

UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

**CARRERA DE INGENIERIA MECANICA
AUTOMOTRIZ**

**Tesis previa a la obtención del título de
Ingeniero Mecánico Automotriz**

**DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE UN TUNEL DE VIENTO
PARA ANALISIS AERODINAMICO EN VEHICULOS A
ESCALA**

AUTORES:

**JOSÉ ENRIQUE BERMEO VALLEJO
DANNY FABIAN SIGUENCIA BERMEO
PEDRO ISRAEL SERPA MEDINA**

DIRECTOR:

ING. PAUL ALVAREZ

CUENCA, MARZO DE 2012

CERTIFICACIÓN

Yo, Ing. Paul Alvarez Lloret, certifico que el trabajo aquí desarrollado fue realizado bajo mi completa tutela y dirección.

.....

Ing. Paul Alvarez Lloret

DIRECTOR DE TESIS

DECLARATORIA

Yo, José Enrique Bermeo Vallejo, estudiante de la Universidad Politécnica Salesiana declaro que el trabajo aquí desarrollado fue realizado por mi completa autoría, y admito ceder los derechos de investigación a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido por la ley de Propiedad Intelectual, por el Reglamento y por la Normativa Institucional

.....

JOSE ENRIQUE BERMEO VALLEJO

DECLARATORIA

Yo, Danny Fabian Siguencia Bermeo, estudiante de la Universidad Politécnica Salesiana declaro que el trabajo aquí desarrollado fue realizado por mi completa autoría, y admito ceder los derechos de investigación a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido por la ley de Propiedad Intelectual, por el Reglamento y por la Normativa Institucional

.....

DANNY FABIAN SIGUENCIA BERMEO

DECLARATORIA

Yo, Pedro Israel Serpa Medina, estudiante de la Universidad Politécnica Salesiana declaro que el trabajo aquí desarrollado fue realizado por mi completa autoría, y admito ceder los derechos de investigación a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido por la ley de Propiedad Intelectual, por el Reglamento y por la Normativa Institucional

.....

PEDRO ISRAEL SERPA MEDINA

AGRADECIMIENTOS

A mi Dios, a mis amados Padres Teresa y José Antonio que siempre han estado allí para guiarme y apoyarme. A mis hermanas Jenny, María y Silvana y hermano Juan, a mis primos Marín, que siempre me aconsejaron demostrándome que aún tengo un largo camino por andar. A mi compañera y amiga Denisse que me supo alentar cuando me veía vencido. Al Ing. Paul Álvarez que sin su ayuda no se hubiera podido concluir esta tesis con éxito, a mis profesores ingenieros y amigos de quien obtuve una respuesta acertada a cada consulta o me dieron un consejo para finalizar con este proyecto, y a todos mis amigos de siempre. De todos aprendía algo nuevo que sin duda me hará falta en este largo viaje de la vida.

José Bermeo Vallejo

Agradezco a Dios y a mis padres por brindarme la oportunidad de alcanzar una meta más en la vida, de igual manera a las personas que nos estuvieron apoyando en el transcurso del proyecto, de manera especial al Ing. Paul Álvarez quien con sus conocimientos nos guió hasta la conclusión del mismo.

Danny

A Dios, a mis padres por su apoyo incondicional durante toda mi carrera profesional, al Ing. Paul Alvarez por todo el apoyo brindado durante el desarrollo de este trabajo de tesis.

Pedro Serpa Medina

DEDICATORIA

A mis padres y toda mi familia, sin ellos no lo hubiera podido lograr.

José Bermeo Vallejo

El presente trabajo dedico de manera especial a mi querida madre y amiga, quien ha sabido de manera incondicional apoyarme en esta etapa más de mi vida, a mi padre quien me ha apoyado a lo largo de la carrera, a mi abuelita, tíos, hermanas quienes me han acompañado y aconsejado en cada decisión tomada siempre adelante, también este trabajo lo dedico a mis queridos amigos que han estado apoyándome en esta etapa importante de mi vida. A todos ustedes muchas gracias.....

Danny

A mis amados padres, esposa e hijo y a mis hermanos, en especial a mi madre que desde el cielo me guía.

Pedro Serpa Medina

Resumen

En el desarrollo de esta tesis se establece el diseño y construcción de un túnel de viento, metódicamente partiendo desde la selección de un tipo específico de túnel, para proceder a diseñar uno que se acople a nuestros requerimientos, calculando sus dimensiones y velocidades, simulando el comportamiento que tendrá el flujo de aire para reafirmar los cálculos, finalizando con la construcción del túnel con las dimensiones y características optimizadas, para aplicarlo en el análisis aerodinámico en vehículos a escala mostrando fenómenos como separación de la capa límite y anstisustentación.

Así entonces en el capítulo 1 se evalúan varias alternativas de diseño de túneles de viento en donde se consideran los tipos de túneles que existen, su clasificación y características respectivas para luego realizar el análisis de un túnel específico el cual satisfaga nuestros requerimientos.

De igual manera dentro de este capítulo se estudiarán las partes que constituyen el túnel y su función dentro del mismo con su respectiva explicación, tal es el caso del direccionador de flujo, zona de contracción, zona de pruebas y el difusor. También se estudiará los conceptos de mecánica de fluidos con sus respectivas ecuaciones que permitirán en lo posterior determinar las dimensiones y las características de los elementos a utilizar para la simulación y construcción del túnel de viento.

Dentro del capítulo 2 se diseña del túnel utilizando de los recursos presentados en el capítulo 1, una vez seleccionado el tipo de túnel específico; se explicara el cálculo para el diseño de la geometría de cada uno de los elementos que componen el túnel lo cual permitirá su dimensionamiento. Otros puntos importantes que se analizan en este capítulo son las velocidades, presiones y perdidas de carga que se generan en el interior de este, debido a que esto permitirá la elección de un ventilador adecuado que permita generar el flujo de aire que se necesite para llegar a la velocidad requerida, los cálculos para determinar los parámetros necesarios antes mencionados permitirán realizar la respectiva simulación.

En el Capítulo 3 trata sobre la simulación del túnel de viento mediante software especializado en donde se presenta y explica las etapas y los métodos utilizados en

el software para la simulación. Siendo necesario primero el modelado tridimensional del túnel con las dimensiones establecidas en el capítulo 2. Se presentaran los resultados de las velocidades y las presiones alcanzadas en los diferentes elementos del túnel, lo cual será el paso previo a la construcción de acuerdo a los resultados obtenidos.

El capítulo 4 presenta la construcción del túnel diseñado y optimizado en los capítulos anteriores, aquí se dará a conocer los materiales, elementos de funcionamiento y control utilizados en el túnel, los mismos que deben reunir las condiciones apropiadas para su utilización, dichas condiciones y características son explicadas brevemente con lo que se justifica la utilización de estos dentro del túnel.

En el capítulo 5 se presentan la teoría de la dinámica longitudinal de los vehículos como sustento teórico de los fenómenos que suscitan sobre superficie exterior del vehículo, se hará hincapié en el análisis de la influencia aerodinámica de la parte trasera del vehículo y en la anstisustentación del vehículo.

Por último se realizarán las pruebas de flujo de aire para observar la separación de la capa límite en la parte posterior del vehículo y con elementos auxiliares estimar el efecto de anstisustentación con el incremento de la velocidad del flujo de aire, este últimos se utilizará un software que permita visualizar este efecto en la pantalla de un ordenador.

Índice

Capítulo 1. Análisis de alternativas de diseño de túneles de viento.....	1
1.1 Túnel de viento.....	1
1.2 Historia del túnel de viento.....	3
1.3 Clasificación de los túneles de viento.....	5
1.3.1 Por la circulación del aire en su interior.....	5
1.3.1.1 Circuito abierto.....	5
1.3.1.2 Túnel de viento de ciclo cerrado.....	6
1.3.2 Por la velocidad del flujo en su interior.....	8
1.3.2.1 Túnel Subsónico.....	8
1.3.2.2 Túnel Transónico.....	8
1.3.2.3 Túnel de viento supersónico.....	8
1.3.2.4 Túnel de viento hipersónico	9
1.3.3 Por la dirección del flujo.....	9
1.3.3.1 Túnel de viento Vertical.....	9
1.3.3.2 Túnel de viento horizontal.....	10
1.4 Componentes de un túnel de viento subsónico.....	10
1.4.1 Ventiladores.....	10
1.4.1.1 Ventiladores centrífugos.....	11
1.4.1.2 Ventiladores axiales.....	13

1.4.2 Cámara de estabilización.....	15
1.4.2.1 Panales.....	15
1.4.2.2 Pantallas.....	16
1.4.3 Sección de contracción.....	16
1.4.4 Sección de prueba.....	16
1.4.5 Dispositivos de medida y observación.....	17
1.4.6 Difusor.....	17
1.4.7 Contribución de pérdidas de eficiencia de los componentes del túnel.....	18
1.5 Dinámica de fluidos.....	19
1.5.1 Ideal/Fluido Real.....	19
1.5.2 Flujo Laminar/Flujo Turbulento.....	19
1.5.3 El número de Reynolds.....	20
1.5.4 Viscosidad del fluido.....	23
1.5.5 Capa Límite.....	24
1.5.6 Principio de Bernoulli.....	25
1.5.7 Ecuación de Bernoulli y la Primera Ley de la Termodinámica.....	26
1.5.8 Presión estática.....	27
1.5.9 Presión dinámica.....	28
1.6 Flujo compresible.....	28
1.6.1 Clasificación.....	29
1.7 Análisis de Alternativas de Diseño.....	30

Índice de figuras

Figura 1.1 Túnel de viento.....	2
Figura 1.2 Túnel de viento de los hermano Wright.....	4
Figura 1.3 Túnel de ciclo abierto por soplado. En este diseño el difusor se ha omitido.....	5
Figura 1.4 Esquema de un túnel de viento de circuito cerrado.....	7
Figura 1.5 Modelo tridimensional de un túnel de viento de flujo cerrado.....	7
Figura 1.6 Esquema de un túnel de viento y sus componentes.....	10
Figura1.7 Ventiladores centrífugos de álabes curvados hacia adelante, radiales y atrás.....	11
Figura 1.8 Ventiladores centrífugos con álabes curvados.....	12
Figura 1.9 ventilador axial helicoidal.....	14
Figura 1.10 ventilador axial tubular.....	14
Figura 1.11 ventilador turboaxial.....	15
Figura 1.12 Cuadro indicativo de pérdidas.....	18
Figura 1.13 Tipos de flujos.....	20
Figura 1.14 Regímenes de flujo.....	21
Fig. 1.15 Calculo de secciones transversales y Perímetro mojado.....	23
Figura 1.16 Capa límite	25
Figura 1.17: túnel de viento en relación de la velocidad.....	33
Figura 1.18 Túnel de viento subsónico de succión. Esquema general del prediseño definitivo.....	35

Índice de tablas

Tabla 1. Matriz de alternativas considerando la velocidad de flujo de aire..... 31

Tabla 2. Matriz de alternativas considerando la complejidad de implementación.....34

Capítulo 2 Diseño del túnel de viento.....36

2.1 Consideraciones de diseño.....37

2.2 Diseño de la Sección de pruebas.....38

2.2.1 Dimensiones propuestas.....39

2.2.2 Determinación del tipo de flujo.....40

2.2.3 Cálculo del caudal de aire necesario.....43

2.3 Análisis dimensional del flujo de aire en el túnel.....44

2.3.1 Pérdidas en la sección de pruebas.....45

2.4 Sección de contracción.....49

2.4.1 Cálculo de la velocidad en la entrada de la contracción.....51

2.4.2 Cálculo de presiones de la contracción:.....52

2.4.3 Diseño de la geometría de la contracción54

2.4.4 Cálculo de pérdidas de la contracción.....56

2.5 Direccionador de flujo.....58

2.5.1 Cálculo de pérdidas.....58

2.6 Difusor.....	59
2.6.1 Cálculo del difusor.....	60
2.7 Resultados y replanteo del diseño.....	66
2.7.1 Selección del ventilador.....	69
2.7.1.1 Ventilador centrífugo DA 18/18 de Soler &Palau.....	70
2.7.1.2 Ventilador axial Hasconwing 1200.....	73
2.7.1.3 Ventilador axial Hasconwing 900.....	75
2.7.1.4 Ventilador axial Siemens 2CC3 636-5YB6.....	76
2.7.2 Replanteo del diseño.....	77

Índice de figuras

Figura 2.1 Túnel de viento de ciclo abierto de aspirado.....	36
Figura 2.2. Esquema y numeración de secciones del túnel.....	38
Figura 2.3 Calculo de secciones transversales y Perímetro mojado.....	40
Figura 2.4 Diagrama de Moody. Dependencia del Factor de fricción con Reynolds y la rugosida relativa.....	47
Figura 2.5 Esquema de la sección de contracción.....	50
Figura 2.6 Cotas de la geometría de la contracción.....	54
Figura 2.7 Perfil lateral de la sección de contracción.....	56
Figura 2.8 Coeficiente de pérdidas k en función del radio de curvatura.....	56
Figura 2.9: Coeficientes de perdidas.....	58

Figura 2.10 Geometría y notación del difusor.....	61
Figura 2.11 Coeficiente de pérdidas en una expansión gradual.....	63
Figura 2.12 Diagrama de trabajo del ventilador DA 18/18 de Soler&Palau.....	71
Figura 2.13 Diagrama de trabajo del ventilador Hasconwing 1200.....	73
Figura 2.14 Diagrama de trabajo del ventilador Hasconwing900.....	75

Índice de tablas

Tabla 2.1 Propiedades termodinámicas de Cuenca.....	34
Tabla 2.2 Rugosidad equivalente para conductos nuevos.....	46
Tabla 2.3 Resumen de resultados de dimensiones y pérdidas del diseño propuesto..	67
Tabla 2.4 resultados generales y las demandas del túnel de viento.....	68
Tabla 2.5. Cuadro resumen del ventilador DA 18/18 Soler&Palau.....	72
Tabla 2.6. Cuadro resumen del ventilador Axial Hasconwing 1200.....	74
Tabla 27. Cuadro resumen del ventilador Axial Hasconwing 900.....	76
Tabla 2.8Caidas de caudal frente al incremento de presión estática.....	76
Tabla 2.9 Dimensiones del ventilador siemens 2CC3636.....	77
Tabla 2.10 Resultados del túnel de viento a 40m/s.....	78
Tabla 2.11 Resultados del túnel de viento a velocidad de 30m/s o 108km/h.....	79
Tabla 2.12 Resumen de ventiladores más apropiados.....	80
Tabla 2.13 Dimensiones finales del túnel de viento.....	81

Capítulo 3 Simulación del túnel de viento mediante software especializado....82

3.1 Etapas de la simulación.....	83
3.2 Modelado tridimensional del túnel de viento.....	84
3.3 Pre proceso.....	86
3.4 Post Proceso.....	92

Índice de Figuras

Figura 3.1 Diagrama de las etapas de la Simulación.....	83
Figura 3.2a. Modelo solido tridimensional del túnel de viento. Vista frontal.....	84
Figura 3.2b. Modelo solido tridimensional del túnel de viento. Vista posterior.....	84
Figura 3.3a. Visto isométrica frontal del aspecto final túnel de viento.....	85
Figura 3.3b. Visto isométrica posterior del aspecto final túnel de viento.....	85
Figura 3.4 Esquema del ensamblaje del túnel de viento y sus componentes.....	86
Figura 3.5 Figuras geométricas de para el mallado.....	87
Figura 3.6 Geometría importada lista para ser mallada.....	88
Figura 3.7 Método de conformación del mallado.....	89
Figura 3.8 Modelo mallado con elementos tetraédricos. El mallado se estrecha en los lugares más curvados.....	89
Figura 3.9 Detalle de la malla.....	90
Figura 3.10 Selección de la entrada del flujo de aire.....	91
Figura 3.11 Selección de la salida del flujo de aire del túnel.....	92

Figura 3.12 Velocidades del flujo de aire alcanzadas dentro del túnel.....	93
Figura 3.13 Presiones en las secciones del túnel.....	94
Figura 3.14 Gradiente de presiones.....	95

Índice de tablas

Tabla 3.1 Condiciones iniciales para la simulación.....	91
Tabla 3.2 Resultados de las velocidades y presiones obtenidas de la simulación.....	95

Capítulo 4. Construcción del túnel de viento.....97

4.1 Selección de materiales para la construcción.....	98
4.2 Características de los materiales.....	98
4.2.1 Tol Negro.....	98
4.2.2 Vidrio.....	100
4.2.3 Termoplásticos.....	101
4.3 Selección de elementos de acción y control.....	102
4.3.1 Características de los Materiales eléctricos y electrónicos.....	103
4.3.1.1 Tarjeta de adquisición de datos NI – USB 6212 DAQ MIO.....	103
4.3.1.2 Sensores de presión.....	105
4.3.1.3 Variador de frecuencia.....	106

4.3.1.4 Ventilador.....	107
4.4 Construcción del túnel.....	109
4.4.1 Sección de contracción.....	110
4.4.2 Sección de pruebas.....	110
4.4.3 Difusor.....	111
4.4.4 Estructura o base del túnel.....	112
4.4.5 Estabilizador	112
4.4.6 Ventilador.....	113
4.4.7 Máquina de humo.....	114
4.4.8 Sensores.....	115

