(" C");
    Serial.print(" | Pressure: ");
    Serial.print(P[eachsens], 2);
    Serial.println(" mbar"); }
    delay(200);           // Delay between each read }
void init_SENSOR(int sensnr){
    ac1[sensnr] = Sens[sensnr].Get16bitFromRegister(0xAA);
    ac2[sensnr] = Sens[sensnr].Get16bitFromRegister(0xAC);
    ac3[sensnr] = Sens[sensnr].Get16bitFromRegister(0xAE);
    ac4[sensnr] = Sens[sensnr].Get16bitFromRegister(0xB0);
    ac5[sensnr] = Sens[sensnr].Get16bitFromRegister(0xB2);
    ac6[sensnr] = Sens[sensnr].Get16bitFromRegister(0xB4);
    b1[sensnr] = Sens[sensnr].Get16bitFromRegister(0xB6);
    b2[sensnr] = Sens[sensnr].Get16bitFromRegister(0xB8);
    mb[sensnr] = Sens[sensnr].Get16bitFromRegister(0xBA);
    mc[sensnr] = Sens[sensnr].Get16bitFromRegister(0xBC);
    md[sensnr] = Sens[sensnr].Get16bitFromRegister(0xBE);
    Serial.println("");
    Serial.print("Sensor "); Serial.print(sensnr); Serial.println(" calibration data:");
    Serial.print(F("AC1 = ")); Serial.println(ac1[sensnr]);
    Serial.print(F("AC2 = ")); Serial.println(ac2[sensnr]);
    Serial.print(F("AC3 = ")); Serial.println(ac3[sensnr]);
    Serial.print(F("AC4 = ")); Serial.println(ac4[sensnr]);
    Serial.print(F("AC5 = ")); Serial.println(ac5[sensnr]);
    Serial.print(F("AC6 = ")); Serial.println(ac6[sensnr]);
    Serial.print(F("B1 = ")); Serial.println(b1[sensnr]);
    Serial.print(F("B2 = ")); Serial.println(b2[sensnr]);
    Serial.print(F("MB = ")); Serial.println(mb[sensnr]);
    Serial.print(F("MC = ")); Serial.println(mc[sensnr]);
    Serial.print(F("MD = ")); Serial.println(md[sensnr]);
    Serial.println("");}
/*****
```

Calcular lecturas de presión

```
*****/
float pressure(int32_t b5, int sensnr)
{
    int32_t x1, x2, x3, b3, b6, p, UP;
    uint32_t b4, b7;
    UP = read_pressure(sensnr); // Read raw pressure
    b6 = b5 - 4000;
    x1 = (b2[sensnr] * (b6 * b6 >> 12)) >> 11;
    x2 = ac2[sensnr] * b6 >> 11;
    x3 = x1 + x2;
    b3 = (((ac1[sensnr] * 4 + x3) << 0x05) + 2) >> 2;
    x1 = ac3[sensnr] * b6 >> 13;
    x2 = (b1[sensnr] * (b6 * b6 >> 12)) >> 16;
```

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

```
x3 = ((x1 + x2) + 2) >> 2;
b4 = (ac4[sensnr] * (uint32_t)(x3 + 32768)) >> 15;
b7 = ((uint32_t)UP - b3) * (50000 >> oss);
if(b7 < 0x80000000) { p = (b7 << 1) / b4; } else { p = (b7 / b4) << 1; } // or p = b7 <
0x80000000 ? (b7 * 2) / b4 : (b7 / b4) * 2;
x1 = (p >> 8) * (p >> 8);
x1 = (x1 * 3038) >> 16;
x2 = (-7357 * p) >> 16;
return (p + ((x1 + x2 + 3791) >> 4)) / 100.0f; // Return pressure in mbar}
/*****
```

Lectura de temperatura no compensada

```
*****/
```

```
int32_t temperature(int sensnr){
    int32_t x1, x2, b5, UT;
    byte tobesend[2] = {0xf4, 0x2e};
    Sens[sensnr].sendbytes(tobesend,2);
    delay(5);
    UT = Sens[sensnr].Get16bitFromRegister(0xf6);
    // Calculo de la temperatura real
    x1 = (UT - (int32_t)ac6[sensnr]) * (int32_t)ac5[sensnr] >> 15;
    x2 = (((int32_t)mc[sensnr] << 11) / (x1 + (int32_t)md[sensnr]));
    b5 = x1 + x2;
    T[sensnr] = (b5 + 8) >> 4;
    T[sensnr] = T[sensnr] / 10.0;           // En grados Celcius
    return b5;}
/*****
```

Lectura de presion descompensada

```
*****/
```

```
int32_t read_pressure(int sensnr){
    int32_t value;
    byte tobesend[2] = {0xf4, (0x34 + (oss << 6))};
    Sens[sensnr].sendbytes(tobesend,2);
    delay(oss);
    value= Sens[sensnr].Get24bitFromRegister(0xf6);
    return (value); // Return value }
```

Linux

El sistema operativo usado es UBUNTU 16.02.04 64 BITS lo usamos por la arquitectura del sistema y la facilidad de conseguir software de código libre, pero sube la complejidad a la hora de instalación, inicio, y requiere de conocimientos de nivel medio en programación, pero nos permite cometer más errores al ser un programa más robusto y flexible a comparación de

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Windows 10 y sus aplicaciones en las cuales se necesita la declaración de muchos más parámetros a comparación que en Linux.

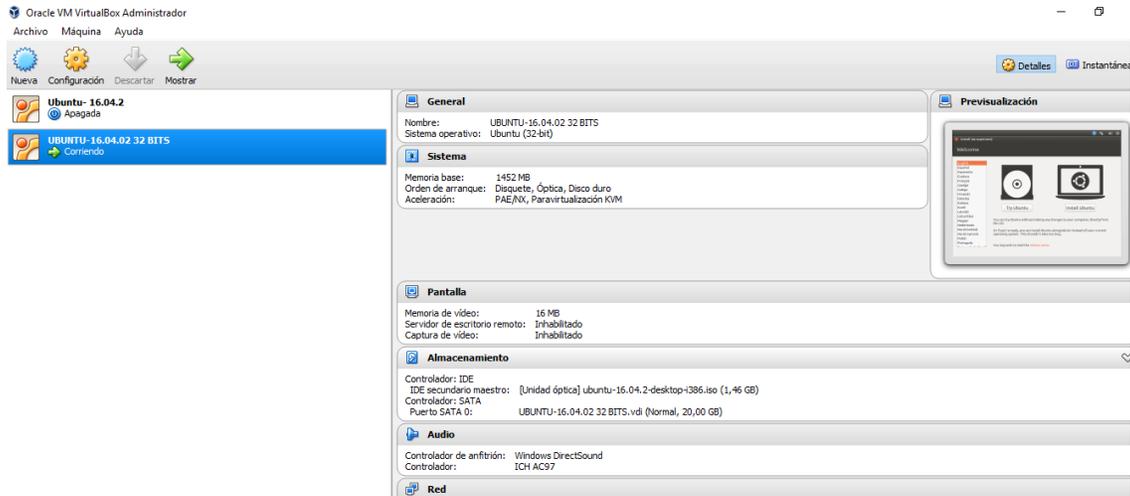


Figura 54. Virtual Box con UBUNTU instalado.

Se usó virtual Box de Oracle para simular una máquina virtual y por ende por usar LINUX dentro del mismo windows, una vez instalado tendremos que instalar varios programas en UBUNTU como:

Arduino 1.8.3

PIP (Programa para instalar librerías en Python)

Python 2.7

Librería Serial

Librería Matplotlib

Librería time

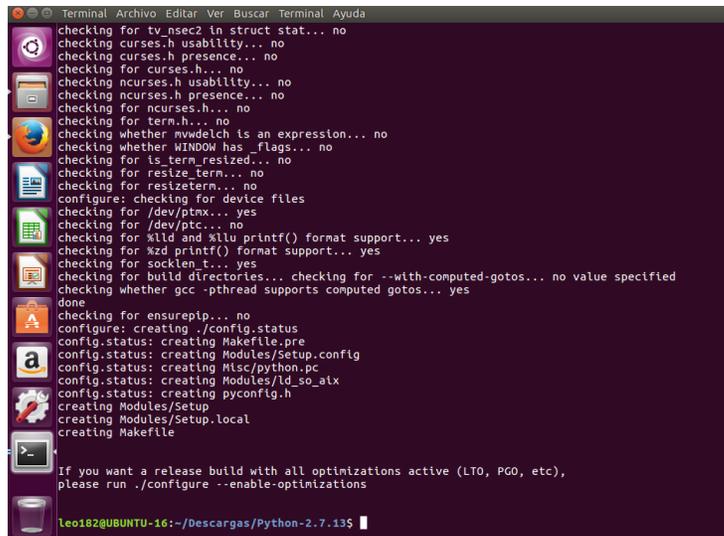
Librería Sys

Librería math

Procedemos a descargar e instalar Python, la instalación de este o cualquier otro programa requiere de conocimiento de que comandos y cuando usarlos durante el

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

momento de instalación, debido a que son procesos medianamente largos solo los explicaremos brevemente en conjunto con la instalación de 6 librerías.



```
Terminal Archivo Editar Ver Buscar Terminal Ayuda
checking for tv_nsec2 in struct stat... no
checking curses.h usability... no
checking curses.h presence... no
checking for curses.h... no
checking ncurses.h usability... no
checking ncurses.h presence... no
checking for ncurses.h... no
checking for term.h... no
checking whether mvwdelch is an expression... no
checking whether WINDOW has _flags... no
checking for is_term_resized... no
checking for resize_Term... no
checking for resizeTerm... no
configure: checking for device files
checking for /dev/ptmx... yes
checking for /dev/ptc... no
checking for %lld and %llu printf() format support... yes
checking for %zd printf() format support... yes
checking for socklen_t... yes
checking for build directories... checking for --with-computed-gotos... no value specified
checking whether gcc -pthread supports computed gotos... yes
done
checking for ensurepip... no
configure: creating ./config.status
config.status: creating Makefile.pre
config.status: creating Modules/Setup.config
config.status: creating Misc/python.pc
config.status: creating Modules/ld_so_aix
config.status: creating pyconfig.h
creating Modules/Setup
creating Modules/Setup.local
creating Makefile

If you want a release build with all optimizations active (LTO, PGO, etc),
please run ./configure --enable-optimizations

leo182@UBUNTU-16:~/Descargas/Python-2.7.13S
```

Figura 55. Terminal de UBUNTU con Python Instalado

A continuación, se muestra la programación Phyton con las 6 librerías y los sensores para la determinación de las gráficas de: velocidad, temperatura y presión.

Script de Phyton

```
# -*- coding: utf-8 -*- // Declaración de que librerías se van
import serial           a usar, y nombres de las magnitudes de los sensores.
import matplotlib.pyplot as plt
import time
import sys
import math

temp0 = []
pres0 = []
temp1 = []
pres1 = []
vel0 = []
vel1 = []
datos = []
```

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Establecimientos de los parámetros de la gráfica es decir número de graficas a mostrar, definición de que se va a comparar en cada eje, orden de estas y bajo qué condiciones se van a mostrar (al presionar una tecla o después de determinado tiempo).

```
reload(sys) //
sys.setdefaultencoding('utf8')
def mostrarGraficas(arreglo, labely, labelx):
    plt.plot(arreglo)
    plt.ylabel(labely)
    plt.xlabel(labelx)
    plt.show()
def mostrarGraficasCruzadasTemp(arreglo0, arreglo1, labely, labelx):
    plt.plot(arreglo0, 'r') # plotting t,a separately
    plt.plot(arreglo1, 'b') # plotting t,b separately
    plt.ylabel(labely)
    plt.xlabel(labelx)
    #axes = plt.gca()
    #axes.set_ylim([10, 40])
    plt.show()
def mostrarGraficasCruzadasPres(arreglo0, arreglo1, labely, labelx):
    plt.plot(arreglo0, 'r') # plotting t,a separately
    plt.plot(arreglo1, 'b') # plotting t,b separately
    plt.ylabel(labely)
    plt.xlabel(labelx)
    #axes = plt.gca()
    #axes.set_ylim([1005, 1030])
    plt.show()
def GuardarDatos(entrada_serial):
    print "Leyendo datos..."
    try:
        while True:
            linea_leida = str(entrada_serial.readline()).rstrip()
            print linea_leida
            datos.append(linea_leida)
    except KeyboardInterrupt:
        while len(datos) > 0:
            dato = str(datos.pop(0))
            arreglo_linea = dato.split()
            print arreglo_linea
            if len(arreglo_linea) == 12:
                if arreglo_linea[2] == '0':
                    temp0.append(float(arreglo_linea[5]))
                    pres0.append(float(arreglo_linea[9]))
                if arreglo_linea[2] == '1':
```

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

```
temp1.append(float(arreglo_linea[5]))
pres1.append(float(arreglo_linea[9]))
if len(pres0)>0 and len(pres1)>0:
    vel0.append((((2*(pres0[-1]+15.31-pres1[-1]))/1.225)**.5))
    vel1.append(5)
print "Arreglo de Temperaturas Sensor 1" + str(temp0)
print "Arreglo de Presion Sensor 1" + str(pres0)
print "Arreglo de Temperaturas Sensor 2" + str(temp1)
print "Arreglo de Presion Sensor 2" + str(pres1)
print "Arreglo de Velocidad 1" + str(vel0)
print "Arreglo de Velocidad 2" + str(vel1)
mostrarGraficasCruzadasPres(pres0, pres1, 'Presion mba', 'Venturi Azul vs Ventilador
Rojo')
mostrarGraficasCruzadasTemp(temp0,temp1,'Temperatura C°', 'Venturi Azul vs
Ventilador Rojo')
mostrarGraficasCruzadasPres(vel0,vel1,'Velocidad m/s','Venturi Azul vs Ventilador
Rojo')
#mostrarGraficas(temp0,'Temperatura C°', 'Sensor 1')
mostrarGraficas(pres0,'Presion mbar', 'Sensor 1')
#mostrarGraficas(temp1,'Temperatura C°', 'Sensor 2')
mostrarGraficas(pres1,'Presion mbar', 'Sensor2')
#sys.exit(0)
```

Establecimiento de conexión entre el Arduino y Python, se indica el puerto de conexión usb, y si existe o no la misma, se define el comando de inicio de “si se desea empezar a recibir datos”, en conjunto con el mensaje de error en caso de perderse o no haber conexión.

```
try:
    print "Inicializando Sensores...\n"
    time.sleep(5)
    ser = serial.Serial('/dev/ttyACM1', 9600)
    print "Dispositivos Inicializados Correctamente!\n"
    time.sleep(3)
    print "Arduino Original ONE con Sensor BMP180\n"
    print "Conexión establecida a 9600 Baudios\n"
    print "Puerto enlazado --> ttyACM1.\n"
    respuesta = ""
    while respuesta != "S" or respuesta != "N":
        respuesta = raw_input("¿Deseas empezar a recibir los datos del sensor S/N?\n").upper()
        if respuesta.upper() == "S":
            GuardarDatos(ser)
        elif respuesta.upper() == "N":
            print "Esta bien, nos vemos!"
```

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

```
        break
    else:
        print "Respuesta Invalida.\n"
except Exception, e:
    print e
    print "Error desconocido de conexión."
```

Anexo E: Desarrollo del modelo matemático en Matlab

Desarrollo del perfil de la tobera

```
clc
clear
x = 0:0.01:11
h=3.475*(-((10/1331)*x.^3)+((15/14641)*x.^4)-((6/161051)*x.^5))+5.19
plot(x,h,'-b')
title('PERFIL DE LA TOBERA')
xlabel('Longitud de la tobera (metros)')
ylabel('Radio hidráulico de la tobera (metros)')
grid on
```

Cálculo de pérdidas en los ductos

Codos pequeños

```
Clear, clc
load('tablasaire.mat');
%Datos
T=22; Vel=300; Vc=tablasA(:,4); Tc=tablasA(:,1); Vci=lagrange(Tc,Vc,T); k=Rugosidad(7,1);
%Dimensiones de la sección del codo.
b=6.52; h=5.52; angulo=90;
%Radio de codo.
R=9;
%Radio diámetro hidráulico del codo.
D=(2*h*b)/(h+b);
%factor A
A = 1;
%Número de Reynolds
Re=(Vel*D)/Vci
%factor B
if R/b<1
    B=0.21/((R/b)^(2.5));
else
    if R/b>=1
```

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

```
B=0.21/((R/b)^0.5);
end
end
%factor C
C = 0.85 + 0.125/(h/b);
%Factor de fricción
f = 1;
j = 1;
tol=1e-5;
while j == 1
    g = (-2*log(k/3.7/D + 2.51/Re/sqrt(f)))^(-2)
    R = abs(f-g);
    if R < tol
        break
    end
    f=g;
end
F=g
%Cálculo de pérdidas
Klocal = A*B*C;
Kf = (0.0175*F*R*angulo)/D
%Perdidas
K = Klocal + Kf
```

Codos grandes

```
clear, clc
load('tablasaire.mat');
%Datos de la sección
T=22;
Vel=300;
Vc=tablasA(:,4);
Tc=tablasA(:,1);
Vci=lagrange(Tc,Vc,T);
k=Rugosidad(7,1);
b=10.9;
h=9.9;
angulo=90;
%Radio del codo grande
R=15;
%Diámetro Hidráulico del codo grande
D=(2*h*b)/(h+b);
%factor A
A = 1;
%Número de Reynolds
Re=(Vel*D)/Vci;
```

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

```
%factor B
if R/b<1
    B=0.21/((R/b)^(2.5));
else
    if R/b>=1
        B=0.21/((R/b)^0.5);
    end
end
%factor C
C = 0.85 + 0.125/(h/b);
%Factor de fricción
f = 1;
j = 1;
tol=1e-5;
while j == 1
    g = (-2*log(k/3.7/D + 2.51/Re/sqrt(f)))^(-2);
    R = abs(f-g);
    if R < tol
        break
    end
    f=g;
end
F=g;
%cálculo de las pérdidas
Klocal = A*B*C;
Kf = (0.0175*F*R*angulo)/D;
%Cálculo de Pérdidas
K = Klocal + Kf
```

Primer difusor

```
clear
clc
load('tablasaire.mat');
%Datos de la sección
T=22;
Vel=300;
Vc=tablasA(:,4);
Tc=tablasA(:,1);
Vci=lagrange(Tc,Vc,T);
k=Rugosidad(7,1);
%dimensiones de entrada
h=3;
b=4;
%dimensiones de salida
```

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

h1=5.52;

b1=6.52;

% Longitud de difusor

L=25;

% relación de área

Ar=(b*h)/(b1/h1);

% Diámetro hidráulico

D=(2*h*b)/(h+b);

% Número de Reynolds

Re=(Vel*D)/Vci;

% factor de fricción

f = 1;

j = 1;

tol=1e-5;

while j == 1

g = (-2*log(k/3.7/D + 2.51/Re/sqrt(f)))^(-2);

R = abs(f-g);

if R < tol

break

end

f=g;

end

F=g;

% Operación de pérdidas

theta = atan(0.5*(sqrt(Ar)-1)/(L/D));

Kf = (1-1/Ar^2)*F/8/sin(theta);

Ke = 0.122-0.0459*theta+0.02203*theta^2+0.003269*theta^3-0.0006145*theta^4-
0.000028*theta^5+0.00002337*theta^6;

Kex = Ke*(1-1/Ar)^2;

K = Kf + Kex

Segundo difusor

clear, clc

load('tablasaire.mat');

% Datos de la sección

T=22;

Vel=300;

Vc=tablasA(:,4);

Tc=tablasA(:,1);

Vci=lagrange(Tc,Vc,T);

k=Rugosidad(7,1);

% dimensiones de entrada

h=5.52;

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

```
b=6.52;
%dimensiones de salida
h1=9.9;
b1=10.9;

%Longitud de difusor
L=47.2;

%relación de área
Ar=(b*h)/(b1/h1);
%Diámetro hidráulico

D=(2*h*b)/(h+b);
%Número de Reynolds
Re=(Vel*D)/Vci;

%factor de fricción
f = 1;
j = 1;
tol=1e-5;
while j == 1
    g = (-2*log(k/3.7/D + 2.51/Re/sqrt(f)))^(-2);
    R = abs(f-g);
    if R < tol
        break
    end
    f=g;
end
F=g;
%Operación de pérdidas
theta = atan(0.5*(sqrt(Ar)-1)/(L/D));
Kf = (1-1/Ar^2)*F/8/sin(theta);
Ke =0.122-0.0459*theta+0.02203*theta^2+0.003269*theta^3-0.0006145*theta^4-
0.000028*theta^5+0.00002337*theta^6;
Kex = Ke*(1-1/Ar)^2;
K = Kf + Kex
```

Cámara de estabilización

```
clear, clc
load('tablasaire.mat');
%Datos de la sección
T=22;
Vel=300;
```

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