Índice de figuras

Figura 4.1 Materiales y descripción de su uso.....	98
Figura 4.2 tol negro	99
Figura 4.3 Vidrio artificial.....	100
Figura 4.4 a Sorbetes	101
Figura 4.4 b Pila de sorbetes del direccionador de flujo.....	101
Figura 4.5 Elementos eléctricos y electrónicos y descripción de su uso.....	103
Figura 4.6 Tarjeta de adquisición de datos NI – USB 6212 DAQ MIO.....	104
Figura 4.7 Sensores de presión.....	105
Figura 4.8 Variador de frecuencia	106
Figura 4.9 Ventilador axial.....	108
Figura 4.10 Túnel de viento.....	109

Figura 4.11 Sección de Contracción.....	110
Figura 4.12 a) Sección de Pruebas	111
Figura 4.12 b) Sección de Pruebas.....	111
Figura 4.13 Difusor.....	111
Figura 4.14 Estructura o base del túnel de viento.....	112
Figura 4.15 a) Estabilizador.....	113
Figura 4.15 b) Vista frontal del estabilizador.....	113
Figura 4.16 a) Montaje del ventilador.....	114
Figura 4.16 b) Manga acople del ventilador.....	114
Figura 4.17 Maquina de humo.....	114
Figura 4.18 Sensor de presión.....	115

Capítulo 5. Análisis de la dinámica longitudinal en los vehículos de prueba...116

5.1 Acciones aerodinámicas sobre los vehículos.....	116
5.1.1 Flujo exterior:.....	118
5.2 Acciones aerodinámicas sobre los vehículos automóviles.....	118
5.2.1 Fuerzas sobre los vehículos.....	118
5.2.2 Resistencia al avance.....	120
5.2.3 Empuje lateral aerodinámico.....	120
5.2.4 Influencia de la parte Trasera.....	121
5.2.5 Sustentación aerodinámica.....	122

5.3 Comprobación de la velocidad de flujo de aire dentro del túnel	125
5.3 Análisis de la sustentación aerodinámica y visualización del flujo de aire sobre el perfil de los automóviles de prueba.....	132
5.3.1 Pruebas del efecto de sustentación.....	133
5.3.2 Análisis del comportamiento de la capa límite.....	142

Índice de figuras

Figura 5.1 Flujo alrededor de un vehículo automóvil.	117
Figura 5.2 flujos del aire alrededor de un vehículo.....	118
Figura 5.3: fuerzas de naturaleza aerodinámica que actúan sobre un vehículo.....	119
Figura 5.4 Área frontal de un vehículo automóvil.....	119
Figura 5.5 Formas usuales de la trasera de los vehículos.....	121
Figura 5.6 Influencia de la pendiente de la superficie trasera en el C_x	122
Figura 5.7 Coeficientes para diferentes configuraciones de la delantera.....	123
Figura 5.8 Coeficientes aerodinámicos para diferentes configuraciones de la parte posterior del vehículo.....	124
Figura 5.9 Variación de la sustentación aerodinámica con la velocidad y uso de ayudas aerodinámicas (faldón delantero y spoiler trasero) en el porche 911 carrera.....	124
Figura 5.10 Velocidad máxima alcanzada en la sección de pruebas.....	125
Figura 5.11 Velocidad alcanzada en el centro del direccionador de flujo.....	126
Figura 5.12 Velocidad alcanzada en la esquina superior derecha del direccionador de flujo.....	127
Figura 5.13 Velocidad alcanzada en la esquina superior izquierda del direccionador de flujo.....	128

Figura 5.14 Velocidad alcanzada en la esquina inferior izquierda del direccionador de flujo.....	129
Figura 5.15 velocidad alcanzada en la esquina inferior izquierda del direccionador de flujo.....	130
Figura 5.16 Velocidad alcanzada en la salida del túnel de viento.....	131
Figura 5.17 Calibración de los sensores en la zona de pruebas.....	132
Figura 5.18 Calibración de sensores (ancho de vía y batalla).....	132
Figura 5.19 Encerado de los sensores en el ordenador	133
Figura 5.20 Vehículo a escala 1:18 sometido a pruebas de sustentación aerodinámica.....	134
Figura 5.21 Prueba en vehículo corvette a escala a 10Km/h.....	134
Figura 5.22 Prueba en vehículo corvette a escala a 45 Km/h.....	135
Figura 5.23 Prueba en vehículo corvette a escala a 90Km/h.....	135
Figura 5.24 Vehículo a escala 1:18 sometido a pruebas de sustentación.....	137
Figura 5.25 Prueba en vehículo Audi R8 a escala a 10Km/h.....	137
Figura 5.26 Prueba en vehículo Audi R8 a escala a 45Km/h.....	138
Figura 5.27 Prueba en vehículo Audi R8 a escala a 90 Km/h.....	138
Figura 5.28 Vehículo a escala 1:18 sometido a pruebas de sustentación.....	140
Figura 5.29 Prueba en vehículo BMW Z4 a escala a 10 Km/h.....	140
Figura 5.30 Prueba en vehículo BMW Z4 a escala a 90 Km/h.....	141
Figura 5.31 Vehículo a escala 1:18 sometido a pruebas de capa limite.....	143
Figura 5.32 Vehículo con alerón sometido a pruebas de capa límite.....	144
Figura 5.33 Vehículo sin alerón sometido a prueba de capa límite.....	144

Figura 5.34 Vehículo con alerón sometido a prueba de capa límite.....	146
Figura 5.35 Vehículo sin alerón sometido a prueba de capa límite.....	146
Figura 5.36 Vehículo a escala con parte trasera inclinada.....	147
Figura 5.37 Vista superior de vehículo con la parte trasera inclinada.....	147

Índice de tablas

Tabla 5.1 Influencia de los tipos de trasera sobre diferentes coeficientes aerodinámicos.....	122
Tabla 5.2 Diferencia entre las velocidades calculada, simulada y real	131

Capítulo 6. Análisis de costos.....149

Índice de tablas

Tabla 6.1 Descripción y costos de los elementos.....	150
Tabla 6.2 Elementos prestados por la universidad Politécnica Salesiana.....	151

Conclusiones.....152

Recomendaciones.....155

Bibliografía.....157

Capítulo 1. Análisis de alternativas de diseño de túneles de viento

Introducción

El túnel de viento es una herramienta de investigación muy utilizada en la actualidad ya que, permite realizar estudios de las características aerodinámicas que presentan los cuerpos al interactuar con el aire o, visto desde otra perspectiva, el efecto que produce en el aire la interposición de un objeto determinado.

La importancia de esta herramienta reside en la posibilidad de realizar estudios de modelos a escala (normalmente escalas de reducción) del prototipo real. Esta posibilidad reduce los costos y mejora el diseño final del prototipo. Claro está que el uso de esta herramienta es fructífero si está correctamente diseñada, es decir, si cada uno de sus elementos constituyentes cumple con los requisitos de funcionalidad requeridos. Uno de estos requisitos es lograr un flujo perfectamente laminar que permita evidenciar con claridad las líneas de corriente manifestadas por las partículas de humo. Otro requisito, no menor que el anterior, es mantener una presión aproximadamente constante en la cámara de análisis (sección del túnel empleada para colocar objetos y analizar sus características aerodinámicas) y un intervalo de velocidades conforme a las condiciones reales a las que se vaya a someter el modelo en prueba.

1.1 Túnel de viento

En mecánica de los fluidos, aerodinámica, etc., la complejidad de las ecuaciones matemáticas hace todavía hoy imposible su tratamiento completo en problemas prácticos. Además, existen ciertos parámetros que por su naturaleza son claramente experimentales. Es necesario por lo tanto contar con medios que hagan posible el estudio de estos fenómenos de una manera económica y fiable. El túnel de viento es la herramienta adecuada para la verificación, estudio y desarrollo de técnicas y procedimientos, así como de teorías con la finalidad de entender el comportamiento de cuerpos o masas de aire en movimiento.

Es innumerable la cantidad de ejemplos dónde se hace necesario el conocimiento del comportamiento del aire en presencia de otros cuerpos, más o menos rígidos, haciendo imprescindible su estudio por la vía de túneles de viento. *Las posibilidades de visualización del movimiento del fluido, como así también la posibilidad de proponer experiencias, le otorgan además calidades educativas importantes.*

Aunque hay muchas familias de túneles de viento, por lo general pueden definirse como conductos que llevan en alguna parte de su trayecto un ventilador accionado por un motor, que se encarga que el aire fluya de manera constante; usualmente las aspas del ventilador son diseñadas, según el tipo de túnel que se vaya a construir, de manera similar a como se hacen las de los aviones.

Para simular las condiciones reales, es necesario simular las condiciones atmosféricas. Estas se caracterizan por un grado bajo de turbulencia (definida como perturbaciones alrededor de un valor medio de velocidad del aire). Se impone por lo tanto la necesidad de contar con un túnel que produzca aire en condiciones similares de turbulencia, es decir, con niveles relativamente bajos de la misma.



Figura 1.1 Túnel de viento

Fuente: <http://autoconsultorio.com/tecnologia-coches/el-misterioso-tunel-de-viento/>

1.2 Historia del túnel de viento

Cuando las primeras investigaciones científicas reales en el campo incipiente de la aeronáutica, los científicos con la esperanza de lograr que algo más pesado vuele en el aire pronto se dio cuenta que tendría que entender la dinámica de flujo de aire sobre una superficie de sustentación para el diseño de un ala práctica. Para hacer esto, sería necesario medir de manera fiable las fuerzas que actúan sobre un cuerpo que pasa rápidamente a través del aire. Hasta principios de 1700, las fuentes naturales de viento, tales como las crestas altas y las bocas de las cuevas se utilizaron para las primeras pruebas, pero resultó ser insuficiente, y así se inventó un medio mecánico para la creación de flujo de aire llamado instrumento de brazos giratorios. Un matemático Inglés llamado Benjamín Robins es reconocido como el primero en utilizar un brazo giratorio para el estudio aeronáutico. El aparato fue impulsado por la caída de los pesos asignados a través de un sistema de cuerdas y poleas a un largo brazo, que gira sobre un eje horizontal. Los órganos de prueba se unen a la extremidad del brazo y podía ser colocado a fin de obtener distintos ángulos de ataque. El primer Brazo giratorio de Robins era de cuatro pies de largo, y en la punta se alcanzaba velocidades de sólo unos pocos metros por segundo, pero en los brazos más largos pueden obtener velocidades de hasta 20 pies por segundo.

En 1871, insatisfecho con los brazos giratorios llevó a Frank H. Wenham al diseño y construyó un túnel de doce pies de largo con un ventilador de vapor como soplador. El éxito de los experimentos de Wenham de túnel de viento inspiró a otros interesados en vuelo a motor para construir sus propios túneles. Sir Hiram Maxim utilizó los ingresos obtenidos por el éxito de su ametralladora para construir un túnel de viento con un diámetro de tres pies, dos veces el tamaño de Wenham, que fue impulsado por un par de ventiladores axiales y capaz de alcanzar velocidades del orden de 50 mph. Utilizando datos de este túnel Maxim desarrolló con éxito el avión bimotor de prueba. El diseño del ala resultó tan eficaz que en una prueba el 31 de julio de 1894, el avión que transportaba a tres pasajeros, accidentalmente se liberó de los carriles de restricción y logró la primera potencia (aunque sin control) de vuelo, una década antes que los hermanos

Wright. Los hermanos Wright también hicieron un amplio uso de un túnel de viento durante el desarrollo de su tercer volante después que sus dos primeros intentos no cumplieron con sus expectativas. Esto se debió en gran parte al hecho de que estaban tratando de aplicar las tablas de elevación compilado por Otto Lilienthal a los diseños de ala muy diferentes de aquellos para los que estaban destinados. Los hermanos Wright interpretaron la desviación de sus resultados previstos y un error en las tablas de Lilienthal, a pesar del hecho de que el ingeniero alemán ya había diseñado varios planeadores con sólo un brazo giratorio para recopilar datos, y así construyeron su propio túnel de viento de seis pies. A pesar de su túnel y aparatos de medición bastante crudos, los hermanos Wright fueron capaces de producir datos precisos a una décima de grado (los hermanos Wright utilizaron una escala de sistemas de equilibrio para hacer la medición). Así, a pesar del diseño relativamente crudo de estos primeros túneles de viento, se habían demostrado ser herramientas muy valiosas para obtener una comprensión más profunda de los principios de aerodinámica.

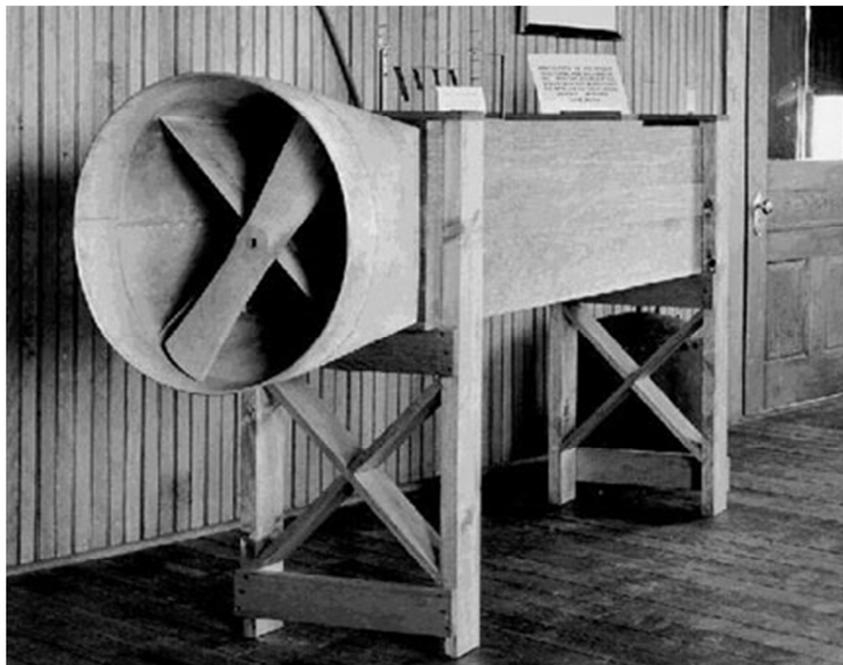


Figura 1.2 Túnel de viento de los hermano Wright

Fuente: http://www.taringa.net/posts/info/4102904/Tunel-de-viento-de-los-hermanos-Wright-_1901_.html

1.3 Clasificación de los túneles de viento

Se puede clasificar a los túneles de viento de forma general tomando en consideración dos aspectos básicos que son: Por la circulación del aire en su interior y por la velocidad del flujo de aire en su interior y también se pueden clasificar por la dirección del flujo, es decir: horizontal o vertical.

1.3.1 Por la circulación del aire en su interior

1.3.1.1 Circuito abierto

Es el más simple y más fácil de construir. En este tipo de túnel el aire es ingresado directamente desde el exterior hacia la sección de prueba y luego expulsado nuevamente hacia el exterior. Son menos costosos, además son menos inmunes a las fluctuaciones de temperatura y disturbios en el retorno del aire, por existir un volumen de aire disponible mucho más grande.

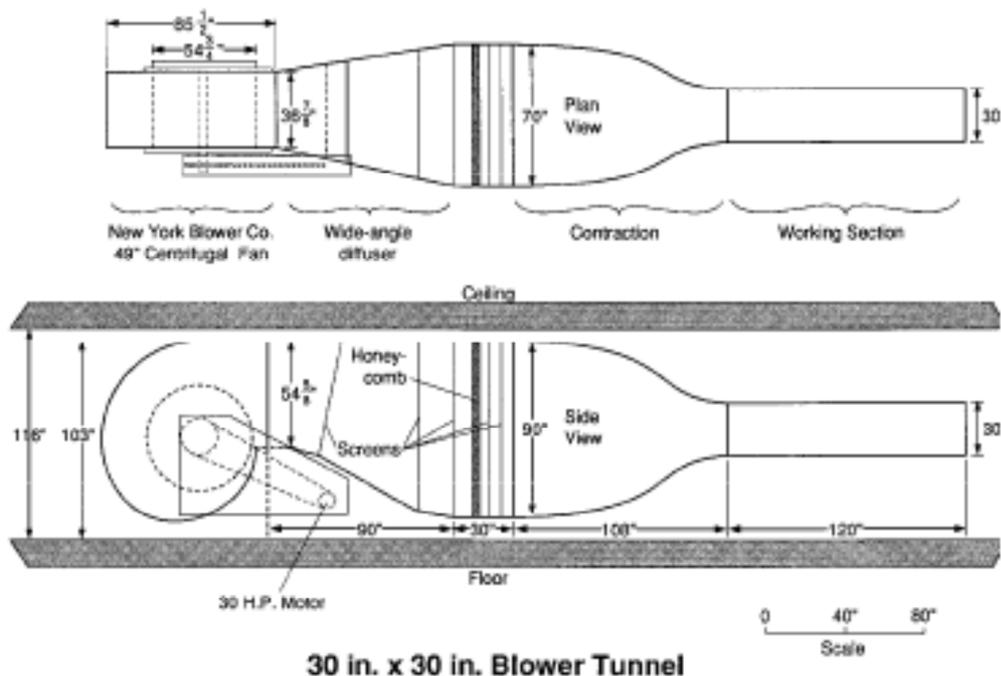


Figura 1.3 Túnel de ciclo abierto por soplado. En este diseño el difusor se ha omitido

Fuente: <http://www.radford.edu/~chem-web/Physics/images/nathan-tatman-thesis.pdf>

Existen dos tipos básicos de túneles de ciclo abierto, de aspirado y soplado, se diferencian fácilmente por la ubicación del ventilador, el de soplado se ubica en la entrada o contracción del túnel, y el de aspirado se ubica a la salida de la sección de trabajo, luego del difusor (figura 1.6).

El túnel de soplado es el más flexible debido a que el ventilador se ubica en el interior del túnel, de ese modo se puede intercambiar la sección de prueba con variaciones importantes del flujo, inclusive en algunas ocasiones se puede omitir el difusor, facilitando el acceso a la sección de prueba y la ubicación de los instrumentos de medida, sin embargo su omisión provoca pérdidas de potencia. Son túneles energéticamente más eficientes que uno aspirado, por lo que los costes de operación del túnel se reducen. La deceleración del fluido en el difusor resulta más eficiente y por tanto se producen menores pérdidas de carga. El túnel de aspirado es más susceptible a inestabilidades del flujo que el túnel de soplado, por otro lado, algunos testimonios afirman que existe menos turbulencia por que el aire no atraviesa el ventilador antes de entrar a la sección de prueba.

1.3.1.2 Túnel de viento de ciclo cerrado.

Como su nombre indica, forman un lazo cerrado, conectando directamente la salida del difusor con la entrada del túnel. Estos túneles son usualmente más largos y dificultosos de construir. Su diseño es mucho más exigente puesto que se debe considerar la uniformidad en el retorno del aire. El flujo de aire es impulsado por un ventilador axial de descarga hacia la sección de prueba, o de carga desde la sección de prueba, según sea de soplado o aspirado, pudiendo incluir compresores de varias etapas que normalmente crean velocidades transónicas o supersónicas.

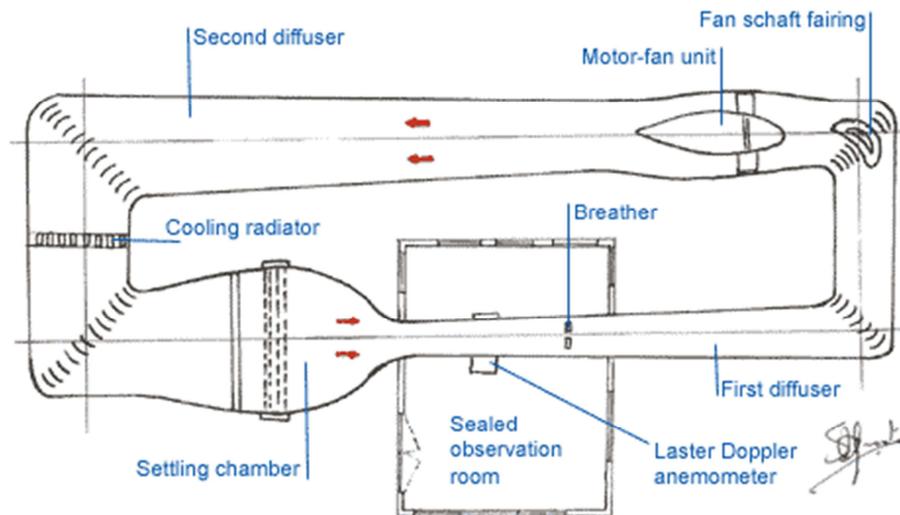


Figura 1.4 Esquema de un túnel de viento de circuito cerrado

Fuente: <http://www.f1latam.com/foro/viewtopic.php?f=22&t=120&start=20>

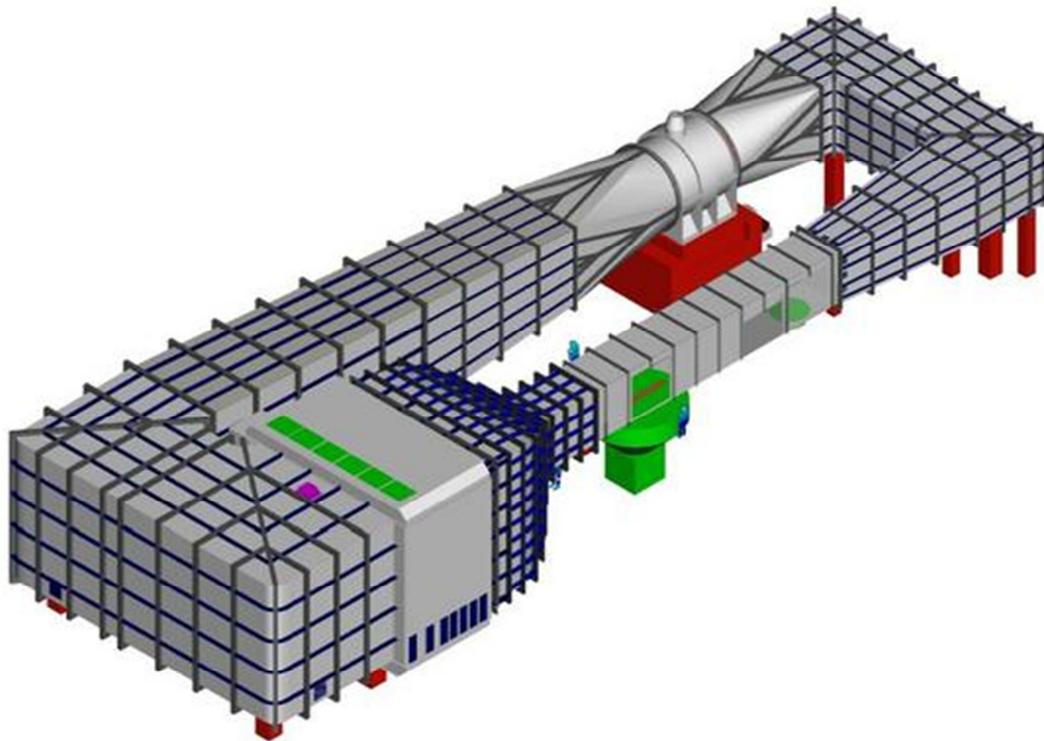


Figura 1.5 Modelo tridimensional de un túnel de viento de flujo cerrado

Fuente: <http://www.alava-ing.es/ingenieros/soluciones/aerodinamica/>

1.3.2 Por la velocidad del flujo en su interior

1.3.2.1 Túnel Subsónico

Los túneles de viento de poca velocidad se utilizan para las operaciones en bajo número de mach, con velocidades en la sección de la prueba hasta 400 kilómetro por hora (~ 100 m/s, $M = 0.3$). El aire se mueve con un sistema de la propulsión hecho de un ventilador axial grande que aumente la presión dinámica con el fin de evitar las pérdidas del fluido viscoso.

1.3.2.2 Túnel Transónico

Túneles de viento subsónicos altos ($0.4 < M < 0.75$) o túneles de viento transónicos ($0.75 < M < 1.2$) se diseñan en los mismos principios que los túneles de viento subsónicos. Los túneles de viento transónicos pueden alcanzar velocidades cerca de las velocidades del sonido. La velocidad más alta se alcanza en la sección de la prueba. El número de Mach es aproximadamente uno con regiones subsónicas y supersónicas combinadas del flujo. La prueba a las velocidades transónicas presenta los problemas adicionales, principalmente debido a la reflexión de las ondas expansivas de las paredes de la sección de la prueba. Por lo tanto, las paredes perforadas o ranuradas se requieren para reducir la reflexión del choque de las paredes. Puesto que ocurren las interacciones viscosas o no viscosas importantes (por ejemplo la interacción de las ondas expansivas o de la capa de límite) el número del Mach y de Reynolds es importante y debe ser simulado correctamente.

1.3.2.3 Túnel de viento supersónico

Este túnel de viento produce velocidades supersónicas ($1.2 < M < 5$). El Número de Reynolds se varía cambiando el nivel de la densidad (presión en el compartimiento que coloca). Por lo tanto se requiere un cociente de alta presión (para un régimen supersónico en $M=4$, este cociente está de la orden de 10). Aparte de eso se puede producir la condensación o la licuefacción, esto significa que un túnel de viento supersónico necesita sequedad o la facilidad de precalentamiento. Un túnel de viento

supersónico tiene una demanda grande de energía al alcanzar solamente la operación intermitente.

1.3.2.4 Túnel de viento hipersónico

En este tipo de túnel se genera un campo del flujo hipersónico en la sección de trabajo. La velocidad de estos túneles varía de Mach 5 a 15. Como con los túneles de viento supersónicos, estos tipos de túneles deben funcionar intermitentemente con los cocientes de muy alta presión al inicializarse. Puesto que la temperatura se amplía con el flujo, en el interior, el aire tiende a licuefactarse. Por esa razón, el precalentamiento es particularmente crítico.

1.3.3 Por la dirección del flujo

1.3.3.1 Túnel de viento Vertical

Un túnel de viento vertical es un gran cilindro, cerrado o descubierto, con grandes ventiladores o turbinas ubicadas en la parte inferior del túnel que generan una potente corriente de viento hacia arriba, la cual logra mantener suspendido un cuerpo, simulando una caída libre a una velocidad superior a los 195 km por hora.

Esta velocidad de un cuerpo en caída libre se denomina Velocidad Terminal. Al igualarse las fuerzas del viento y del cuerpo, este logra flotar a una velocidad constante.

Este tipo de túnel se utiliza para aplicaciones deportivas, al ser de caída libre, simula las condiciones de paracaidismo. Existen túneles que logran sostener a los deportistas a más de veinte metros de altura, lo cual ofrece una amplia posibilidad de improvisar movimientos y giros de gran dificultad.

1.3.3.2 Túnel de viento horizontal

Como su nombre lo indica, el flujo de aire se efectúa en forma horizontal. Los túneles estudiados anteriormente siguen este trayecto, y sus aplicaciones son más generales, abarcando desde aplicaciones automotrices, hasta análisis aeronáutico, incluso navales, e igualmente deportivas como son ciclismo, sky, entre otros. Su rango de velocidades puede ir desde subsónicas hasta hipersónicas.



Figura 1.6 Esquema de un túnel de viento y sus componentes

Fuente: <http://www.cvlmallorca.com/teoria2-e.php>

1.4 Componentes de un túnel de viento subsónico

1.4.1 Ventiladores

Los ventiladores de descarga axial son muy utilizados en túneles de circuito abierto, y muy a menudo se encuentran en túneles de circuito cerrado. En túneles de grandes dimensiones, se ubican paletas llamadas estatores a la entrada de los ventiladores para reducir significativamente los remolinos que se generan a la salida del ventilador. Estos ventiladores tienen relativamente baja eficiencia debido a que el rango de la reducción de presión y el incremento de velocidad es más brusca que en un soplador centrífugo. Se debe tener cuidado en la selección apropiada de las dimensiones de las aspas, su forma y espaciamiento para prevenir el choque de ondas, estanqueidad y reflujos.

Los sopladores centrífugos, son más utilizados en túneles de circuito abierto, o pueden ser usados en túneles de circuito cerrado si se ubica en una esquina. Tiene un rango mucho más grande de operación que el ventilador centrífugo con un nivel aceptable de inestabilidades.

1.4.1.1 Ventiladores centrífugos.

En los ventiladores centrífugos la trayectoria del fluido sigue la dirección del eje del rodete a la entrada y perpendicular al mismo a la salida. Si el aire a la salida se recoge perimetralmente en una voluta, entonces se dice que el ventilador es de voluta.

Estos ventiladores tienen tres tipos básicos de rodetes:

- a- Álabes curvados hacia adelante,
- b- Álabes rectos,
- c- Álabes inclinados hacia atrás / curvados hacia atrás.

En la figura 1.7 puede observarse la disposición de los álabes.

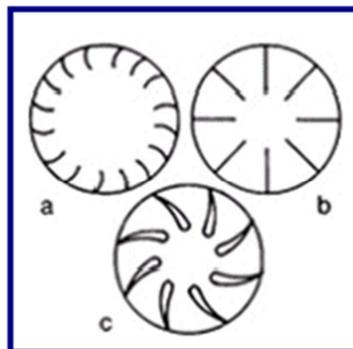


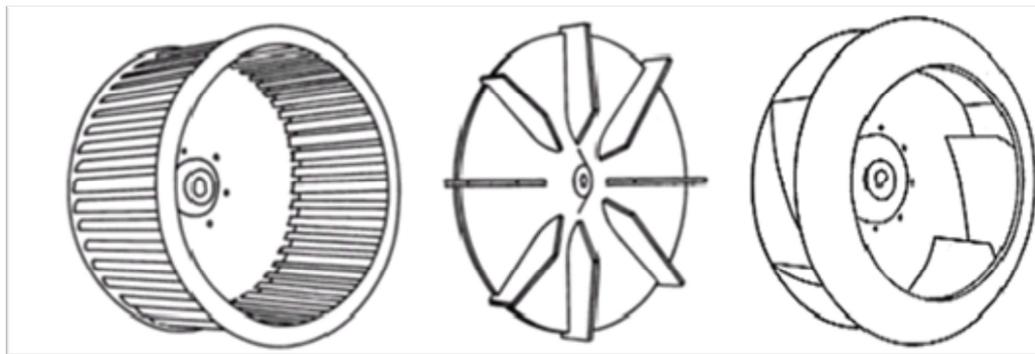
Figura1.7 Ventiladores centrífugos de álabes curvados hacia adelante, radiales y atrás

Fuente: <http://www.unet.edu.ve/~maqflu/doc/LAB-1-128.htm>

Los ventiladores de álabes curvados hacia adelante (también se llaman de jaula de ardilla) tienen una hélice o rodete con álabes curvadas en el mismo sentido de giro. Estos ventiladores necesitan poco espacio, poseen baja velocidad periférica y son silenciosos. Se utilizan cuando la presión estática necesaria es de baja a media, tal como

la que se encuentran en los sistemas de calefacción, aire acondicionado o renovación de aire, etc. No es recomendable utilizar este tipo de ventilador con aire polvoriento, ya que las partículas se adhieren a los pequeños álabes curvados y pueden provocar el desequilibrado del rodete.

Estos ventiladores tienen un rendimiento bajo fuera del punto de proyecto. Además, como su característica de potencia absorbida crece rápidamente con el caudal, ha de tenerse mucho cuidado con el cálculo de la presión necesaria en la instalación para no sobrecargarlo. En general, son bastante inestables funcionando en paralelo, vista su característica caudal-presión. En la figura 1.8 pueden observarse las partes mencionadas.



a

b

c

- a) Jaula de ardilla o de alabes curvados hacia adelante
- b) Alabes radiales
- c) Alabes curvados hacia atrás

Figura 1.8 Ventiladores centrífugos con álabes curvados.

Fuente: <http://www.unet.edu.ve/~maqflu/doc/LAB-1-128.htm>

Los ventiladores centrífugos radiales tienen el rodete con los álabes dispuestos en forma radial. La carcasa está diseñada de forma que a la entrada y a la salida se alcancen velocidades de transporte de materiales. Existen una gran variedad de diseños de rodetes

que van desde los de "alta eficacia con poco material" hasta los de "alta resistencia a impacto". La disposición radial de los álabes evita la acumulación de materiales sobre las mismas. Este tipo de ventilador es el comúnmente utilizado en las instalaciones de extracción localizada en las que el aire contaminado con partículas debe circular a través del ventilador. En este tipo de ventiladores la velocidad periférica es media y se utiliza en muchos sistemas de extracción localizada.

Los ventiladores centrífugos de álabes curvados hacia atrás tienen un rodete con los álabes inclinados en sentido contrario al de rotación. Este tipo de ventilador es el de mayor velocidad periférica y mayor rendimiento con un nivel sonoro relativamente bajo.

1.4.1.2 Ventiladores axiales

Es un tipo de ventilador que proporciona un impulso energético al aire en espiral; clasificados por la forma de sus cuchillas, la inclinación y el número de éstas

Existen tres tipos básicos de ventiladores axiales: Helicoidales, tubulares y tubulares con directrices.

Los ventiladores helicoidales se emplean para mover aire con poca pérdida de carga, y su aplicación más común es la ventilación general. Se construyen con dos tipos de alabes: alabes de disco para ventiladores sin ningún conducto; y alabes estrechas para ventiladores que deban vencer resistencias bajas (menos de 25 mmca). Sus prestaciones están muy influenciadas por la resistencia al flujo del aire y un pequeño incremento de la presión provoca una reducción importante del caudal.



Figura 1.9 ventilador axial helicoidal

Fuente:

<http://www.google.com/imgres?imgurl=http://www.morguiclima.com/imagenes/HXTR.jpg&imgrefurl>

Los ventiladores tubulares disponen de una hélice de álabes estrechos de sección constante o con perfil aerodinámico (ala portante) montada en una carcasa cilíndrica. Generalmente no disponen de ningún mecanismo para enderezar el flujo de aire. Los ventiladores tubulares pueden mover aire venciendo resistencias moderadas (menos de 50mmcda).