```
Vc=tablasA(:,4);
Tc=tablasA(:,1);
Vci=lagrange(Tc,Vc,T);
k=Rugosidad(3,1);
% L: Longitud de la celda en la dirección del flujo.
L=1.2;
% D: Diámetro hidráulico de la celda.
D=0.2;
% e: Espesor del material.
e=0.06;
% Re: Reynolds basado en el espesor del material.
Re=(Vel*D)/Vci;
% Porosidad (bet).
bet=1053;
if Re > 275
lambd = 0.214*((e/D)^0.4);
else
lambd = 0.375*(e/D)^0.4*Re^(-0.1);
end
K = lambd*(L/D + 3)*(1/bet)^2 + (1/bet - 1)^2
```

Tobera

```
clear, clc
load('tablasaire.mat');
%Datos de la seccion
T=22;
Vel=300;
Vc=tablasA(:,4);
Tc=tablasA(:,1);
Vci=lagrange(Tc,Vc,T);
k=Rugosidad(7,1);
%dimensiones de la cámara de ensayos
h=3;
b=4;
%dimensiones de la entrada de contracción
h1=9.9;
b1=10.9;
%Longitud de la tobera
L=11;
%Diámetro hidráulico Cámara de ensayos
Dt=(2*h*b)/(h+b);
% Ren: Reynolds cámara de ensayos.
Ret=(Vel*Dt)/Vci
%Diámetro hidráulico entrada del inyector
```

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

```
Dn=(2*h1*b1)/(h1+b1);
% Ret: Reynolds de la entrada del inyector.
Ren=(Vel*Dn)/Vci;
% factor de fricción
f = 1;
j = 1;
tol=1e-5;
while j == 1
    g = (-2*log(k/3.7/Dt + 2.51/Ret/sqrt(f)))^(-2)
    R = abs(f-g);
    if R < tol
        break
    end
    f=g;
end
F=g;
% Operación para el cálculo de las pérdidas
K=0.32*F*(L/Dt)
```

Ductos rectos

```
clear, clc
load('tablasaire.mat');
%Datos de la sección
T=22;
Vel=300;
Vc=tablasA(:,4);
Tc=tablasA(:,1);
Vci=lagrange(Tc,Vc,T);
k=Rugosidad(7,1);
%dimensiones del ducto
h=5.52;
b=6.52;
%diámetro hidráulico del ducto
D=(2*h*b)/(h+b);
% longitud del ducto
L=12;
%Número de Reynolds
Re=(Vel*D)/Vci;
%factor de fricción
f = 1; % Valor de partida
j = 1;
tol=1e-5;
while j == 1
    g = (-2*log(k/3.7/D + 2.51/Re/sqrt(f)))^(-2);
```

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