Figura 1.10 ventilador axial tubular

Fuente: http://www.google.com/imgres?imgurl=http://img.directindustry.es/images_di/photo-g/ventilador-centrifugo-432502.jpg&imgrefurl

Los ventiladores turboaxiales con directrices tienen una hélice de álabes con perfil aerodinámico (ala portante) montado en una carcasa cilíndrica que normalmente dispone de aletas enderezadoras del flujo de aire en el lado de impulsión de la hélice.

En comparación con los otros tipos de ventiladores axiales, éstos tienen un rendimiento superior y pueden desarrollar presiones superiores (hasta 600 mmcda).

Las directrices (compuertas) tienen la misión de hacer desaparecer la rotación existente o adquirida por el fluido en la instalación, a la entrada del rodete o tras su paso por el mismo. Estas directrices pueden colocarse a la entrada o a la salida del rodete, incluso las hay fijas o removibles.



Figura 1.11 ventilador turboaxial

Fuente: <http://www.google.com/images?um=1&hl=es&q=Los+ventiladores+tuboaxiales&ie=UTF-8&source=og&sa=N&tab=wi&biw=1360&bih=584>

1.4.2 Cámara de estabilización.

Esta cámara se encuentra entre el ventilador o el ángulo de mayor apertura de la contracción y contiene el panel y las pantallas usadas para estabilizar las variaciones longitudinales del flujo. Las pantallas dentro de la cámara deben ir espaciadas 0.2 veces el diámetro de la cámara, de forma que el flujo desordenado por la primera pantalla es estabilizado por la segunda (figura 1.6).

1.4.2.1 Paneles

Se ubica en la cámara de estabilización y se utilizan para reducir el desorden del flujo de aire. Para beneficios óptimos, el espesor del panel debe ser de 6 a 8 veces el diámetro

de las celdas, y el número de celdas debe ser del orden de 150 por el diámetro de la cámara de estabilización.

1.4.2.2 Pantallas

Se ubican a la salida del panel y a veces a la entrada de la sección de prueba. La pantalla crea una caída de presión estática para reducir el espesor de la capa límite e incrementar la uniformidad del flujo. Una pantalla está caracterizada por la relación de área de apertura, la cual está definida por la siguiente ecuación, donde d es el diámetro de los alambres y L es la longitud de la pantalla. Al menos una pantalla en la cámara de estabilización (idealmente la última) debería tener una relación de área de apertura de $\beta < 0.57$, siendo más efectivas las pantallas con menor relación de área de apertura. Esto es predecible que debido a la formación de vórtices generados por la fusión desordenada de pequeños chorros emitidos desde la pantalla. La caída de presión a través de la pantalla depende de la relación del área de apertura y la densidad, viscosidad cinemática y el promedio de la velocidad del fluido.

$$\beta = \left(1 - \frac{d}{L}\right)^2$$

1.4.3 Sección de contracción

Se ubica entre la cámara de estabilización y la sección de prueba, cumple dos funciones, incrementar la velocidad a la entrada y moderar las inconsistencias de uniformidad del flujo. Las relaciones de contracción grandes y longitudes cortas son generalmente más convenientes debido a que reducen las pérdidas de potencia a través de las pantallas y espesores de la capa límite. Túneles pequeños normalmente tienen relaciones de contracción entre 6 y 9 (figura 1.6).

1.4.4 Sección de prueba

Es la cámara en la cual se realizan las mediciones y las observaciones, su forma y longitud está determinada por los requerimientos de prueba. La sección de prueba debe

ser lo suficientemente larga de modo que los disturbios resultantes de la sección de contracción y las pantallas sean amortiguadas antes de llegar al objeto de prueba. Sin embargo, su longitud no debe ser exagerada, puesto que puede provocar una separación de la capa límite en la entrada del difusor incrementando las pérdidas de potencia (figura 1.6).

1.4.5 Dispositivos de medida y observación

Existe una gran variedad de dispositivos de medición, uno de los más populares es el tubo de Pitot que mide las diferencias de presión usualmente con ayuda de un manómetro, son capaces de medir la diferencia entre la presión estática y dinámica, y a partir de esta se puede calcular la velocidad utilizando la relación entre la presión dinámica y velocidad de flujo. Se debe tener precaución de un perfecto alineamiento del tubo con el flujo de aire para evitar cualquiera alteración en la medida.

Los anemómetros son elementos mecánicos que miden la velocidad del aire mediante el uso de cucharetas rotativas, la velocidad puede ser determinada por la velocidad de rotación de este elemento. Existen anemómetros de hilo caliente que son mucho más sensibles y precisos, además de velocímetros laser y acústicos.

Para la visualización del flujo de fluido en túneles de viento, se usan comúnmente humo o hilos. El humo se introduce en el interior del túnel en corrientes finas o mediante una probeta. Si se usan hilos pequeños, estos van pegados al objeto de prueba, debiendo ubicarse en lugares específicos.

1.4.6 Difusor

Es una cámara que se expande transversalmente según aumenta su longitud, se ubica a la salida de la sección de prueba, es usada para reducir la velocidad del flujo de aire incrementando la presión. Los ángulos pueden ser más de 5° incrementando la presión, sin embargo puede causar separación de la capa límite y por tanto pérdida de uniformidad del flujo. Para controlar mejor este efecto, se usan pantallas, pero no existen

relaciones precisas para determinar su dimensión exacta, por lo que su dimensionamiento se lo debe hacer de forma experimental (figura 1.6).

1.4.7 Contribución de pérdidas de eficiencia de los componentes del túnel

Con la geometría descrita anteriormente, y tras el análisis de las pérdidas de carga que aparecerán en cada sección se puede presentar un cuadro indicativo de los porcentajes de caída de presión en cada una de las secciones:

Se observa que el máximo responsable de las pérdidas es el difusor, de su correcto diseño dependerá la optimización de funcionamiento del túnel. Los uniformadores de corriente son los siguientes elementos en generación de pérdidas, pero dado que se trata de un túnel que puede realizar calibraciones no será posible reducir este número pues son los encargados de reducir el nivel de turbulencia.

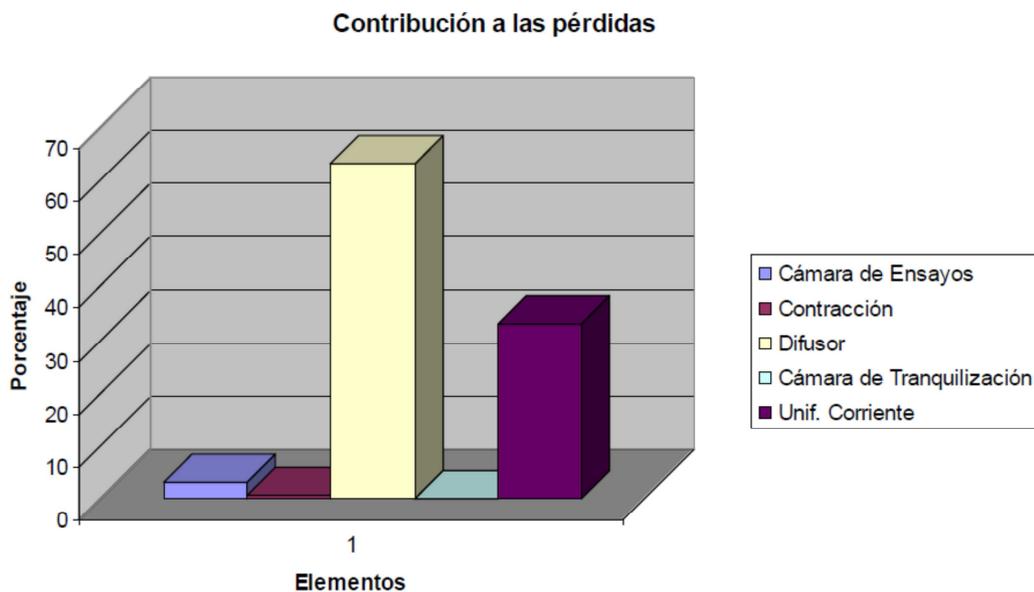


Figura 1.12 Cuadro indicativo de pérdidas

Fuente: http://www.tecnica1.es/UserFiles/File/articulos/2010/27-marzo/tunel_de_viento.pdf

1.5 Dinámica de fluidos

1.5.1 Ideal / Fluido Real

Un fluido ideal es un fluido que no experimenta fuerzas viscosas. Esta propiedad permite que fluyan a lo largo de las paredes sin disminución de velocidad debido a la fricción, y también elimina el arrastre de la lámina adyacente debido a los gradientes de velocidad. Esto a su vez significa que los fluidos ideales no forman vórtices turbulentos como estas obstrucciones de paso del flujo. El fluido ideal se puede considerar como el cuerpo de diminutas partículas de fricción, capaces de apoyar a las presiones de incidencia normal, pero no afectadas por esfuerzos cortantes. Los fluidos ideales son una concepción teórica y son útiles en algún momento en la modelización de situaciones del mundo real, donde las fuerzas viscosas se pueden despreciar a una aproximación razonable.

Fluidos viscosos con mayor frecuencia se encuentran en situación práctica se llaman fluidos reales, y aunque su análisis es mucho más complejo debido a la adición de las fuerzas viscosas, se utilizan en una gama mucho más amplia de aplicaciones.

1.5.2 Flujo Laminar / Flujo Turbulento

El flujo laminar es el movimiento de fluidos en delgadas capas paralelas muy similar a una diapositiva sobre el resto de las hojas de papel. Cada capa tiene fuertes fuerzas viscosas de las capas adyacentes y las fuerzas de estos tienen un efecto amortiguador sobre las interrupciones en el flujo de manera que el flujo aguas abajo de un obstáculo volverá rápidamente a su estado no perturbado.

El flujo turbulento es el flujo altamente aleatorio y caótico que se produce a altos números de Reynolds y se caracteriza por la formación de remolinos y vórtices de varios tamaños. A diferencia de flujo laminar, en el que se determina el comportamiento de fluidos sobre todo por las fuerzas viscosas, el comportamiento del flujo en el flujo turbulento es determinado por las fuerzas de inercia. Calcular el comportamiento de

fluidos en régimen turbulento es a menudo muy difícil, ya que las ecuaciones de Navier-Stokes que se deben utilizar son muy complejas. Estas ecuaciones relacionan la presión, densidad, temperatura y velocidad de un fluido a través del uso de la tasa de los tensores de tensiones y deformaciones, y el resultado es un conjunto de cinco ecuaciones diferenciales acopladas (una ecuación adicional de estado también es necesaria con el fin de encontrar una solución). En el más simple, pero todos los casos, estas ecuaciones son extremadamente difíciles de resolver analíticamente, y la mayoría de las soluciones deben encontrarse a través de aproximaciones y el uso de computadoras de alta velocidad.

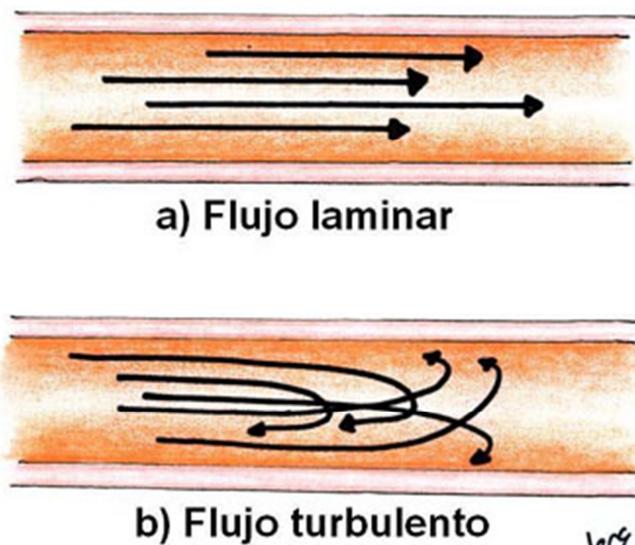


Figura 1.13 Tipos de flujos

Fuente: <http://f1sintiempo.wordpress.com/2010/07/15/glosario-tecnico/>

1.5.3 El número de Reynolds

Cuando un líquido fluye en un tubo y su velocidad es baja, fluye en líneas paralelas a lo largo del eje del tubo; a este régimen se le conoce como flujo laminar". Conforme aumenta la velocidad y se alcanza la llamada velocidad crítica", el flujo se dispersa hasta que adquiere un movimiento de torbellino en el que se forman corrientes cruzadas y remolinos; a este régimen se le conoce como flujo turbulento" (ver la Figura 1.14). El

paso de régimen laminar a turbulento no es inmediato, sino que existe un comportamiento intermedio indefinido que se conoce como régimen de transición".

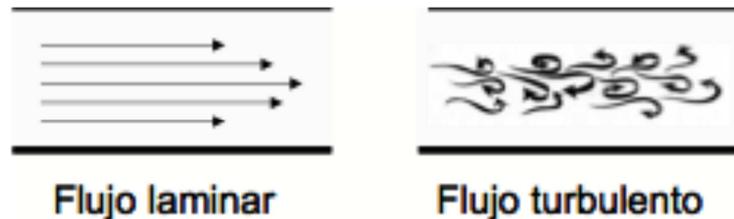


Figura 1.14 Regímenes de flujo

Fuente: http://web.me.com/fjguerra/Personal/6o_Semestre_files/Re.pdf

Si se inyecta una corriente muy fina de algún líquido colorido en una tubería transparente que contiene otro líquido incoloro, se pueden observar los diversos comportamientos del líquido conforme varía la velocidad (véase la Figura 1.12). Cuando el fluido se encuentra dentro del régimen laminar (velocidades bajas), el colorante aparece como una línea perfectamente definida (Figura 1.14), cuando se encuentra dentro de la zona de transición (velocidades medias), el colorante se va dispersando a lo largo de la tubería (Figura 1.13) y cuando se encuentra en el régimen turbulento (velocidades altas) el colorante se difunde a través de toda la corriente (Figura 1.13).

Las curvas típicas de la distribución de velocidades a través de tuberías se muestran en la Figura 1.13.

Para el flujo laminar, la curva de velocidad en relación con la distancia de las paredes es una parábola y la velocidad promedio es exactamente la mitad de la velocidad máxima. Para el flujo turbulento la curva de distribución de velocidades es más plana (tipo pistón) y el mayor cambio de velocidades ocurre en la zona más cercana a la pared.

Los diferentes regímenes de flujo y la asignación de valores numéricos de cada uno fueron reportados por primera vez por Osborne Reynolds en 1883. Reynolds observó que el tipo de flujo adquirido por un líquido que fluye dentro de una tubería depende de la velocidad del líquido, el diámetro de la tubería y de algunas propiedades físicas del

fluido. Así, el número de Reynolds es un número adimensional que relaciona las propiedades físicas del fluido, su velocidad y la geometría del ducto por el que fluye y está dado por la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu}$$

donde:

Re = Número de Reynolds

D = Diámetro del ducto

v = Velocidad promedio del líquido

ρ = Densidad del líquido

μ = Viscosidad del líquido

Cuando el ducto es una tubería, D es el diámetro interno de la tubería. Cuando no se trata de un ducto circular, se emplea el diámetro hidráulico (D_h) que es la dimensión característica de las secciones no circulares. Esto se define como el cociente del área neta de la sección transversal de una corriente de flujo entre el perímetro mojado, PM , de la sección. Esto es.

$$D_h = \frac{4A}{PM}$$

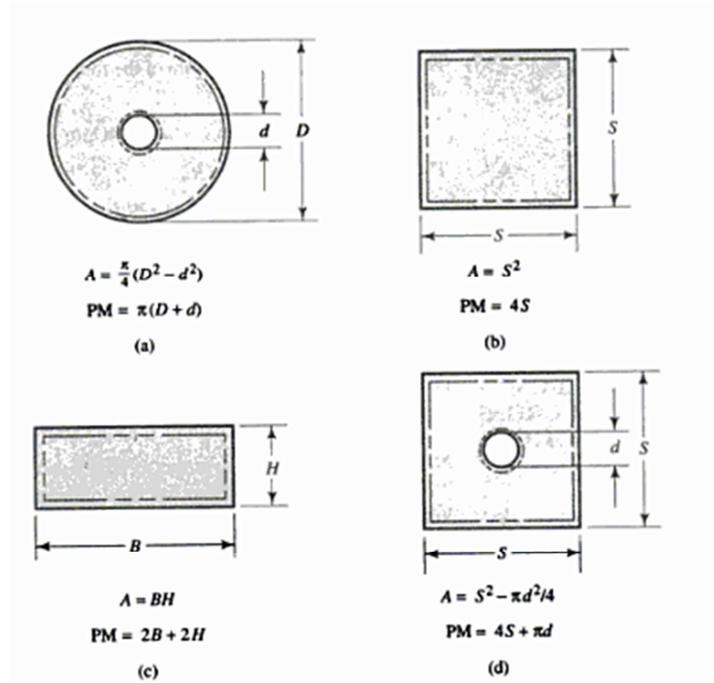


Fig. 1.15 Cálculo de secciones transversales y Perímetro mojado

Fuente: Mott Robert. Mecánica fluidos Aplicada 4ta Edición. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana SA. México DF -México. 1996

El *Perímetro mojado* se define como la suma de la longitud de los límites de la sección que realmente está en contacto con el fluido. En la figura 1.15 se presenta lo antes mencionado por una línea adyacente a los límites que conforman el perímetro mojado.

Generalmente cuando el número de Reynolds (Ecuación 2) se encuentra por debajo de 2100 se sabe que el flujo es laminar, el intervalo entre 2100 y 4000 se considera como flujo de transición y para valores mayores de 4000 se considera como flujo turbulento. Este grupo adimensional es uno de los parámetros más utilizados en los diversos campos de la Ingeniería en los que se presentan unidos en movimiento.

1.5.4 Viscosidad del fluido

La viscosidad se puede comparar un poco a la fricción experimentada por objetos sólidos, pero a diferencia de las fuerzas de fricción entre sólidos, las fuerzas viscosas son

independientes de la presión. La viscosidad es en última instancia, causada por las fuerzas intermoleculares cohesivas, y se puede expresar matemáticamente como el cociente entre la tensión de corte en un fluido a su gradiente de velocidad. La viscosidad se puede observar en una serie de líquidos comunes. Por ejemplo, el jarabe de arce tiene una mayor viscosidad que el agua y así fluye más lentamente. Los gases también experimentan fuerzas viscosas y las fuerzas que aumentan la temperatura del gas aumenta. Esto se debe al hecho de que a medida que aumenta la temperatura, lo mismo ocurre con la energía cinética de las moléculas y por lo que hay un aumento en la tasa de colisiones intermoleculares. Para una buena aproximación, la viscosidad de un gas que va a la raíz cuadrada de su temperatura.

1.5.5 Capa Límite

Capas límite son las regiones de fluido ubicado inmediatamente colindante a un objeto sumergido o en la pared en la que las velocidades de flujo se rigen por las fuerzas viscosas. Las fuerzas de arrastre y la mayor parte del intercambio de calor experimentada por el objeto se debe al fluido en esta región. Las capas límites generalmente comienzan como una región muy delgada de flujo laminar que se espesa con el aumento de números de Reynolds y luego, gradualmente, la transición a una capa turbulenta que fluye sobre una subcapa viscosa. Fuera de flujo de la capa límite es independiente de los criterios de número de Reynolds.

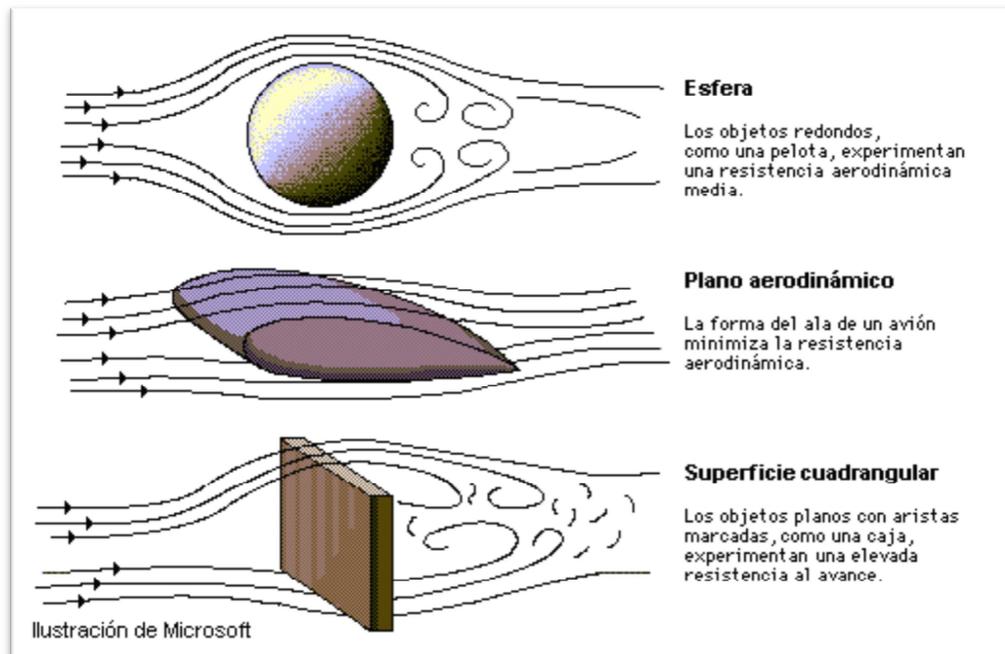


Figura 1.16 Capa límite

Fuente:

<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/es/conceptosbasicosmfluidos/capalimite/capalimite.html>

1.5.6 Principio de Bernoulli

El principio de Bernoulli, también denominado *ecuación de Bernoulli* o *Trinomio de Bernoulli*, describe el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una línea de corriente. Fue expuesto por Daniel Bernoulli en su obra *Hidrodinámica* (1738) y expresa que en un fluido ideal (sin viscosidad ni rozamiento) en régimen de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de su recorrido. La energía de un fluido en cualquier momento consta de tres componentes:

1. Cinética: es la energía debida a la velocidad que posea el fluido.
2. Potencial gravitacional: es la energía debido a la altitud que un fluido posea.
3. Energía de flujo: es la energía que un fluido contiene debido a la presión que posee.

La siguiente ecuación conocida como "Ecuación de Bernoulli" (Trinomio de Bernoulli) consta de estos mismos términos.

$$\frac{V^2 \rho}{2} + P + \rho g z = \text{constante}$$

Donde:

- V = velocidad del fluido en la sección considerada.
- g = aceleración gravitatoria
- z = altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia.
- P = presión a lo largo de la línea de corriente.
- ρ = densidad del fluido.

Para aplicar la ecuación se deben realizar los siguientes supuestos:

- Viscosidad (fricción interna) = 0 Es decir, se considera que la línea de corriente sobre la cual se aplica se encuentra en una zona 'no viscosa' del fluido.
- Caudal constante
- Flujo incompresible, donde ρ es constante.
- La ecuación se aplica a lo largo de una línea de corriente o en un flujo irrotacional

Aunque el nombre de la ecuación se debe a Bernoulli, la forma arriba expuesta fue presentada en primer lugar por Leonhard Euler.

1.5.7 Ecuación de Bernoulli y la Primera Ley de la Termodinámica

De la primera ley de la termodinámica se puede concluir una ecuación estéticamente parecida a la ecuación de Bernoulli anteriormente señalada, pero conceptualmente distinta. La diferencia fundamental yace en los límites de funcionamiento y en la formulación de cada fórmula. La ecuación de Bernoulli es un balance de fuerzas sobre

una partícula de fluido que se mueve a través de una línea de corriente, mientras que la primera ley de la termodinámica consiste en un balance de energía entre los límites de un *volumen de control* dado, por lo cual es más general ya que permite expresar los intercambios energéticos a lo largo de una corriente de fluido, como lo son las pérdidas por fricción que restan energía, y las bombas o ventiladores que suman energía al fluido. La forma general de esta, llamémosla, "forma energética de la ecuación de Bernoulli" es:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + z_1 \frac{g}{g_c} + W = h_f + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + z_2 \frac{g}{g_c}$$

Donde:

- γ es el peso específico ($\gamma = \rho g$).
- W es una medida de la energía que se le suministra al fluido.
- h_f es una medida de la energía empleada en vencer las fuerzas de fricción a través del recorrido del fluido.
- Los subíndices 1 y 2 indican si los valores están dados para el comienzo o el final del volumen de control respectivamente.
- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ y $g_c = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}/(\text{N}\cdot\text{s}^2)$

1.5.8 Presión estática

La presión estática es la presión que se ejerce por un líquido o gas, como el agua o el aire. En concreto, es la presión medida cuando el líquido o el gas esta en reposo.

De esta manera, cualquier presión ejercida por un fluido la cual no es ejercida por el movimiento o velocidad del fluido es llamada presión estática del fluido.

Para fluidos en reposo (estáticos) la presión dinámica es nula y la presión estática es igual a la presión total. Mientras que la presión dinámica actúa únicamente en la

dirección del flujo, la presión estática actúa por igual en todas las direcciones y siempre en ángulo recto con todas las superficies que contengan al fluido.

1.5.9 Presión dinámica

Se puede decir que cuando los fluidos se mueven en un conducto, la inercia del movimiento produce un incremento adicional de la presión estática al chocar sobre un área perpendicular al movimiento. Esta fuerza se produce por la acción de la presión conocida como dinámica. La presión dinámica depende de la velocidad y la densidad del fluido.

En mecánica de fluidos la presión dinámica se define por:

$$q = \frac{1}{2}\rho v^2$$

Dónde:

q → presión dinámica en pascales

ρ → densidad del fluido en kg/m^3

v → velocidad del fluido en m/s

1.6 Flujo compresible

Todos los fluidos son compresibles, incluyendo los líquidos. Cuando estos cambios de volumen son demasiado grandes se opta por considerar el flujo como compresible (que muestran una variación significativa de la densidad como resultado de fluir), esto sucede cuando la velocidad del flujo es cercana a la velocidad del sonido. Estos cambios suelen suceder principalmente en los gases ya que para alcanzar estas velocidades de flujo de líquidos se precisa de presiones del orden de 1000 atmósferas, en cambio un gas sólo precisa una relación de presiones de 2:1 para alcanzar velocidades sónicas. La compresibilidad de un flujo es básicamente una medida en el cambio de la densidad. Los gases son en general muy compresibles, en cambio, la mayoría de los líquidos tienen una compresibilidad muy baja. Por ejemplo, una presión de 500 kPa provoca un cambio de

densidad en el agua a temperatura ambiente de solamente 0.024%, en cambio esta misma presión aplicada al aire provoca un cambio de densidad de 250%. Por esto normalmente al estudio de los flujos compresibles se le conoce como dinámica de gases, siendo esta una nueva rama de la mecánica de fluidos, la cual describe estos flujos.

1.6.1 Clasificación

Los flujos compresibles pueden ser clasificados de varias maneras, la más común usa el número de Mach (M) como parámetro para clasificarlo.

$$M = \frac{V}{a}$$

Donde

$V \rightarrow$ es la velocidad del flujo y

$a \rightarrow$ es la velocidad del sonido en el fluido.

- **Prácticamente incompresible:** $M < 0.3$ en cualquier parte del flujo. Las variaciones de densidad debidas al cambio de presión pueden ser despreciadas. El gas es compresible pero la densidad puede ser considerada constante.
- **Flujo subsónico:** $M > 0.3$ en alguna parte del flujo pero no excede 1 en ninguna parte. No hay ondas de choque en el flujo.
- **Flujo transónico:** $0.8 \leq M \leq 1.2$. Hay ondas de choque que conducen a un rápido incremento de la fricción y éstas separan regiones subsónicas de hipersónicas dentro del flujo. Debido a que normalmente no se pueden distinguir las partes viscosas y no viscosas este flujo es difícil de analizar.
- **Flujo supersónico:** $1.2 < M \leq 5$. Normalmente hay ondas de choque pero ya no hay regiones subsónicas. El análisis de este flujo es menos complicado.

- **Flujo hipersónico:** $M > 5$. Los flujos a velocidades muy grandes causan un calentamiento considerablemente grande en las capas cercanas a la frontera del flujo, causando disociación de moléculas y otros efectos químicos.

1.7 Análisis de Alternativas de Diseño

Para la selección de las alternativas, consideramos el cumplimiento de ciertas condiciones. Consideramos más importante la velocidad del flujo del aire dentro del túnel, junto con otras condiciones que son necesarias para el tipo de análisis que planteamos.

En la tabla 1 citamos las condiciones que requerimos para llegar a un tipo de túnel que se preste para alcanzar los resultados deseados.

Túnel de viento según la velocidad del flujo de aire				
Condiciones a cumplir	Subsónico	Transónico	Supersónico	Hipersónico
Número de Mach ≤ 0.7	1	0	0	0
Análisis aerodinámico sobre vehículos automóviles	1	1	0	0
Costos manejables de operación	1	0	0	0
Costos manejables de implementación	1	1	0	0
Disposición y manejo de datos	1	1	0	0
Obtención de resultados perceptibles visiblemente sin aparatos especiales	1	1	0	0
Cantidad relativamente baja de variables a considerar	1	1	0	0
Total	7	5	0	0
1: Cumple con la condición 0: No cumple con la condición				

Tabla 1. Matriz de alternativas considerando la velocidad de flujo de aire

En base a los resultados en la tabla 1, determinamos que el mejor tipo de túnel para el análisis aerodinámico en el campo automotriz, es el subsónico, puesto que este cumple con todas las condiciones requeridas. Dentro de las cuales vamos a considerar como más importante el rango de velocidades para el análisis, que lo comparamos con el número de Mach, que es cociente entre una velocidad dada y la velocidad del sonido. A

estas velocidades, la visualización del flujo de aire se pueden observar a simple vista, no así, cuando se utilizan velocidades superiores, en el cual las pruebas se realizan por un tiempo muy limitado, durando segundos requiriéndose de aparatos especiales para poder analizar los fenómenos que surgen al someter a un objeto a tales velocidades, como consecuencia el costo general se incrementan considerablemente.

En un túnel de viento subsónico, la obtención de datos se lo puede hacer con sensores, que dependiendo de si están bien calibrados será la precisión de datos, estos sensores no son de gran complejidad y por ende de costos no muy elevados, que comparados con los elementos para adquisición de datos y control en túneles de viento con número de Mach superiores, sumado al cortísimo tiempo de prueba, los márgenes de error serán muy superiores, y el manejo de la información obtenida, exige un nivel más elevado de conocimiento para analizarlos y llegar a conclusiones que den firmeza sobre la construcción o no de cierto elemento o vehículo.

Por último, se sabe que las velocidades máximas a las que circula un vehículo automotriz deportivo, se mantienen dentro de $Mach \leq 0.7$. Si se despeja de esta ecuación la velocidad máxima que será:

$$M = 0.7 = \frac{V_{max}}{V_{sonido}} = \frac{V_{max}}{300m/s}$$

$$V_{max} = 0.7 \cdot 300m/s$$

$$V_{max} = 210m/s = 756km/h$$

En la actualidad, aun no se conoce un vehículo homologado para la circulación regular, que alcance la velocidad de 756km/h, mucho menos a números Mach superiores. De este resultado, en definitiva concluimos que el tipo de túnel que debemos y requerimos utilizar, es el Túnel de viento Subsónico.

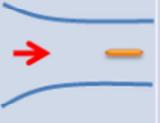
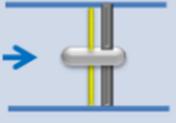
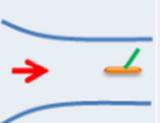
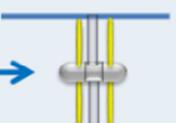
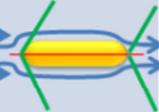
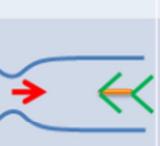
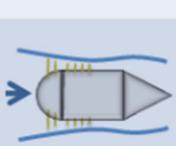
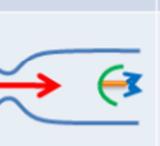
Régimen de Velocidad	Flujo Típico (Modelo)	Sección de Entrada	Radio de Compresión	Motor o sistemas de motor
Subsónico ($M=0-0.7$)			1.0+	
Transónico ($M=0.7-1.2$)			1.1	
Supersónico ($M=1.2-5$)			2 ($M=2$)	
Hipersónico ($M>5$)			20 ($M=5$)	

Figura 1.17: túnel de viento en relación de la velocidad

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Tipo_tuneles_velocidad.png

De este tipo de túnel de viento, existen dos variantes, el de ciclo abierto y de ciclo cerrado. De igual manera, se valorará con varias variables, las cuales fundamentalmente son: condiciones de prueba, eficiencia y costos de construcción. A continuación se detallan las variables consideradas.

Valoración de la alternativa seleccionada – Túnel de Viento Subsónico										
Variable a considerar	Circuito abierto					Circuito cerrado				
	Valoración					Valoración				
1 - Complejidad de construcción		2							4	
2 - Costo de construcción			3							5
3 - Exigencias de diseño				4						5
4 - Perturbaciones y/o turbulencias a reducir			3							5
5 - Componentes del túnel			3							5
6 - Variación de las condiciones del fluido					5		2			
7 - Espacio físico requerido			3						4	
8 - Limitación de aplicaciones		2					2			
Total valoraciones	0	4	12	4	5	0	4	0	8	20
Nivel exigencia de implementación	25					32				
<p>1: Muy bajo 4: Alto</p> <p>2: Bajo 5: Muy alto</p> <p>3: Medio</p>										

Tabla 2. Matriz de alternativas considerando la complejidad de implementación

Fuente: Autores

El total del nivel de exigencia de implementación entre los dos tipos de túneles, se obtuvo 25 para el de ciclo abierto y 32 para el de ciclo cerrado, el resultado nos hace notar que es mucho más complejo la implementación de uno de Flujo Cerrado. Si observamos en la tabla, este tipo de túnel tiene su mayor peso en cuestiones de diseño y construcción, demandando más dinero y tiempo para su ejecución. En el de Flujo Abierto, la diferencia no es muy amplia, sin embargo en diseño y construcción es menos exigente, sin dejar de ser efectivo y aplicable en gran cantidad de elementos, incluidos vehículos automóviles.

Optamos por lo tanto por el Túnel de Viento Subsónico de Flujo Abierto. Por ser de mediana exigencia de diseño y construcción, y por ende de menor inversión, con beneficios igualmente satisfactorios.