```
R = abs(f-g);  
if R < tol  
    break  
end  
f=g;  
end  
F=g;  
%Cálculo de pérdidas  
K = F*L/D
```


Barometric Pressure Sensor Vaisala PTB110 S32100 / S32200 / S32300
Specifications

Operating range	
Operating pressure	S32100: 800 ... 1100 hPa (mbar) S32200: 600 ... 1100 hPa (mbar) S32300: 500 ... 1100 hPa (mbar)
Temperature range	-40 ... +60 °C
Humidity range	non-condensing
Electrical data	
Output voltage	0 ... 5 VDC
Supply voltage	10 ... 30 VDC
Current consumption	< 4 mA
Accuracy	
Total accuracy	±0.3 hPa (+15 ... +25 °C) ±0.6 hPa (0 ... +40 °C) ±1.0 hPa (-20 ... +45 °C) ±1.5 hPa (-40 ... +60 °C)
Repeatability	±0.03 hPa
Long term stability	±0.1 hPa/year
Resolution	0.1 hPa
General	
Dimensions	Length 72 mm, diameter 22 mm
Weight	90 g
Connection	Screw terminal plug (5-pole plug)
Housing	ABS / PC lend
Housing classification	IP 32
Manufacturer	Vaisala

Barometric Pressure Sensor Vaisala PTB110 S32100 / S32200 / S32300

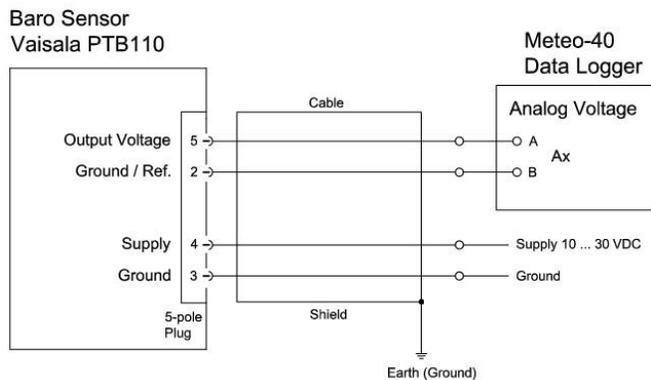
Sensor Connection to Ammonit Meteo-40 Data Logger

Sensor	Plug Pin No.	Ammonit Cable Wire Colour	Meteo-40 Analog Voltage	Supply Sensor
Air Pressure Output Voltage	5	white	A	
Analog Ground	2	blue	B	
Supply	Pin 4	red		10 ... 30 VDC
Ground	Pin 3	black		Main Ground

Connect the shield logger-sided to Ground [GND]

Cable type: LiYCY 4 x 0.25 mm²

Sensor connection diagram to Ammonit Meteo-40 data logger



Anexo G: Medidor de Flujo másico

Eldridge Products, Inc.

Gas Mass Flow Measurement & Control Instrumentation



Master-Touch™



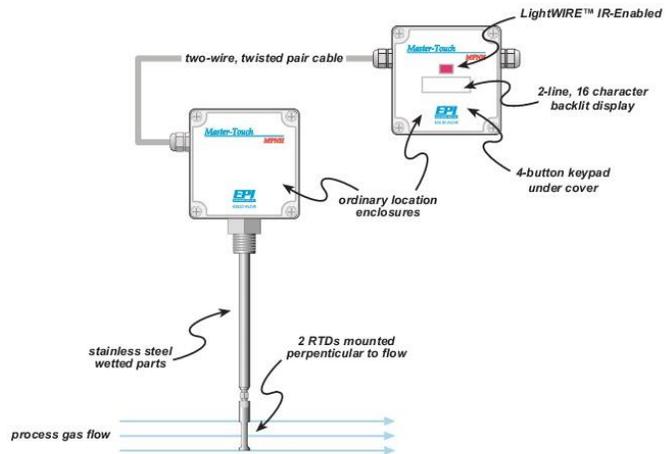
Series 8200MPNH Flowmeters



DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

Eldridge Products' proprietary thermal mass flow sensors use two ratiometrically-matched, reference-grade platinum Resistance Temperature Detectors (RTDs). The platinum sensing element wire is wound on a ceramic base, given a thin protective glass coating, and encapsulated in a 316 Stainless Steel sheath or, if specified, a Hastelloy C sheath. The sensor assembly is large, rugged, and relatively insensitive to dirt buildup.

A forced null Wheatstone Bridge preferentially heats one RTD. The second RTD acts as a temperature reference by taking on the temperature of the flowing gas. The resistance ratios are maintained through the Wheatstone Bridge to compensate for the dynamic changes in process temperature. By maintaining a constant temperature difference between the RTDs, EPI can measure the amount of heat dissipated by the flowing gas. As heat is dissipated, more power is used to maintain the constant temperature. The power demand is directly proportional to the gas mass flow rate, allowing our sensors to measure the gas molecular rate of flow without further compensation for outside effects. EPI's standard flow sensors can respond to flow velocities as low as 15 feet per minute and as high as 45,000 feet per minute for most gases. Consult our factory or a local sales representative for details.



INSERTION style thermal mass flowmeters include a sensor probe assembly that is inserted into the process gas flow conduit to allow the process gas to flow across the flow sensing elements. Our insertion style flowmeters are available with 1/2", 3/4", or 1" OD probes and may be installed with pipe fitting connections or user-supplied bored through tube fittings. Tube fittings and ball valve retractor assemblies, with or without a mounting flange, are also available from the factory as options. The tube length must be specified upon ordering. Standard lengths range from a minimum of 6' to a maximum of 36'. For other probe diameters and lengths, please consult the factory.