Otra consideración que debemos tener en cuenta es que si el túnel será de soplado o aspirado. Recapitulando, la información anteriormente citada, un túnel de viento por soplado, lleva el ventilador en la cámara de estabilización, y se deben ubicar varios estabilizadores de flujo y pantallas para evitar la turbulencia. La ventaja del túnel de aspirado es que genera menos turbulencia, debido a que el viento pasa por las aspas a la salida del túnel, y el acople del ventilador en un difusor de sección circular a la salida resulta más práctico que en el de soplado, si se toma en cuenta que un ventilador es de sección circular y se deberá tratar de aprovechar la mayor cantidad de flujo de aire generado por el mismo. Las velocidades alcanzadas al final serán bastantes cercanas entre estos dos tipos, siendo superiores en el de soplado pero no se aprovechará toda la sección de entrada disponible en la contracción.

En base a lo antes mencionado, podemos concluir que lo más favorable es la utilización de un túnel de viento de succión por las prestaciones y ventajas que brinda, pues en de soplado el rendimiento será menor al tener mayores pérdidas por la cantidad de pantallas que se deben ubicar a la entrada reduciendo su eficiencia al necesitar mayor potencia para compensarlas.

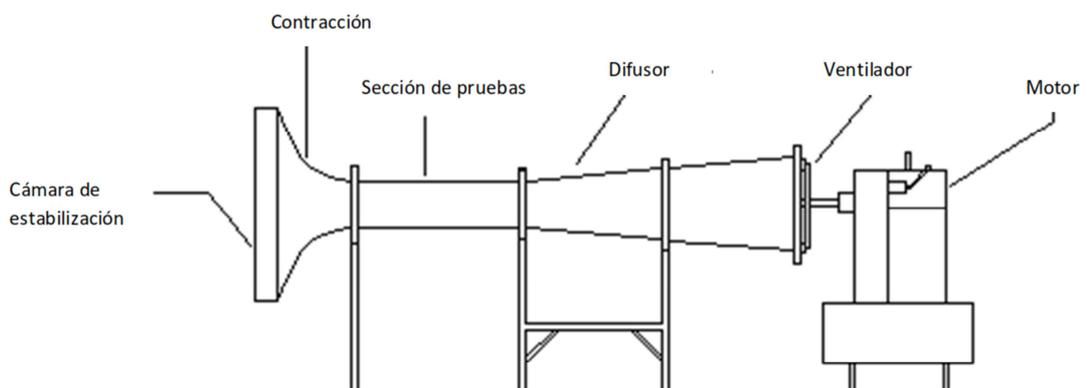


Figura 1.18 Túnel de viento subsónico de succión. Esquema general del prediseño definitivo.

Fuente: <http://www.cvlmallorca.com/teoria2-e.php>

Capítulo 2. Diseño del túnel de viento

Introducción

Un túnel de viento es una herramienta de investigación desarrollada para ayudar en el estudio de los efectos aerodinámicos sobre objetos sólidos. Se generan condiciones a las que se podría someter un objeto en estudio simulando una situación real provocado por el flujo de aire, permaneciendo este estacionario mientras se impulsa el aire alrededor del mismo. Actualmente sus aplicaciones abarcan campos de aeronáutica, náutica, construcciones civiles, deportivas, automovilismo, etc.

Para el análisis, el aire es soplado o aspirado mediante un ventilador o extractor, el mismo que deberá estar dimensionado para alcanzar las condiciones de prueba deseadas o requeridas, así como también sus secciones para reducir pérdidas y mantener un flujo estable. De forma simplificada, se puede ver un túnel de viento de ciclo abierto de aspirado en la figura 2.1. La circulación del aire se indica por las flechas azules de entrada y las rojas de salida.

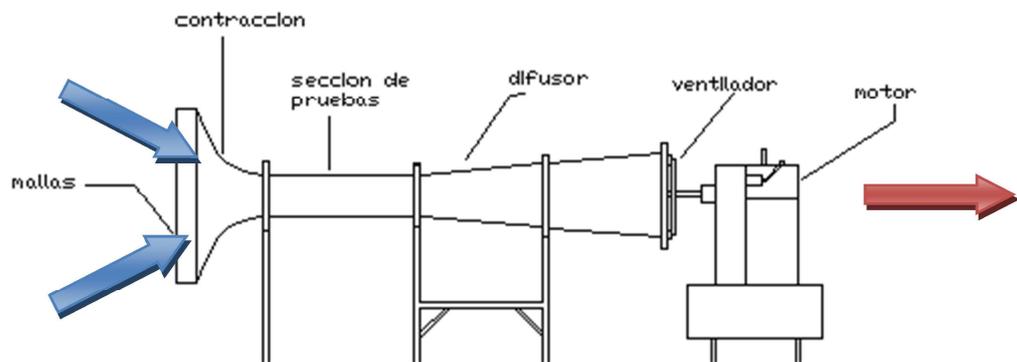


Figura 2.1 Túnel de viento de ciclo abierto de aspirado

Fuente: <http://www.cvlmallorca.com/teoria2-e.php>

Este es el tipo de túnel que se considerará como punto de partida para luego llegar a las condiciones más favorables de diseño, llegando finalmente a un prototipo destinado a su construcción.

2.1 Consideraciones de diseño

En el capítulo anterior se describieron los componentes que conforman el túnel, solo poniendo atención en su función; en este capítulo se volverán a analizar sus elementos pero se pondrá más atención en su geometría para dimensionarlos adecuadamente y alcanzar dos objetivos que son: *llegar a las velocidades requeridas y reducir las pérdidas por efectos de la misma*. Como condiciones para el rango de velocidades que nos podríamos imponer tenemos:

- a) Velocidades muy bajas (menos de 20m/s) no presentan efectos aerodinámicos apreciables [Referencia 3].
- b) Velocidades demasiado elevadas, pero manteniéndose por debajo de las subsónicas, provocan mayores pérdidas dentro del túnel y los equipos propulsores se incrementan en su costo.

Por otro lado, nos plantearemos una hipótesis en cuanto a la sección de pruebas, *no se deberá exagerar su área transversal, debido a que esto exigiría mayor caudal de aire incrementando los costos del túnel y si es muy reducida incrementa las pérdidas*.

Para podernos plantear esta hipótesis nos basamos en la ecuación de Bernoulli, por el valor de h_f que es proporcional a la velocidad, y mientras más se eleve, representará mayores pérdidas; y al hablar de que el caudal deberá ser más elevado al tener una área transversal más grande, es que se deberá mover mayor masa de aire de acuerdo a la ecuación de continuidad, sabiendo que el caudal es constante en todas las secciones.

Establecido esto, podemos ya empezar a plantearnos condiciones iniciales, finales y limitaciones, pero desde luego será necesario imponernos ciertas condiciones que se tendremos que analizar para tomar una decisión final.

En la figura 2.2 se muestran esquemáticamente un túnel de viento de aspirado, partiremos de este túnel de viento para nuestro diseño final.

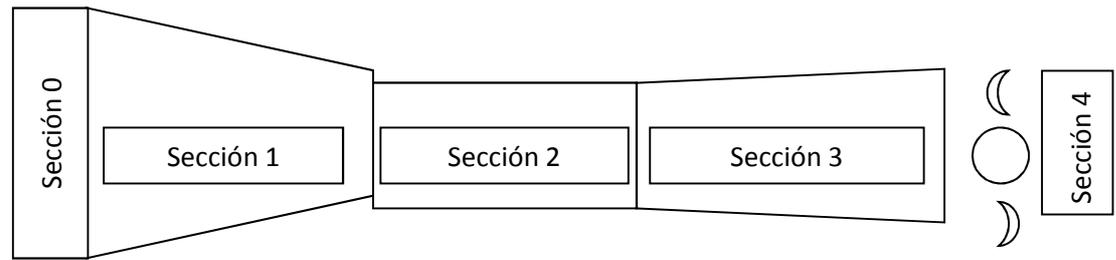


Figura 2.2. Esquema y numeración de secciones del túnel

Sección (0) → Sección de estabilización (mallas y/o pantallas)

Sección (1) → Contracción o tobera

Sección (2) → Sección de prueba

Sección (3) → Difusor

Sección (4) → Ventilador

2.2 Diseño de la Sección de pruebas

La sección de pruebas es la cámara en la que se realizan las mediciones y observaciones, su forma y tamaño son en gran parte determinado por los requisitos de prueba. *La sección prueba debe ser lo suficientemente larga para que las perturbaciones del flujo resultante de la contracción sean lo suficientemente amortiguadas antes de alcanzar el objeto de prueba y lo suficientemente ancha y alta para que los objetos en evaluación tengan suficiente flujo de aire* [Referencia 1 Cap. 8].

Sin embargo, se debe tener cuidado de no exagerar su longitud, esto daría lugar a la separación de la capa límite cuando entra en el difusor y otras pérdidas que se traducen en pérdidas de potencia.

Nos impondremos las dimensiones y datos de velocidad, que posteriormente deberemos ir variando hasta llegar a determinar cuáles son los óptimos, tanto por eficiencia como por costos que serán determinantes en los resultados finales.

2.2.1 Dimensiones propuestas

Velocidad (v) = 50m/s = 180km/h

Altura (a) = 300mm

Ancho (b) = 300mm

Longitud (L) = 500mm

Sección rectangular = 0.09m²

Para los cálculos, es necesario determinar las propiedades termodinámicas de la zona de destino en la que trabajará el túnel. Se conoce que será para la ciudad de Cuenca, que se encuentra a 2550msnm. Con este dato, podemos obtener los datos experimentalmente o, consultando en datos tabulados.

Hemos revisado datos tabulados, que nos dan suficiente información con buena aproximación sobre las propiedades que necesitamos conocer, pero al no contar con el dato a esta altura exactamente, es necesario interpolar para llegar a determinarlos. En la tabla 2.1 se muestran los datos tabulados e interpolados de los mismos para la altura deseada.

Altura [msnm]	Presión [kPa]	Densidad [kg/m ³]	Viscosidad dinámica [kg/m·s]
2400	75,63	0,967	1,07E-05
2550	75,16	0,952	1,23E-05
2600	73,76	0,947	1,70E-05

Tabla 2.1 Propiedades termodinámicas de Cuenca

Fuente : [Referencia 4]

Como resumen de las propiedades tenemos:

Altitud de Cuenca = 2.550 msnm

Presión = 75.16 [kPa]

Densidad = 0.952 [kg/m³]

Viscosidad = 1.07E-05 [kg/m·s]

Estos datos son las bases para todos los cálculos, no es lo mismo diseñar para una ciudad a 0msnm o para 3000msnm, la altura hace variar los demás datos y al final los resultados no serán muy favorables cuando el túnel empiece a funcionar en el lugar para el que no ha sido diseñado.

Con todos estos resultados, tanto dimensiones como propiedades que son nuestras condiciones físicas iniciales, empezaremos a realizar el cálculo.

2.2.2 Determinación del tipo de flujo

Mediante la Ecuación del número de Reynolds, se puede determinar qué tipo de flujo se obtendrá al hacer fluir el aire a través de una sección cerrada. *Nuestro diseño tiene una sección no circular*, por tanto, como se vio en el capítulo anterior, al tener este tipo de sección y poder aplicar la ecuación de Re para determinar el tipo de flujo, es necesario hacer una aproximación al diámetro hidráulico utilizando las aproximaciones de la figura 2.3.

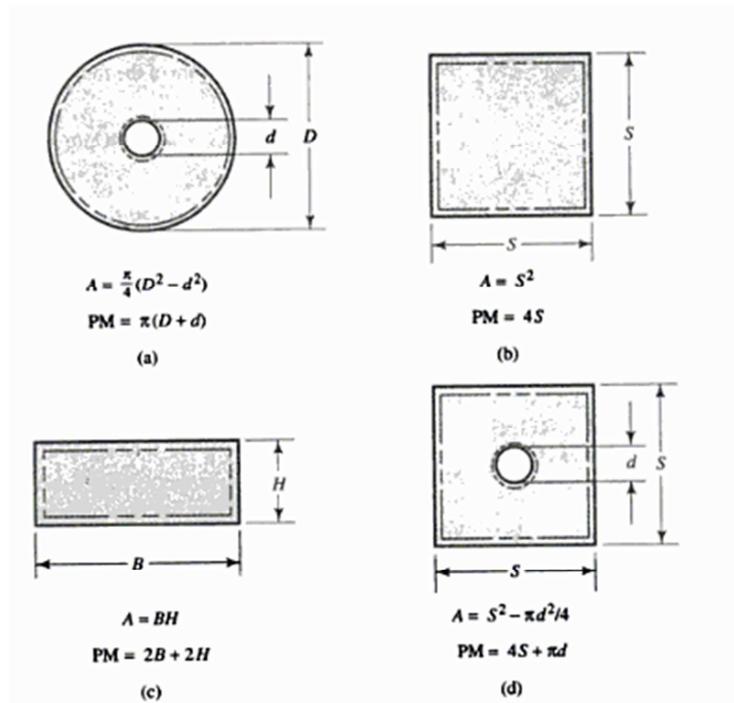


Fig. 2.3 Cálculo de secciones transversales y Perímetro mojado

Fuente: Mott Robert. Mecánica fluidos Aplicada 4ta Edición. Editorial Prentice Hall

Hispanoamericana SA. México DF –México. 1996

La sección de pruebas, deberá tener una sección cuadrada de 300mm x 300mm, esto nos indica que deberemos utilizar las ecuaciones de la figura 2.3b:

Área transversal (A): mediante las ecuaciones que se presentan para una sección cuadrada vamos a calcular el área trasversal con la ayuda de la ecuación 2.1:

Ecuación 2.1 Cálculo de la área transversal de una sección cuadrada

$$A = s^2$$

dónde:

s: lado del cuadrado

reemplazando datos:

$$A = (0.3m)^2$$

tendremos un área transversal que será de:

$$A = 0.09m^2$$

para la sección de pruebas que será esta área por donde haremos circular el aire con la velocidad necesaria para las pruebas.

Perímetro mojado (PM): tenemos la ecuación 2.2 que nos define el perímetro mojado como 4 veces lado *s* de la sección cuadrada:

Ecuación 2.2 Cálculo del perímetro mojado PM

$$PM = 4s$$

Reemplazando datos:

$$PM = 4 \cdot 0.3 m$$

obtenemos:

$$PM = 1.2 m$$

este dato y el área transversal nos servirá para calcular el diámetro hidráulico.

Diámetro hidráulico (D_h): resulta de la relación entre el área transversal A y el perímetro mojado PM , y se presenta en la ecuación 2.3:

Ecuación 2.3 Cálculo del diámetro hidráulico

$$D_h = \frac{4A}{PM}$$

sustituyendo:

$$D_h = \frac{4(0.09m^2)}{1.2m}$$

finalmente:

$$\mathbf{D_h = 0.3m}$$

El diámetro hidráulico es de 0.3m, es este el valor final para determinar Re , y lo reemplazaremos en la ecuación 2.4

Ecuación 2.4 Cálculo del número de Reynolds Re

$$Re = \frac{vD_h\rho}{\mu}$$

donde:

$$\rho = 0,952kg/m^3 \text{ densidad del aire de Cuenca}$$

$$\mu = 1,23E - 05kg/m \cdot s \text{ es la viscosidad del aire en Cuenca}$$

Reemplazando datos:

$$Re = \frac{50m/s(2 \cdot 0.075m) * 0.952kg/m^3}{1,23E - 05kg/m \cdot s}$$

$$\mathbf{Re = 1160975,61}$$

El número de Reynolds para la sección de pruebas es de 1160975,61 con este valor podemos determinar el tipo de flujo que vamos a tener dentro de la sección de pruebas:

Según [Referencia 1], un flujo es laminar si Re es menor o igual a 2100, y turbulento si Re es mayor o igual a 4000. Por tanto, el flujo que se tendrá en la sección de prueba será turbulento, al tener nuestro Re en $1.16E6$.

Lo primordial, para el análisis aerodinámico, es que el flujo de aire sea laminar, es decir $Re \leq 2100$. Si realizamos las pruebas con Re obtenido, los resultados se alterarían completamente ubicándonos en un margen alejado del comportamiento real.

Para reducir la turbulencia, manteniendo el número de Re , *se deben ubicar pantallas en la entrada de la zona de estabilización, y posteriormente un correcto diseño de la zona de contracción para mantener el flujo laminar que es el flujo deseado para las pruebas.*

2.2.3 Cálculo del caudal de aire necesario

El caudal es el volumen de fluido que avanza por unidad de tiempo, es muy importante dentro del diseño del túnel, siendo este el primer parámetro que determinará las prestaciones que vamos a necesitar del ventilador. También se pueden determinar las velocidades en cada sección y otros datos como son las presiones y pérdidas. El caudal (Q) se expresa en la ecuación 2.5:

Ecuación 2.5 Cálculo del Caudal

$$Q = vA$$

reemplazando datos:

$$Q = 50 \text{ m/s}(0.09 \text{ m}^2) =$$

tendremos:

$$Q = 4.5 \text{ m}^3/\text{s}$$

que es el caudal de aire necesario que debe fluir en la sección de pruebas, para alcanzar la velocidad máxima requerida para los análisis.

Deberemos también determinar el flujo másico - cantidad de masa de aire que fluye por unidad de tiempo – para luego poder utilizar la ecuación de continuidad entre las secciones, que junto con la ecuación de Bernoulli se calcularán sus velocidades y presiones. Con los datos ya conocidos de la sección de pruebas, y la ecuación 2.6 del flujo másico tendemos:

Ecuación 2.6 Cálculo de flujo másico

$$\dot{m} = \rho \cdot Q$$

reemplazando datos

$$\dot{m} = 0,952 \text{ kg/m}^3 \cdot (4.5 \text{ m}^3/\text{s})$$

tenemos:

$$\dot{m} = 4.284 \text{ kg/s}$$

El flujo másico para la sección de pruebas será de 4.284 kg/s, que será la cantidad de aire que deberá estar circulando por esta sección para alcanzar la velocidad planteada.

2.3 Análisis dimensional del flujo de aire en el túnel

Con el análisis dimensional, determinaremos las pérdidas de presión o carga que tendremos en los conductos o secciones del túnel. Estas pérdidas se podrán determinar mediante coeficientes obtenidos de manera experimental y se los encuentra en tablas o gráficas. La forma de determinar estos coeficientes varía de acuerdo a la forma geométrica de un componente o la longitud de un componente de sección uniforme.

Se denominan pérdidas mayores a las que se presentan en conductos de sección uniforme con una longitud L , y pérdidas menores a las que se obtienen en accesorios como válvulas, codos, expansiones o contracciones, etc.

Considerando nuestra propuesta de diseño para el túnel, tenemos dos componentes de sección variable que son la contracción (tobera) y el difusor que

varían su sección. Resumiendo entonces tendremos que calcular una pérdida mayor en la sección de prueba y dos menores antes y después de esta sección.

2.3.1 Pérdidas en la sección de pruebas

Las pérdidas mayores se determinan con la ecuación 2.7, en forma genérica se considera un diámetro D pero la hemos cambiado por D_h , la razón se debe a que originalmente esta ecuación se usa para conductos de sección circular constante, y nuevamente la hemos adaptado para nuestras necesidades que es un conducto de sección no circular uniforme, reemplazando D por D_h tenemos la aproximación por el diámetro hidráulico. Este mismo reemplazo se utilizó para determinar el tipo de flujo con Re .

Ecuación 2.7 Cálculo de pérdidas mayores

$$h_{L\ mayor} = f \frac{L}{D_h} \frac{V^2}{2g}$$

donde:

f → Factor de fricción

V^2 → Velocidad en la sección de pruebas

g → Gravedad

D_h → Diámetro hidráulico de la sección de pruebas

L → Longitud del conducto

El término f viene determinado por el tipo de flujo, sabemos que tendremos flujo turbulento por lo que podemos utilizar la ecuación de Colebrook o el diagrama de Moody para determinarlo [Referencia 1].

Ecuación 2.8 Ecuación de Colebrook

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon / (D_h)}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

Para cualquiera de los dos casos, es necesario determinar la rugosidad equivalente ϵ del material a usar. La sección de prueba deberá ser de vidrio o plástico (para observar las pruebas), pero en general internamente el túnel deberá tener una rugosidad equivalente bastante baja para reducir las pérdidas por fricción. La tabla 2.2 nos muestra rugosidades equivalentes de algunos materiales.

Rugosidad equivalente para conductos nuevos

Conducto	Rugosidad Equivalente ϵ	
	Pies	Milímetros
Acero de remaches	0.003 – 0.03	0.9 – 9.0
Concreto	0.001 – 0.01	0.3 – 3.0
Tubería de madera	0.0006 – 0.003	0.18 – 0.9
Hierro fundido	0.00085	0.26
Hierro galvanizado	0.0005	0.15
Acero comercial o hierro forjado	0.00015	0.015
Conducto estirado	0.000005	0.0015
Plástico, Vidrio	0.0 (liso)	0.0 (liso)

Tabla 2.2 Rugosidad equivalente para conductos nuevos

Fuente: Referencia 1

La rugosidad equivalente para el vidrio es teóricamente cero, aunque no es conveniente despreciar esta rugosidad, tomaremos el dato del material de la tubería estirada que es de 0.0015mm para hacer los cálculos. La aplicación de la ecuación de Colebrook es algo tediosa por los valores que hay que reemplazar y las iteraciones que se deben realizar, sin embargo es más precisa que el método gráfico usando el diagrama de Moody. Utilizaremos los dos debido a que para las iteraciones es necesario partir de un valor inicial hasta llegar a uno más aproximado.

En la figura 2.4, se muestra el Diagrama de Moody. Se puede observar la doble dependencia de f con Re y ϵ/D , los mismos que tienen valores de $Re = 1.16 \cdot 10^6$ y ϵ/D

= $0.0015E-3/D_h \approx 5 \cdot 10^{-5}$ y al aproximarlos dentro del diagrama de Moody obtendremos el primer valor de f .

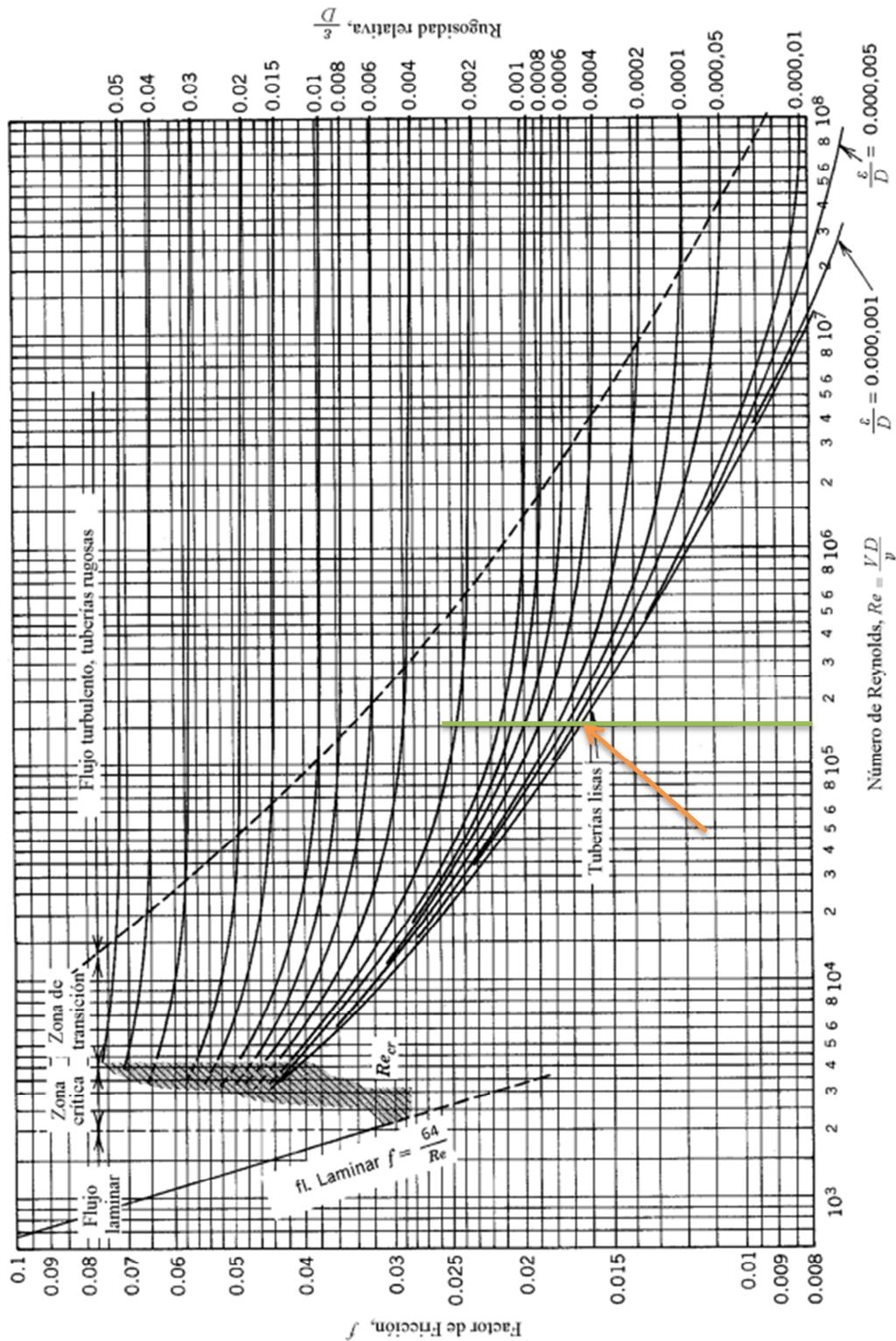


Figura 2.4 Diagrama de Moody. Dependencia del Factor de fricción con Reynolds y la rugosidad relativa

Fuente : Referencia 1

El factor de fricción apreciado es de 0.0175 aproximadamente (apuntado por la flecha), vemos en la tabla que el valor superior es de 0.02, por lo que lo tomaremos para iniciar la iteración con la ecuación de Colebrook hasta que la diferencia entre los valores iterados sea < 0.001 .

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{0.0015/0.3}{3.7} + \frac{2.51}{1.16E5 \sqrt{f_n}} \right)$$

Reemplazando en f_n el valor de 0.02 y el nuevo valor de f nos da 0.0109, y su diferencia es:

$$f - f_n = 0.02 - 0.0109 = 0.0091 > 0.001$$

lo que nos indica que es necesaria una segunda iteración para tener un valor < 0.001 .

Volviendo a reemplazar el valor de f_n por el nuevo valor de f obtenido, tenemos a $f = 0.0115$ y nuevamente restando

$$f - f_n = 0.0091 - 0.0115 < 0.001$$

el resultado es negativo y por su puesto < 0.001 , lo que nos indica que tenemos finalmente el valor del factor de fricción $f = \mathbf{0.0115}$ para calcular las pérdidas en la sección de pruebas.

De la ecuación 2.7 reemplazamos

$$h_{L \text{ mayor}} = f \frac{L}{D_h} \frac{V^2}{2g} = 0.0115 \left(\frac{0.4m}{0.3m} \right) \left(\frac{(50m/s)^2}{2 * 9.81m/s^2} \right) =$$

$$\mathbf{h_{L \text{ mayor}} = 1.954m}$$

Este resultado nos indica que las pérdidas de carga que habrá en la sección de pruebas es de 1.954m, es un valor elevado por las velocidades altas que se manejan.

Es igualmente importante calcular las pérdidas de carga para las demás secciones y sumarlas para poder calcular el equipo de propulsión necesario, que superará o por lo menos igualará las presiones y caudales proyectados.

2.4 Sección de contracción

Esta sección cumple dos funciones principales; la primera es estabilizar el flujo que entra con gran turbulencia, y la segunda incrementar la velocidad del flujo de aire para pasarlo a la sección de pruebas.

Básicamente, la sección de contracción es una tobera convergente y tiene dos propiedades, incrementa la velocidad respecto de su entrada pero reduce la presión respecto al mismo punto, y al tener una variación de presión, puede variar la densidad, ley que se cumple en los flujos compresibles. Al variar la densidad es necesario entonces determinarla para poder aplicar la ecuación de Bernoulli y continuar con los cálculos, sea cualesquiera su valor, mayor o menor al inicial, es una nueva variable desconocida.

Podemos asumir que no existe variación de la densidad si no existe cambio significativo de la presión, es decir si el aire se comporta como flujo incompresible, pero para esto necesitamos certificar mediante alguna ley, ecuación o teoría.

Nuevamente recurrimos al capítulo I sección 1.6 que trata sobre flujo incompresible. Para poder determinar si en estas condiciones el aire es o no compresible, tenemos que calcular el número de mach M (Ec. 2.9) y debe estar por debajo de 0.3, si es así podremos considerar constante a la densidad en todos los puntos del túnel y proceder con los cálculos.

Ecuación 2.9 Cálculo de número de Mach

$$M = \frac{v}{v_s}$$

donde:

M = Numero de Mach

v = Velocidad propuesta en la sección de pruebas

v_s = Velocidad del sonido

reemplazando los valores en la ecuación

$$M = \frac{50m/s}{340m/s}$$

$$M = 0.147 < 0.3 \text{ Flujo incompresible}$$

el resultado es menor que 0.3, lo cual nos indica que lo podemos tratar como un fluido incompresible, asumiendo la densidad constante en todos los puntos.

Para realizar los cálculos de la contracción, nuevamente nos vamos a imponer las dimensiones de entrada, y determinar otras propiedades.

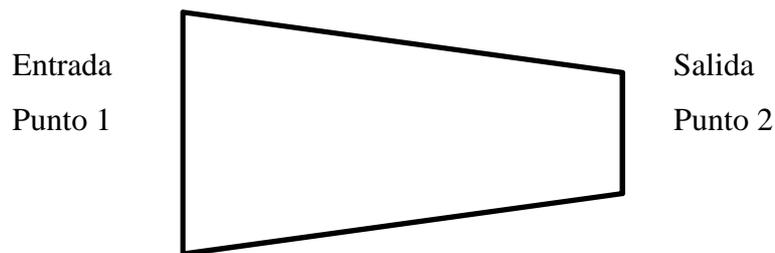


Figura 2.5 Esquema de la sección de contracción

Fuente: Autores

$v_2 = 50m/s$ Velocidad de salida de la contracción

$A_1 = 1m^2$ Área de entrada de la contracción

$A_2 = 0.09m^2$ Área de salida de la contracción

$\rho = 0.952kg/m^3$ Densidad

$P_1 = 75160Pa$ Presión atmosférica

2.4.1 Calculo de la velocidad en la entrada de la contracción

Sabemos que el flujo másico en un conducto será teóricamente el mismo en todas las secciones. Por lo tanto, se deberá cumplir la ecuación de continuidad (Ecuación 2.10)

Ecuación 2.10 Ecuación de continuidad

$$\dot{m} = \dot{m}_0 = \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dots = \dot{m}_n$$

y en términos de velocidad

Ecuación 2.11 Ecuación de continuidad en términos de velocidad

$$\rho \cdot v \cdot A = \rho_0 \cdot v_0 \cdot A_0 = \rho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot A_2 = \dots = \rho_n \cdot v_n \cdot A_n$$

Si revisamos la ecuación 2.4, nos indica que *el caudal se determina al multiplicar la velocidad por la área transversal de un conducto*, por lo tanto, para que se cumpla la ecuación de continuidad a través de todas las áreas transversales – y dentro del túnel hay varias – deberá entonces incrementarse o reducirse la velocidad de forma inversamente proporcional al área transversal. De esta manera se explica el por qué en un tobera convergente, la velocidad se incrementa al reducirse su área, y siguiendo este camino, a su entrada la velocidad deberá ser menor por ser un área mayor.

En la ecuación 2.12, hemos limitado la ecuación a la contracción, según el esquema de la figura 2.5.

Ecuación 2.12 Caudal entre la entrada y salida de la contracción

$$\rho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot A_2$$

Tenemos el dato de la velocidad y área en el punto 2 que es la misma que la sección de pruebas, el área de entrada nos hemos impuesto y demostramos mediante el número de Mach que la densidad se puede asumir constante al tratarse al aire como un fluido incompresible. Simplificando la ecuación 2.12 nos queda

Ecuación 2.13 Calculo de la velocidad a la entrada de la contracción

$$v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2$$

reemplazando y despejando tenemos

$$v_1 \cdot 1m^2 = 50m/s \cdot 0.09m^2$$

$$v_1 = \frac{50m/s \cdot 0.09m^2}{1m^2}$$

$$v_1 = 4.5m/s$$

que es un resultado de esperarse por la afirmación hecha en el párrafo anterior. Si multiplicamos esta velocidad por el área transversal a la entrada de la contracción que es $1m^2$ nos dará, el mismo caudal de $4.5m^3/s$ que calculamos para la sección de prueba. Esto nos indica que nuestros cálculos van en concordancia con la teoría.

2.4.2 Cálculo de presiones de la contracción:

Para determinar las presiones entre dos puntos, es decir entre la entrada y la salida, podemos acudir a la ecuación de Bernoulli, que es la que se cita a continuación:

Ecuación 2.14 Ecuación de Bernoulli para el cálculo de las presiones

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho \cdot v_1^2 + \gamma \cdot z_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho \cdot v_2^2 + \gamma \cdot z_2$$

Esta ecuación, es una de las más importantes en mecánica de fluidos, y ayuda a resolver gran cantidad de problemas que se presentan en la vida real. Sin embargo, según [Referencia 1] para poderla aplicar deben reunirse tres condiciones que son: El flujo debe ser de régimen estacionario (no variar con el tiempo), debe ser incompresible y no debe ser viscoso.

Por fortuna, cumplimos con las dos primeras condiciones que se exigen para aplicar dicha ecuación, la tercera no se podría alcanzar en ningún momento, debido a

que todo fluido tiene viscosidad; por otra parte el aire tiene viscosidad muy baja, con lo cual podemos asumir que es un fluido no viscoso y aplicar esta ecuación.

Alguna consideración adicional sería en el fluido en régimen estacionario; al principio se dijo que es necesario variar la velocidad del flujo de aire para realizar pruebas en diferentes circunstancias, sin embargo, la variación no será de forma continua, es decir una vez que se llegue a la velocidad requerida (por ejemplo de 10m/s a 15m/s), se mantendrá esta velocidad hasta que termine la prueba en dichas condiciones, esto es, una prueba se hará en un promedio de diez minutos y habrá otra variación de velocidad, por lo que es factible ubicarnos en un flujo de fluido en régimen estacionario, cumpliendo las tres condiciones para la aplicación de la ecuación de Bernoulli y calcular las presiones.