REMOTE style thermal mass flowmeters utilize two enclosures. One enclosure is mounted at the point of measurement — on the flow section or on the probe assembly. This enclosure is rated for ordinary, non-hazardous environments. The second (remote) enclosure is usually placed in a readily accessible location rated for non-hazardous conditions. The remote enclosure includes the all of the electrical connections as well as the linearizing electronics and the display/keypad assembly. Only a two-wire, twisted-pair cable is required to carry the input power and flow signal between the two enclosures.



TYPICAL APPLICATIONS FOR MASTER-TOUCH™ FLOWMETERS:

AUTOMOTIVE INDUSTRY Compressed Air monitoring * Natural Gas consumption * Powder paint air flow * Paint booth/paint oven ventilation

UTILITY SERVICES Stack or Flue Gas * Wastewater aeration * Ventilation systems * Digester Gas * Gas flows * Nitrogen purge * Combustion air * Boiler inlet air

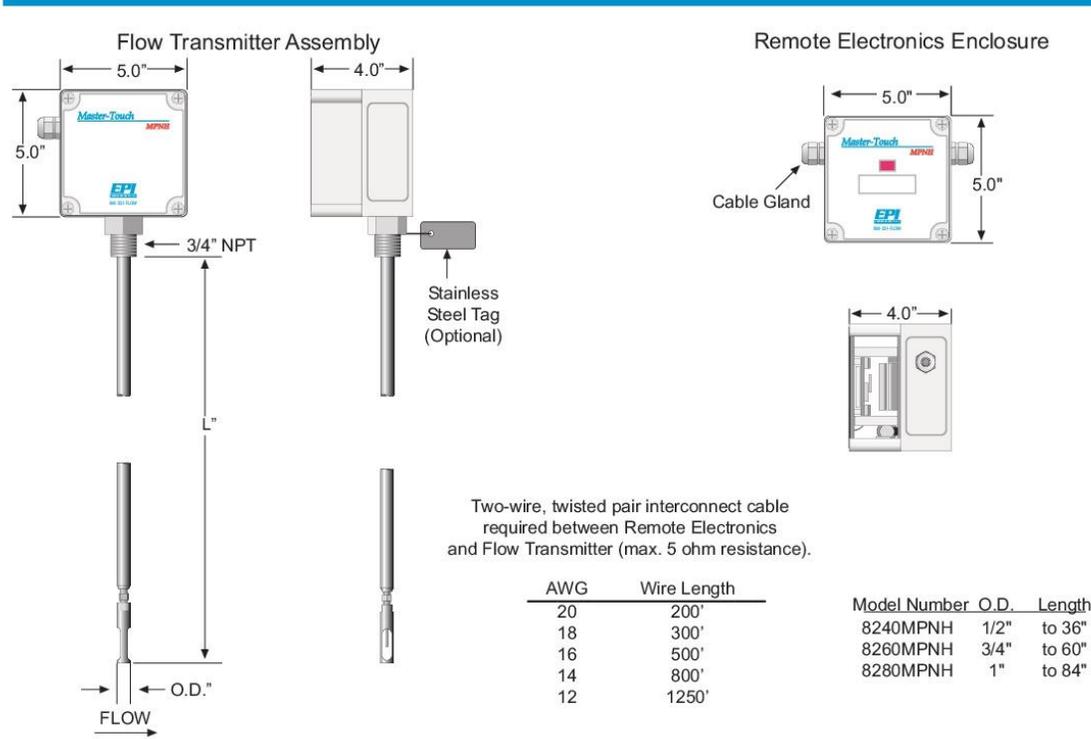
FOOD PROCESSING Drying air * Ventilation systems * Boiler inlet air * Exhaust gas * Process control * Compressor lines * HVAC Air balancing * Duct flows * Energy conservation * Fume hoods * Cleanrooms * Laminar flow benches

LABORATORY AND R & D Flow research * Biomedical studies * University studies * Toxicology studies * Energy studies * Industrial Hygiene * Occupational Safety * Experimentation

PETROLEUM & GAS INDUSTRIES Custody transfer * Landfill Gas recovery * Flare Gas measurement * Gas mixing * Gas quality studies * Leak testing

RAW MATERIALS INDUSTRIES Pulp & Paper mills * Mining * Semiconductor manufacturing * Chemical processing * Primary metals * Plastics & synthetics

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO



SPECIFICATIONS

Linear signal output	0-5 VDC & 4-20 mA
Signal Interface	RS232 & RS485
Accuracy, including linearity (Ref.: 21°C)*	±[1% of Reading + (.5% + .02%/°C of Full Scale)]
Repeatability	±0.2% of Full Scale
Sensor response time	1 second
Turn down ratio	100:1 minimum
Electronics temperature range	-40°-85°C (-40°-185°F)
Gas temperature range**	-40°-200°C (-40°-392°F), extended range available
Gas pressure effect	Negligible over ± 20% of absolute calibration pressure
Pressure rating maximum	500 PSI Std., > 500 PSI special
Input power requirement	24VDC @ 250mA 115 VAC 50/60 Hz optional 230 VAC 50/60 Hz optional
Flow Transmitter power requirements	5 watts maximum
Flow Transmitter enclosure	NEMA 4X, ABS plastic with clear polycarbonate cover, 5' x 5' x 4'
Signal Processor enclosure	NEMA 4X, ABS plastic with opaque cover, 5' x 5' x 4'
Wetted materials	316 Stainless Steel (Hastelloy optional)
Standard temperature & pressure (STP)	70°F & 29.92" Hg (Air .075 lb./cubic foot)
NIST traceable calibration	Standard

APPROVALS

MPNH Series for use in Ordinary (Non-Hazardous) area locations: Type 4X, IP66

* The accuracy specification applies to the instrument only. EPI is not responsible for measurement errors due to flow profile irregularities caused by installation piping configurations, corrosion on inner pipe surfaces, valve placement, etc.

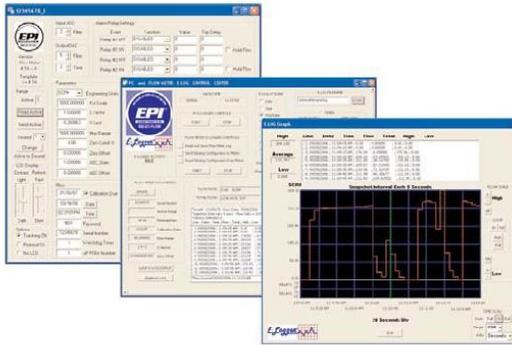
**SSM option required for 66°-200°C (150°-392°F)

ACCESSORIES



LightWIRE™

The LightWIRE™ Communicator I modules transmit and receive signals from LightWIREIR-Enabled flowmeters. When connected to a RS232 or USB port on a PC or laptop running EPI Communicator software, the LightWIRE Communicator I module replaces the three-wire cable for communications with an IR-Enabled Master-Touch™ flowmeter. The LightWIRE Communicator II hand-held module is a substitute for the keypad/display assembly of IR-Enabled Master-Touch™ flowmeters. Access all of the flowmeters functions without removing the flowmeter's enclosure cover with the Communicator II module.



E-Logger™

The E-Logger™ module of the free EPICommunicator™ software is a fully functional, PC-based data logger that works in conjunction with Master-Touch™ flowmeters which have v4.1A or higher software. The user can select from a set of categories for the data collection, the time interval for each data 'snapshot' and, if necessary, programmed start and stop times. The data is stored on either the flowmeter or a PC. E-Logger will also graph the data, and it provides tools for analysis of the data. Data files stored on a PC can be accessed by most common spreadsheet applications.

LIMITED WARRANTY

Eldridge Products, Inc. (EPI) warrants its products to be free from defects in materials and workmanship for one year from the date of factory shipment. If there is a defect, the purchaser must notify EPI of the defect within the warranty period. Upon receipt of the defective product, EPI will either repair or replace the defective product at its sole option and at no cost to the purchaser. EPI MAKES NO OTHER WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, AS TO THE PRODUCTS. EPI MAKES NO WARRANTY THAT THE GOODS SOLD TO ANY PURCHASER ARE FIT FOR ANY PARTICULAR PURPOSE. FURTHERMORE, EPI MAKES NO WARRANTY OF MERCHANTABILITY WITH RESPECT TO ANY PRODUCTS SOLD TO ANY PURCHASERS. There are no other warranties that extend beyond the description on any brochure or price quote.

LIMITED ACCEPTANCE

Acceptance of any offer is limited to its terms. Acceptances or confirmations that state additional or differing terms from this price quote shall be operative as acceptances, but all additional or differing terms shall be deemed material alterations within the meaning of Commercial Code Section 2207(2)(b), and notice of objection to them pursuant to Commercial Code Section 2207(2)(c) is hereby given. The laws of the State of California govern this contract and venue is Monterey County. Risk of loss passes F.O.B. EPI factory. Payment due in full in US Dollars within credit terms granted from factory shipment. Additional fees shall include interest on unpaid balances that are outstanding for more than granted credit terms, plus all collection costs and attorneys' fees incurred in collecting any outstanding balance. Any and all additional or differing terms do not become part of the contract between EPI and any purchaser. The terms of any offer are expressly limited to the terms detailed in any product brochure or price quote. Any modification to any of the terms of this offer must be in writing and must be signed by an officer of EPI.



Eldridge Products, Inc.

Anexo H: Medidor de Flujo másico

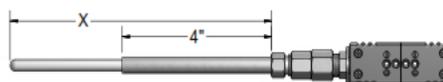
INDUSTRIAL Configuration Code ID10
High-Temperature Thermocouple Assemblies

Pyromation's high-temperature thermocouples are designed to operate in a temperature range of (982 to 1871) °C [1800 to 3400] °F. They are designed for use in vacuum furnaces and other applications requiring high-temperature measurement in controlled atmospheric conditions. Metal sheaths of Alloy 600 and molybdenum are available as well as alumina ceramic sheaths. All assemblies are supplied with ungrounded, isolated hot junctions. The construction style consists of an alumina-insulated element inside the tube of choice as listed below. Special construction designs are also available.

METAL-SHEATHED ASSEMBLY



ALUMINA-SHEATHED ASSEMBLY



ORDER CODES

Example Order Number: **1** **2** **3** **4** **5** **6** **7**
R24U - 403 - 24 - 05A - TBL. 5 - TBL. 6 - TBL. 7
 Select from following page

1 Single Elements

TYPE AND WIRE GAUGE		CODE	SHEATH DIA. (inches)	MAX. TEMP.	ATMOSPHERE
ALLOY 600		ALLOY 600			
B24U		303	0.188	1149 °C [2100 °F]	Oxidizing, Inert or Vacuum
C24U		303	0.188		
R24U	R26U	303	0.188		
S24U	S26U	303	0.188		
B24U		403	0.250	1149 °C [2100 °F]	Oxidizing, Inert or Vacuum
C24U		403	0.250		
R24U	R26U	403	0.250		
S24U	S26U	403	0.250		
MOLYBDENUM		MOLYBDENUM			
B24U		302	0.188	1704 °C [3100 °F]	Inert or Vacuum
C24U		302	0.188	1871 °C [3400 °F]	
R24U	R26U	302	0.188	1482 °C [2700 °F]	
S24U	S26U	302	0.188	1482 °C [2700 °F]	
B24U		402	0.250	1704 °C [3100 °F]	Inert or Vacuum
C24U		402	0.250	1871 °C [3400 °F]	
R24U	R26U	402	0.250	1482 °C [2700 °F]	
S24U	S26U	402	0.250	1482 °C [2700 °F]	
ALUMINA		ALUMINA			
B24U		617	0.275 ⁽¹⁾	1704 °C [3100 °F]	Oxidizing, Inert or Vacuum
C24U		617	0.275 ⁽¹⁾	1871 °C [3400 °F]	
R24U	R26U	617	0.275 ⁽¹⁾	1482 °C [2700 °F]	
S24U	S26U	617	0.275 ⁽¹⁾	1482 °C [2700 °F]	
For duplex elements use order code pre-fix letter twice. Example: RR24U		[1] Sheath supplied with 3/8" O.D. x 4" long stainless steel sleeve on tube cold end. Only available with size B and C compression fittings.			
CC24 assemblies not available in 0.188" O.D. sheath diameter.		Consult factory for availability of other diameters or insulations.			

4 Sheath Mounting Fittings

CODE	TYPE	NPT SIZE (inches)	AVAILABLE SHEATH DIA. (inches)
00	No sheath mounting fitting		
One-Time Adjustable Compression Fittings			
05A	Stainless steel	1/8	3/16, 1/4
05B	Stainless steel	1/4	3/16, 1/4, 3/8
05C	Stainless steel	1/2	1/4, 3/8
Re-Adjustable Compression Fittings			
12A	Stainless steel	1/8	3/16, 1/4
12B	Stainless steel	1/4	1/4, 3/8
12C	Stainless steel	1/2	1/4, 3/8
Teflon® gland standard (400 °F max.)			

3 Sheath "X" Length

LENGTH (inches)	LENGTH (inches)
12	30
18	36
24	
Specify other lengths in 1" increments.	

All assemblies are provided with wire seal fitting except platinum element assemblies in Alloy protection tubes.

All C24 assemblies in alumina protection tubes can only be used in inert or vacuum atmospheres.

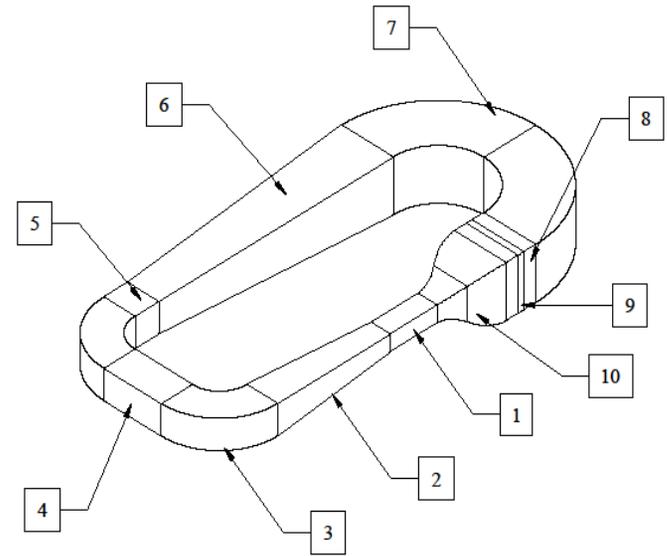
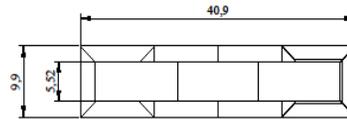
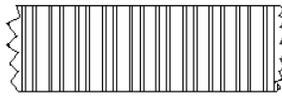
Teflon® is a registered trademark of E. I. du Pont de Nemours and Company.

Anexo I: Planos del túnel de viento

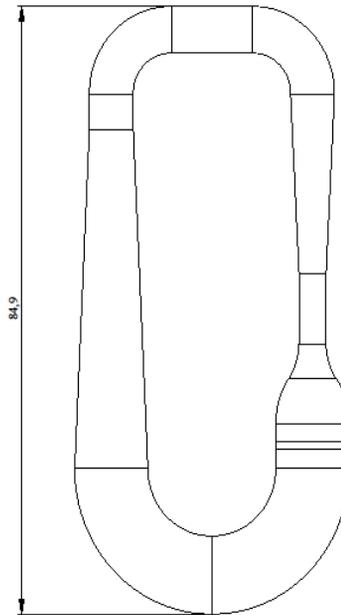
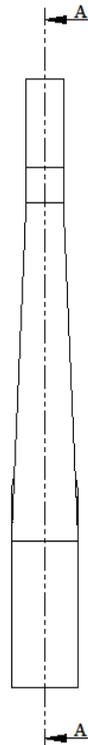
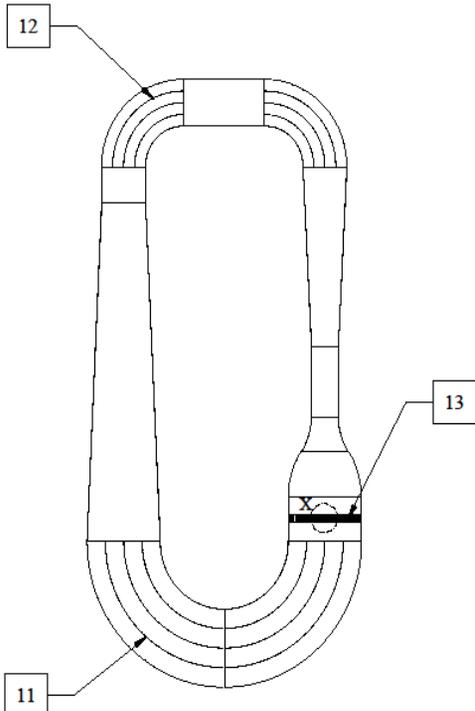
1 2 3 4 5 6 7 8

A
B
C
D
E
F

DETALLE X
ESCALA 1:50



CORTE A-A



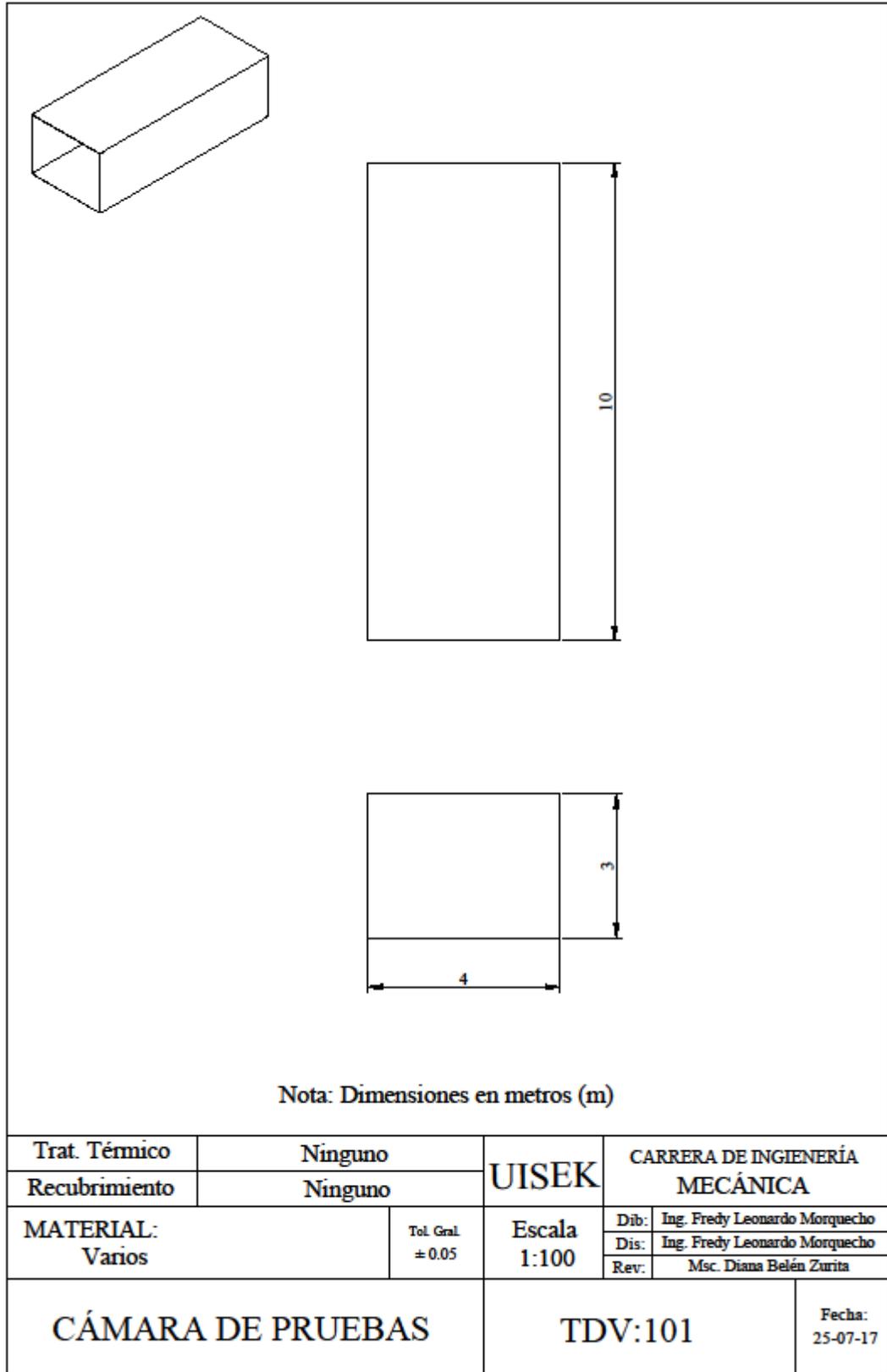
ESPECIFICACIONES	
1 PESO APROXIMADO	NA
2 DIMENSIONES GENERALES	84.9-40.9-9.9 m
3 CAPACIDAD	250 a 300 Km/h

Nota: Dimensiones en metros (m)

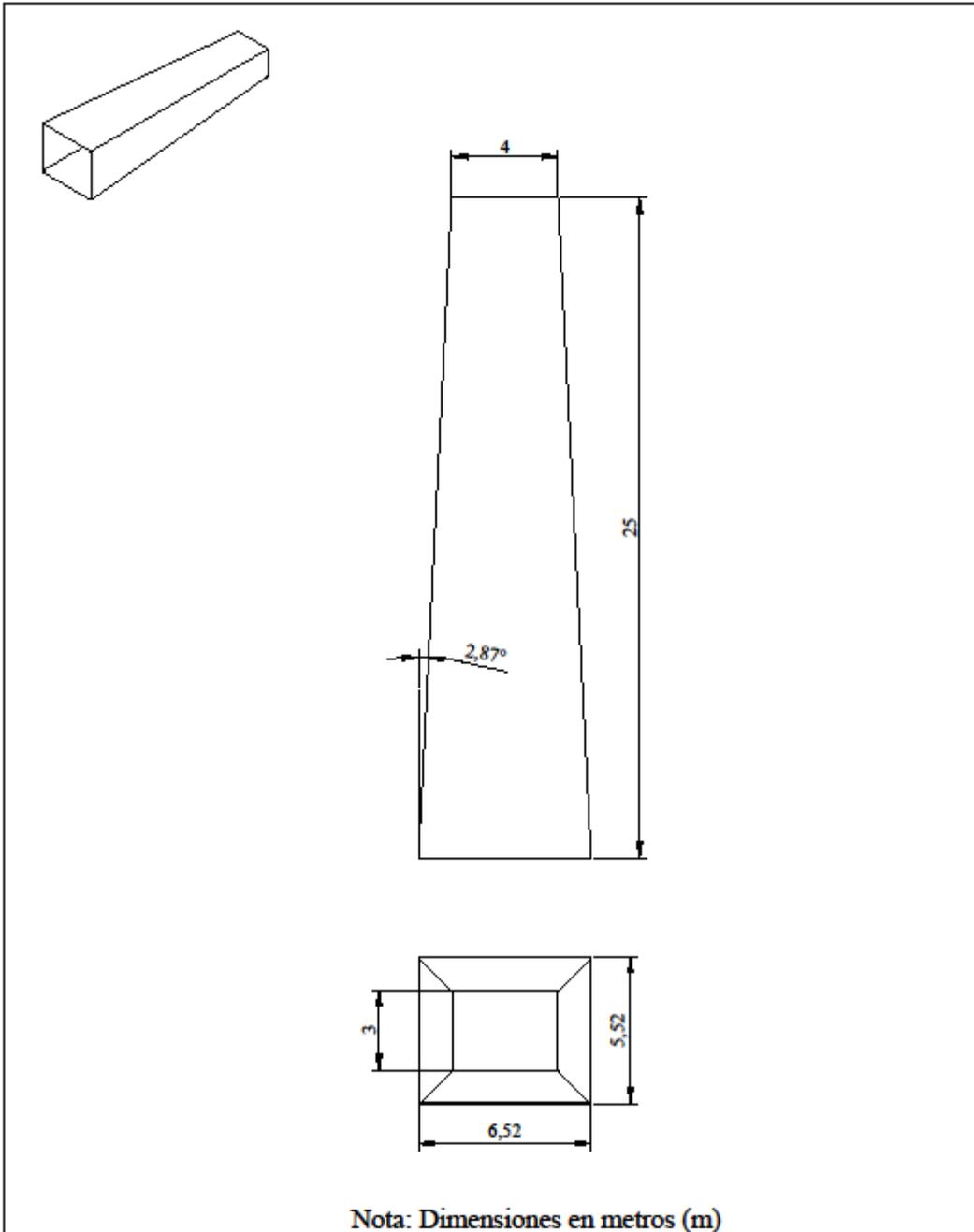
Nº	ZONA	DENOMINACIÓN	PLANO Y / O NORMA	CANT.	MATERIAL	OBSERVACIÓN
13	E-2	Panel de la Cámara E.	TDV:111	1	Acero	NA
12	C-1	Álabes directores Codos P.	NA	3	Acero	NA
11	E-1	Álabes directores Codos G.	NA	3	Acero	NA
10	B-8	Tobera o inyector	TDV:110	1	Acero	NA
9	B-8	Cámara de estabilización	TDV:109	1	Acero	NA
8	B-8	Ductos de separación	TDV:108	2	Acero	NA
7	B-8	Codos grandes	TDV:107	2	Acero	NA
6	B-7	Segundo difusor	TDV:106	1	Acero	NA
5	B-6	Cámara del ventilador	TDV:105	1	Concreto	NA
4	C-6	Ducto recto pequeño	TDV:104	1	Acero	NA
3	C-6	Codos pequeños	TDV:103	2	Acero	NA
2	C-7	Primer difusor	TDV:102	1	Acero	NA
1	B-7	Cámara de pruebas	TDV:101	1	Varios	NA

UISEK	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	Dib: Ing. Fredy Leonardo Morquecho	Escala: 1:500
		Dis: Ing. Fredy Leonardo Morquecho	
		Rev: Msc. Diana Belén Zurita	
TÚNEL DE VIENTO		TDV:001	Fecha: 25-07-17

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO



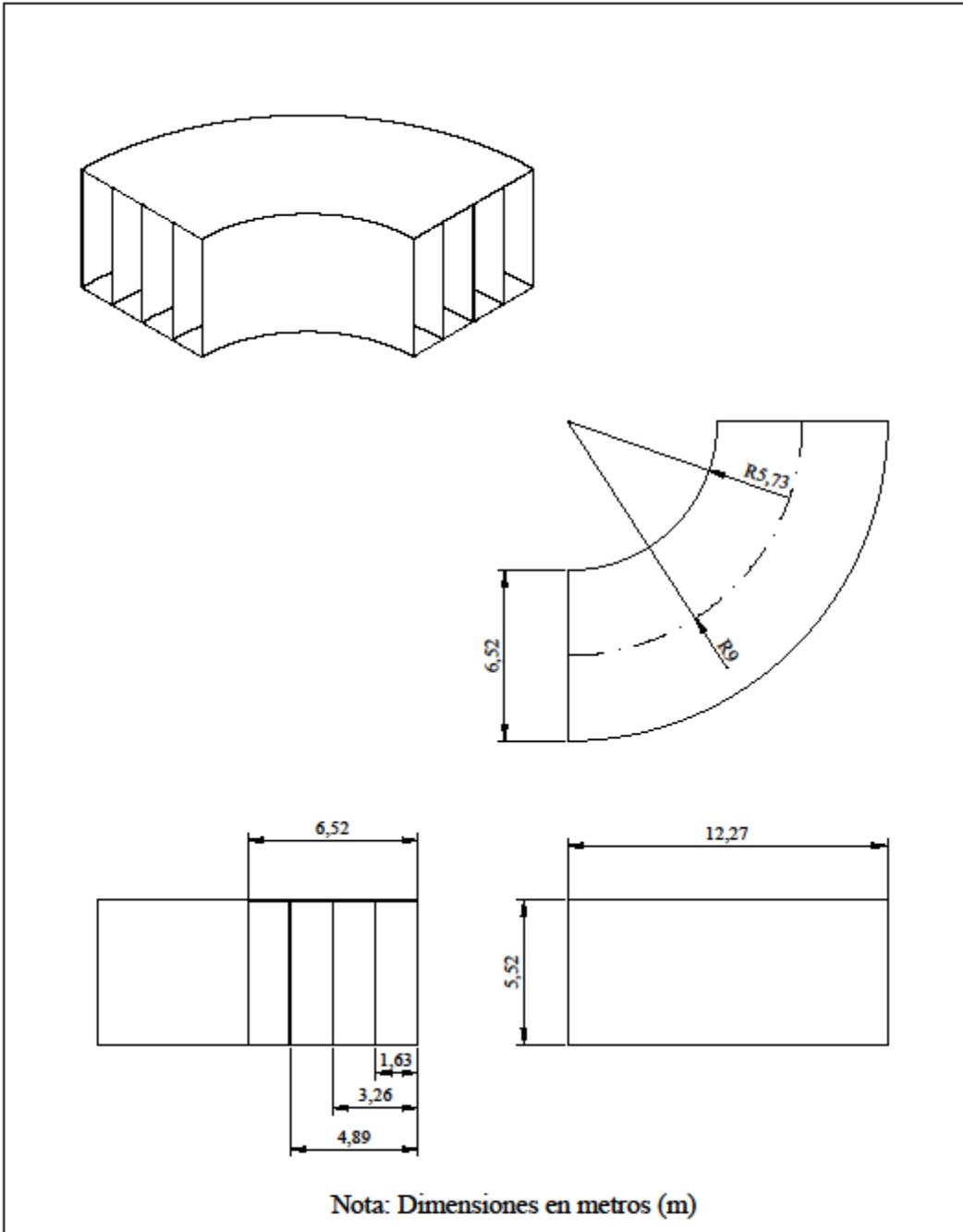
DISEÑO TÚNEL DE VIENTO



Nota: Dimensiones en metros (m)

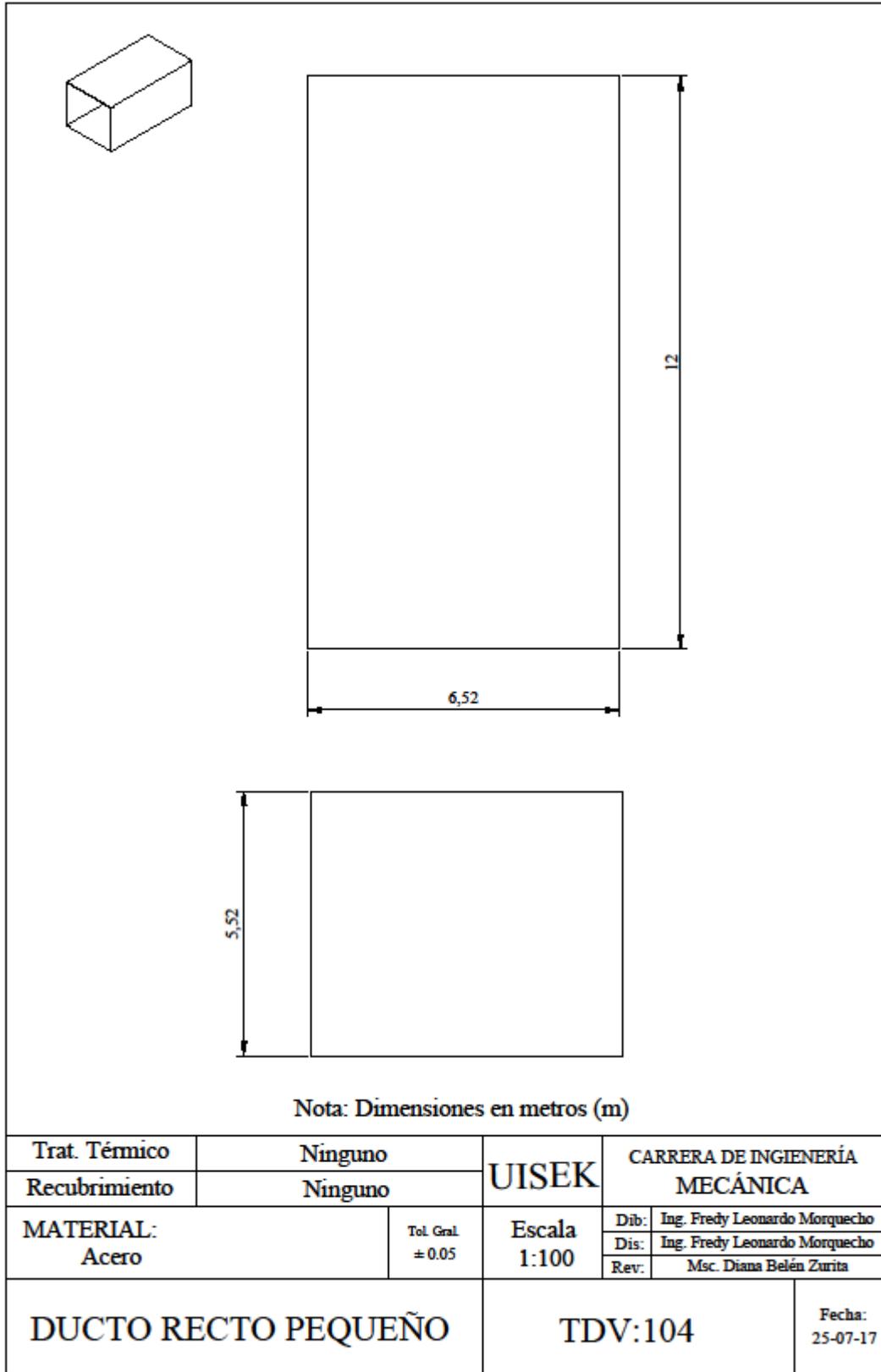
Trat. Térmico	Ninguno	UISEK	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento	Ninguno		Dib:	Ing. Fredy Leonardo Morquecho
MATERIAL: Acero	Tol. Gral. ± 0.05	Escala 1:200	Dis:	Ing. Fredy Leonardo Morquecho
			Rev:	Msc. Diana Belén Zurita
			PRIMER DIFUSOR	
		TDV:102	Fecha: 25-07-17	

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

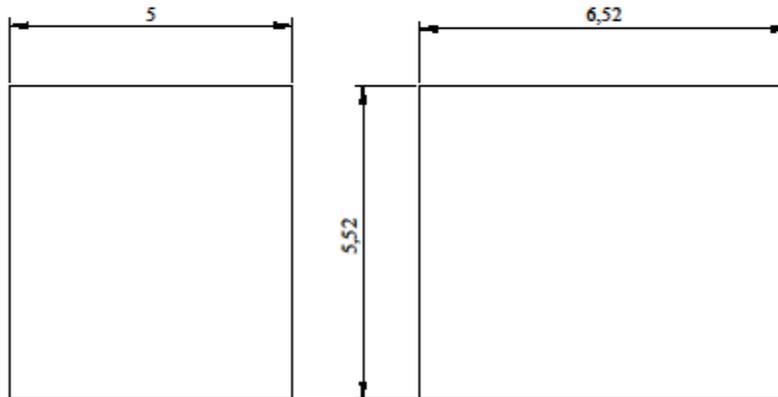
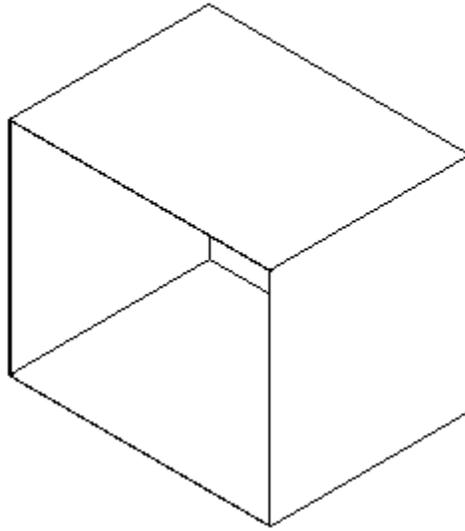


Trat. Térmico	Ninguno	UISEK	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento	Ninguno		Dib:	Ing. Fredy Leonardo Morquecho
MATERIAL: Acero	Tol. Gen. ± 0.05	Escala 1:200	Dis:	Ing. Fredy Leonardo Morquecho
			Rev:	Msc. Diana Belén Zurita
CODOS PEQUEÑOS		TDV:103		Fecha: 25-07-17

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO



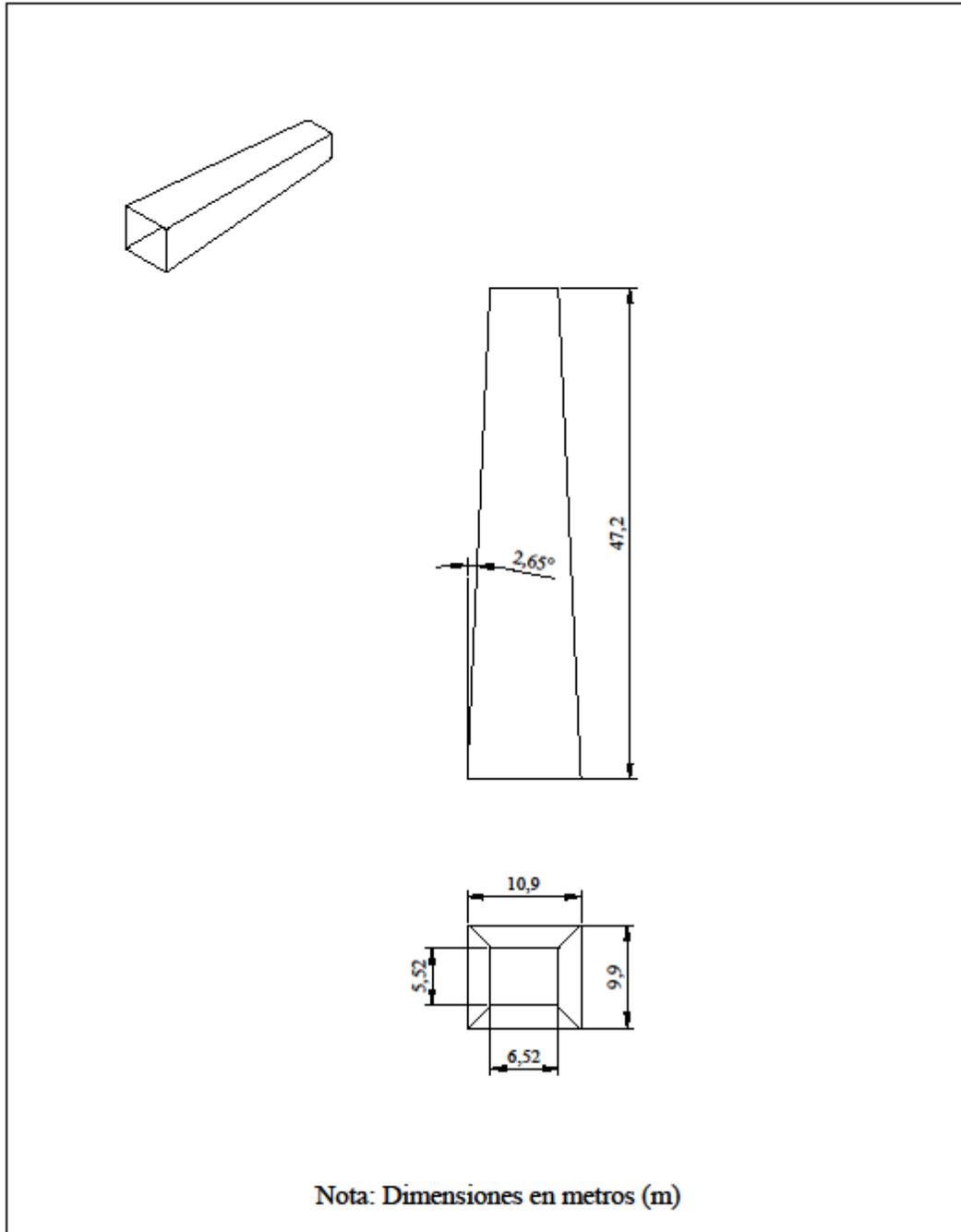
DISEÑO TÚNEL DE VIENTO



Nota: Dimensiones en metros (m)

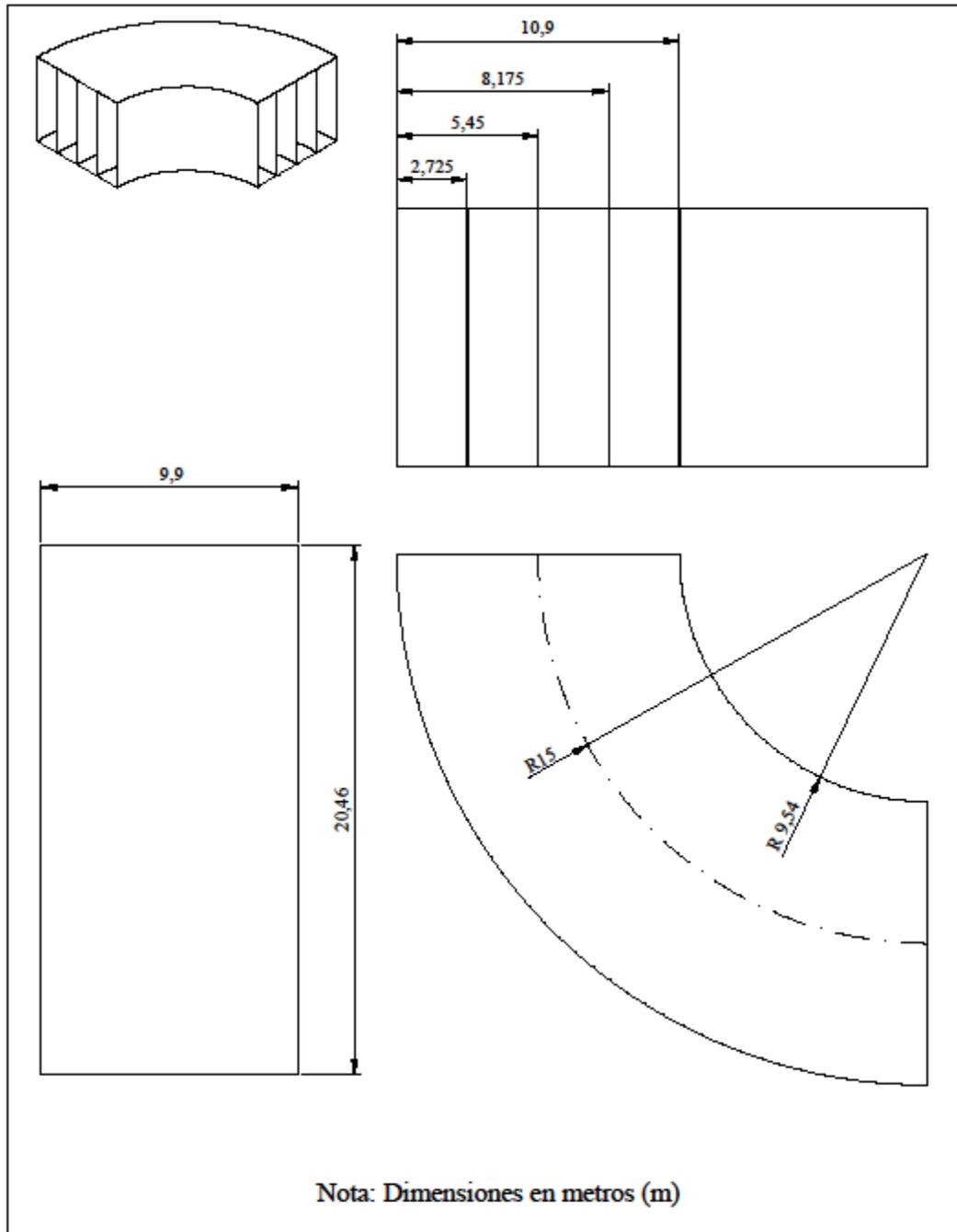
Trat. Térmico	Ninguno	UISEK	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA		
Recubrimiento	Ninguno		Dib:	Ing. Fredy Leonardo Morquecho	
MATERIAL: Hormigón Armado		Tol. Gral. ± 0.05	Escala 1:100	Dis:	Ing. Fredy Leonardo Morquecho
				Rev:	Msc. Diana Belén Zurita
CÁMARA DEL VENTILADOR			TDV:105		Fecha: 25-07-17

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO



Trat. Térmico	Ninguno	UISEK	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento	Ninguno		Dib:	Ing. Fredy Leonardo Morquecho
MATERIAL: Acero	Tol. Gal. ± 0.05	Escala 1:500	Dis:	Ing. Fredy Leonardo Morquecho
			Rev:	Msc. Diana Belén Zurita
SEGUNDO DIFUSOR		TDV:106		Fecha: 25-07-17

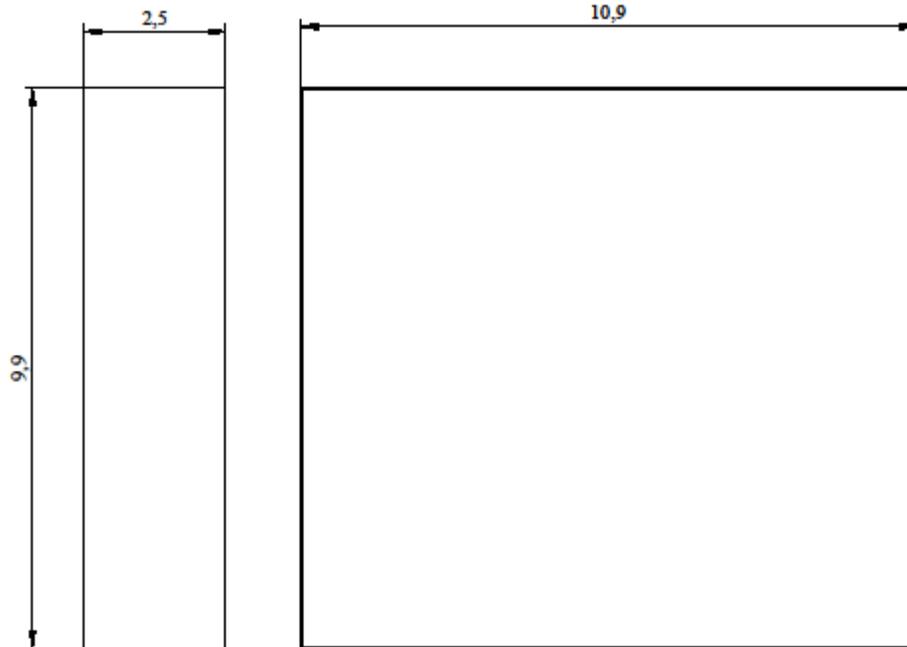
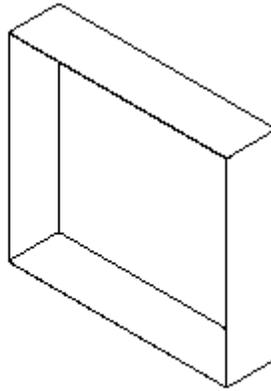
DISEÑO TÚNEL DE VIENTO



Nota: Dimensiones en metros (m)

Trat. Térmico	Ninguno	UISEK	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA		
Recubrimiento	Ninguno		Dib:	Ing. Fredy Leonardo Morquecho	
MATERIAL: Acero		Tol. Gen. ± 0.05	Escala 1:200	Dis:	Ing. Fredy Leonardo Morquecho
				Rev:	Msc. Diana Belén Zurita
CODOS GRANDES		TDV:107		Fecha:	25-07-17

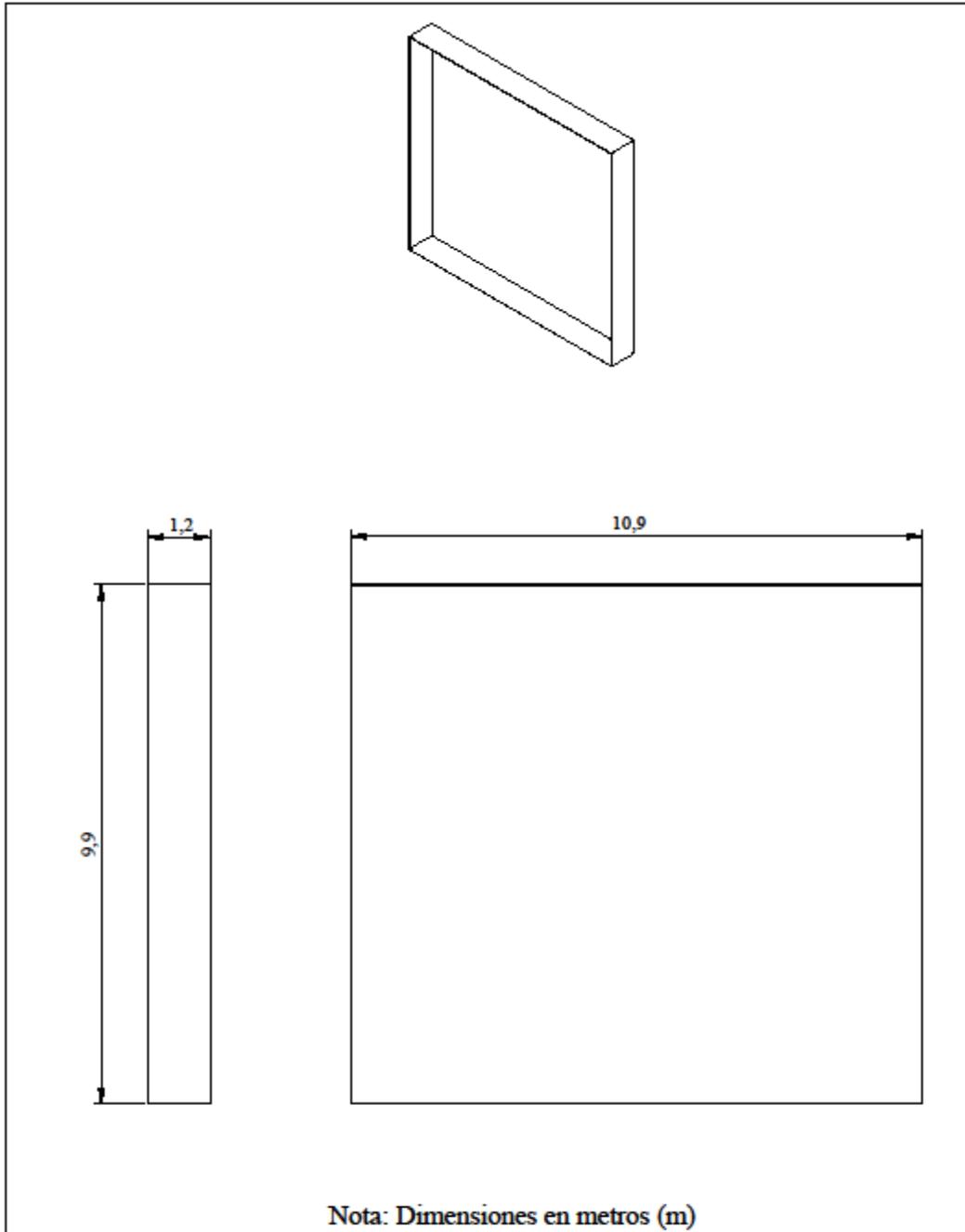
DISEÑO TÚNEL DE VIENTO



Nota: Dimensiones en metros (m)

Trat. Térmico	Ninguno	UISEK	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA		
Recubrimiento	Ninguno		Dib:	Ing. Fredy Leonardo Morquecho	
MATERIAL: Acero		Tol. Gral. ± 0.05	Escala 1:100	Dis:	Ing. Fredy Leonardo Morquecho
				Rev:	Msc. Diana Belén Zurita
DUCTOS DE SEPARACIÓN			TDV:108		Fecha: 25-07-17

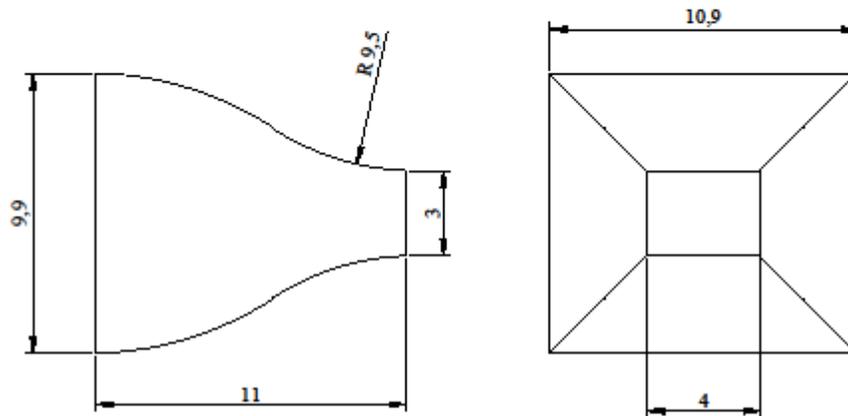
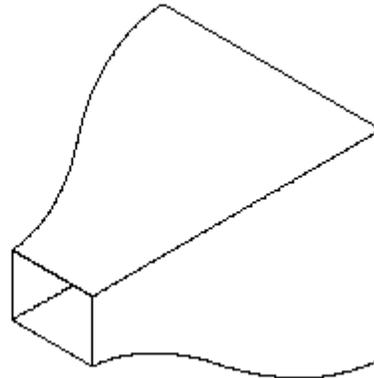
DISEÑO TÚNEL DE VIENTO



Nota: Dimensiones en metros (m)

Trat. Térmico	Ninguno	UISEK	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento	Ninguno		Dib:	Ing. Fredy Leonardo Morquecho
MATERIAL: Acero	Tol. Gral. ± 0.05	Escala 1:100	Dis:	Ing. Fredy Leonardo Morquecho
			Rev:	Msc. Diana Belén Zurita
CÁMARA ESTABILIZACIÓN		TDV:109		Fecha: 25-07-17

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO



Nota: Dimensiones en metros (m)

Trat. Térmico	Ninguno	UISEK	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento	Ninguno		Dib:	Ing. Fredy Leonardo Morquecho
MATERIAL: Acero		Escala 1:200	Dis:	Ing. Fredy Leonardo Morquecho
Tol. Gral. ± 0.05			Rev:	Msc. Diana Belén Zurita
TOBERA O INYECTOR		TDV:110		Fecha: 25-07-17

DISEÑO TÚNEL DE VIENTO