Nuestro diseño propuesto es de un túnel de flujo de aire horizontal, es más, deberá estar completamente nivelado para realizar las pruebas. En la ecuación 2.14 vemos el término $\gamma \cdot z$ que se refiere a la energía potencial, que se genera al tener diferencia de altura. Al ser la altura $z_1 = z_2$ por ser un túnel de flujo de aire horizontal, estos términos se eliminan y la ecuación se simplifica a:

Ecuación 2.15 Simplificación de la ecuación de Bernoulli

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

Conocemos casi todos los valores de la ecuación, es decir las velocidades, la densidad y la presión P_1 que es la atmosférica, y el valor que buscamos es la P_2 siendo esta la presión a la salida de la contracción. Reemplazando los valores conocidos y despejando el valor que nos interesa tenemos:

$$75160Pa + \frac{1}{2} 0.952kg/m^3 \cdot (4.5m/s)^2 = P_2 + \frac{1}{2} 0.952kg/m^3 \cdot (50m/s)^2$$

$$P_2 = \left(75160Pa + \frac{1}{2} 0.952kg/m^3 \cdot (4.5m/s)^2 \right) - \left(\frac{1}{2} 0.952kg/m^3 \cdot (50m/s)^2 \right)$$

$$\mathbf{P_2 = 73979.64Pa}$$

Nuevamente conviene compararla con la presión inicial o a la entrada del túnel, con el objetivo de comprobar que nuestros cálculos concuerden con la teoría.

$$P_1 - P_2 = 75160[Pa] - 73979.64[Pa] = 1181.36[Pa] = 1.19[kPa]$$

Vemos que la presión en P2 ha disminuido y la diferencia entre los dos es de 1.19kPa. Se cumple entonces los cálculos con la teoría que es: cuando se reduce un área transversal se incrementa la velocidad pero se pierde presión. Estos resultados nos indican un buen camino en el dimensionamiento y aplicación de las ecuaciones.

2.4.3 Diseño de la geometría de la contracción

El diseño de la sección de contracción, es de igual importancia que las demás secciones, como se dijo en párrafos anteriores, de este depende un adecuado flujo de aire para reducir la turbulencia y también las pérdidas.

Primero partiremos de una geometría obtenida a partir de una ecuación polinómica de quinto orden tomada de [Referencia 2], que sugiere que el radio de curvatura a la salida sea mayor que a la entrada. Las cotas y la forma de la sección de pruebas tentativa se muestran en la figura 2.6.

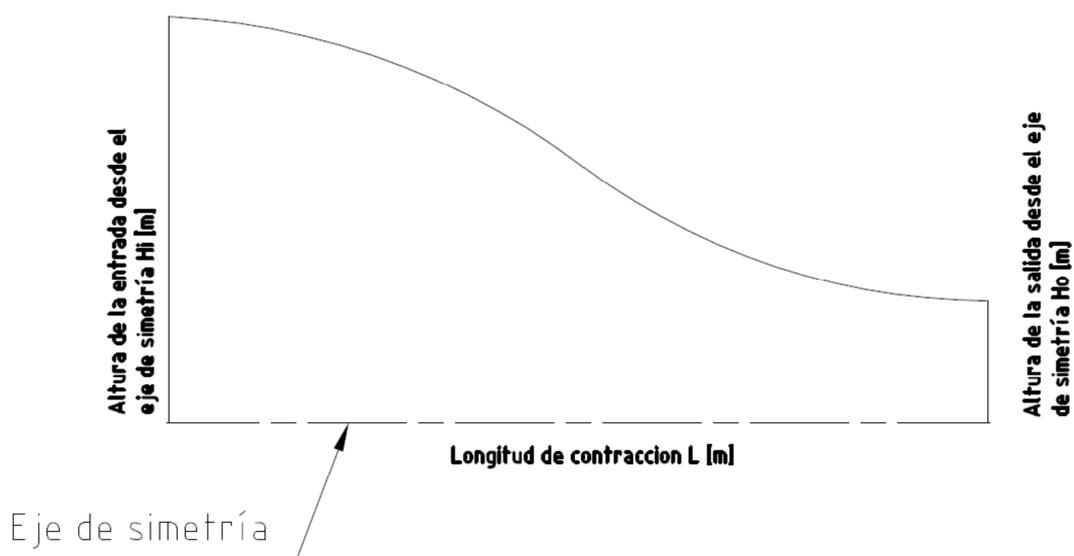


Figura 2.6 Cotas de la geometría de la contracción

Fuente: Autores

La ecuación 2.16, es la ecuación que se va a utilizar para obtener la curva. Una vez generada, se tendrá que evaluar las pérdidas que provoca la geometría y si es factible habremos terminado con su diseño, de lo contrario será necesario redimensionarla hasta tener resultados satisfactorios.

Ecuación 2.16 Ecuación polinómica de 5to orden para definir la curvatura de la contracción.

$$h = [-10 + 15(\xi)^4 - 6(\xi)^5](H_i - H_o) + H_i$$

$$\xi = \frac{x}{L}$$

donde:

ξ = Razón de longitud

x = Longitud de la contracción parcializada en pequeños tramos [m]

L = Longitud de la contracción [m]

H_i = Altura de la contracción en la entrada de aire a partir del eje de simetría [m]

H_o = Altura de la contracción en la salida de aire a partir del eje de simetría [m]

h = Altura de la contracción a una longitud x [m].

Al introducir valores en la ecuación 2.16 descrita anteriormente vamos a generar la gráfica del perfil de la sección de contracción que se presenta en la figura 2.7, para los valores arrojados vamos a realizar el cálculo de pérdidas, de esta manera vamos a determinar la factibilidad de nuestro diseño.

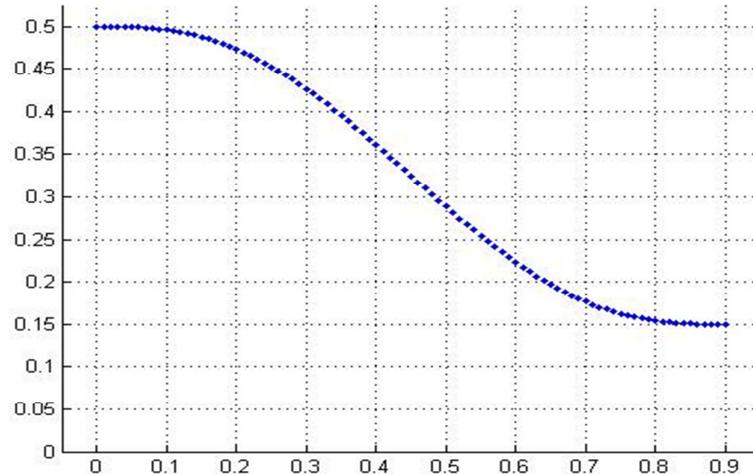


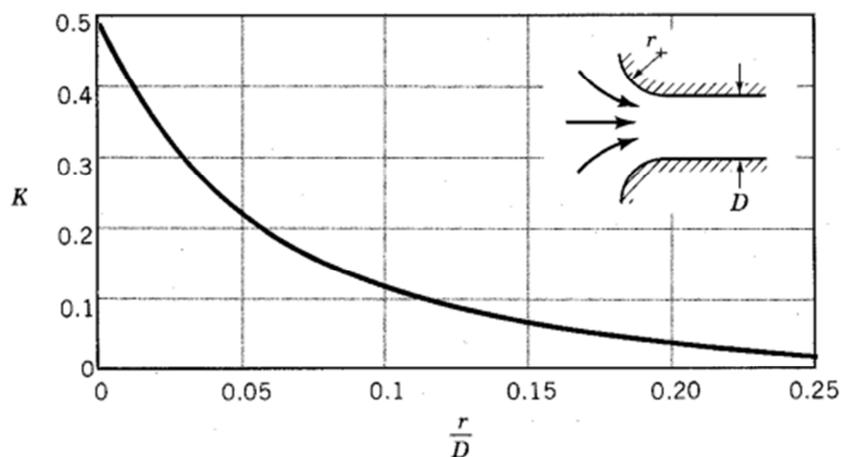
Figura 2.7 Perfil lateral de la sección de contracción

Fuente: Autores

Con dimensiones establecidas obtenidas a partir de la ecuación se podrán estimar las pérdidas de la sección de contracción.

2.4.4 Cálculo de pérdidas de la contracción

La manera más práctica de determinar las pérdidas de esta sección, es el uso de tablas que existen en varios textos de mecánica de fluidos al tratar el tema de conductos. Definiendo a la sección de contracción como una tobera (definición que nos sirvió para los cálculos) podemos determinar un coeficiente en base a la figura 2.8.

Figura 2.8 Coeficiente de pérdidas k en función del radio de curvatura

Fuente: Referencia 1

Vemos que es necesario determinar una relación entre el radio de contracción r y el diámetro final al que se reducirá y vendría a ser D_h para finalmente trazar una recta vertical que parta desde el valor de esta relación, tal como indica la figura. La intersección entre esta recta y la curva indicada, nos dará el valor del coeficiente k_c que deberá ser reemplazada en la ecuación 2.17.

Ecuación 2.17 Calculo de perdidas

$$hf = k_c \frac{V^2}{2g}$$

De donde:

k_c → Coeficiente de pérdidas de contracción.

V → velocidad a la salida de la sección de contracción

g → gravedad

Teniendo prediseñada una geometría de la sección de contracción, y al acotar r con un valor de 1000mm y el D_h ya calculado con valor de 300mm, la relación entre estos dos es aproximadamente 3.33, al trazar una recta vertical desde esta valor en el eje x de la figura 2.8 la intersección de esta con la curva mostrada, nos da un valor aproximado de 0.03, y reemplazando en la ecuación 2.17 obtenemos.

$$hf = k_c \frac{V^2}{2g}$$

$$hf = 0.03 \left[\frac{(50m/s)^2}{2(9.81m/s^2)} \right]$$

$$hf = 3.8 \text{ m}$$

2.5 Direccionador de flujo

Es un dispositivo que se ubica al inicio del túnel de viento, rectifica el flujo de aire que ingresa al túnel. Existen algunas alternativas para su geometría, estos son el hexagonal, circular y cuadrado como se ve en la figura 2.9, y deberán ir dispuestos en forma de un panel. Para seleccionar cual es el mejor, se deberá considerar las pérdidas que provoque cada uno y además la complejidad de su construcción, en el siguiente tema vamos a ocuparnos de ello.

2.5.1 Calculo de perdidas

En la figura 2.9, vemos las formas que puede tener un direccionador de flujo y tenemos que para conductos de sección cuadrada, el coeficiente de pérdidas k es de 0.25, para el circular es de 0.3 y para el hexagonal es de 0.2. Es evidente que la forma más conveniente de construir es la de secciones hexagonales por tener el coeficiente más pequeño, sin embargo, algo muy importante es la construcción del mismo y la precisión que deberá tener para que todos los hexágonos sean uniformes. Considerar el de forma circular, resultaría lo menos conveniente por presentar el coeficiente más elevado, pero por otro lado, su construcción vendría a ser relativamente simple, es decir que podemos apilar tubitos de material liso, hasta formar un cuadrado de las dimensiones de la entrada de la contracción.

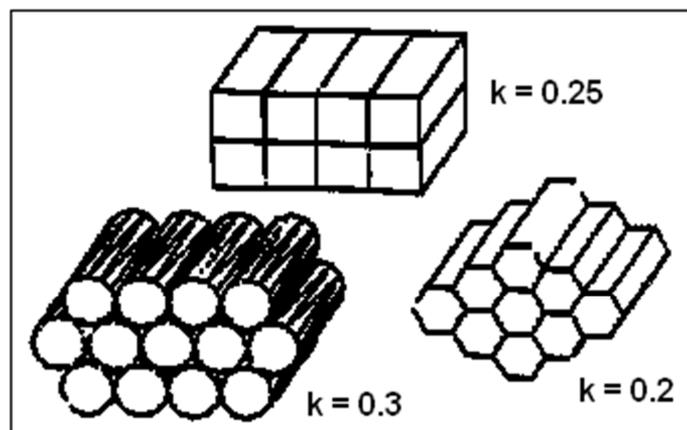


Figura 2.9: Coeficientes de perdidas

Fuente:

<http://bdigital.eafit.edu.co/PROYECTO/P620.0042CDA174/marcoTeorico.pdf>

De igual manera, deberán ser consideradas las pérdidas que genere este direccionador de flujo, y se lo puede hacer, considerando la misma ecuación 2.17 ocupada para en la sección de contracción. Reordenando la ecuación y reemplazando datos obtendremos:

Ecuación 2.18 Cálculo de pérdidas en el direccionador de flujo

$$h_f = k_{df} \frac{V^2}{2g}$$

De donde:

k_{df} → Coeficiente de pérdidas del direccionador de flujo.

V^2 → Velocidad a la salida de la sección de contracción

g → gravedad

El valor de V calculado anteriormente es de 4.5m/s y reemplazando tenemos

$$h_f = 0.3 \left[\frac{(4.5m/s)^2}{2(9.81m/s^2)} \right]$$

$$h_f = 0.31m$$

Que resulta ser pequeño comparado con la sección de contracción, por la razón de que la velocidad es pequeña, a pesar de tener un coeficiente mayor.

2.6 Difusor

El objetivo del difusor dentro del túnel es disminuir la velocidad del flujo de aire lentamente para evitar la separación de la capa límite que se formó en la sección de pruebas. La manera más conveniente de reducir la velocidad es con una expansión gradual para reducir las pérdidas y evitar la turbulencia en esta sección, manteniendo así un flujo uniforme dentro del túnel.

Si revisamos la figura 1.12 del tema 1.4.2 *Contribución de pérdidas de eficiencia de los componentes del túnel*, observamos que este componente es el de mayor contribución a las pérdidas de la eficiencia del túnel, y en segundo lugar está el direccionador de flujo que aporta aproximadamente con la mitad de las pérdidas respecto del difusor.

Es razón bastante significativa para tener cuidado en el diseño de este componente, y en el siguiente tema se tratará de los cálculos referidos al mismo, según los criterios recomendados por la referencia [2].

2.6.1 Cálculo del difusor

Para el cálculo y dimensionamiento del difusor con expansión gradual, se tienen tablas obtenidas de manera experimental y son muy utilizadas no solo para expansiones o difusores, sino para otros elementos accesorios. Para ello debemos calcular el ángulo de apertura del difusor, pero este debe estar en función de la relación de áreas, y con este dato obtener el coeficiente de pérdidas que nos dará como resultado la pérdida de carga o h_L .

La relación de áreas viene dado entre el área de salida A_2 y el área de entrada al difusor A_1 , esta última será el área de salida de la sección de pruebas calculada de acuerdo al diámetro hidráulico.

Ecuación 2.19 Relación de áreas del difusor

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

Dónde:

A_2 → Es el área de salida del difusor (m)

A_1 → Es el área de entrada del difusor (m)

Conocemos el A_1 y será necesario imponerse un A_2 que más tarde se deberá modificar cuando se tenga el dato real del diámetro del ventilador adecuado para nuestro diseño y disponible en el mercado.

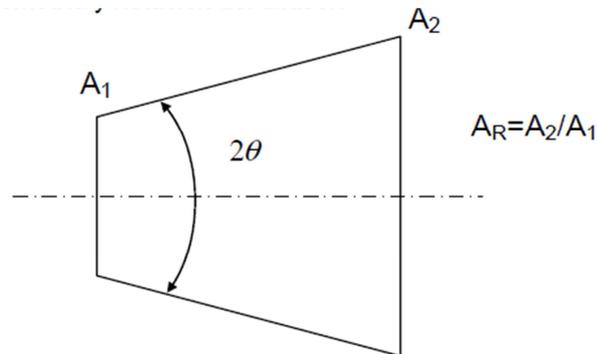


Figura 2.10 Geometría y notación del difusor

Fuente: Referencia 2

Con un A_1 de 0.09m^2 conocida, y un radio r_d impuesto de 300mm tenemos un A_2 de 0.28m^2 de lo que sigue que:

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

$$A_R = \frac{0.283}{0.09}$$

$$A_R = 3.11$$

A partir de la relación de áreas podemos obtener el ángulo de apertura del difusor mediante la ecuación 2.20.

Ecuación 2.20. Calculo del ángulo de apertura del difusor.

$$\theta = \arctan\left(\frac{R_2 - R_1}{L}\right) = \arctan\left(\frac{1}{2} \frac{\sqrt{A_R - 1}}{\frac{L}{D_h}}\right)$$

De donde:

R_2 → Radio hidráulico de la sección final (m)

R_1 → Radio de la sección inicial (m)

A_R → Relación de áreas

L → Longitud del difusor

D_h → Diámetro hidráulico

otro dato que nos impondremos es la longitud del difusor que será de $L=1000\text{mm}$.

$$\theta = \arctan\left(\frac{R_2 - R_1}{L}\right) = \arctan\left(\frac{\frac{1}{2}\sqrt{A_R - 1}}{\frac{L}{D_1}}\right)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\frac{1}{2}\sqrt{3.11 - 1}}{\frac{1000}{300}}\right)$$

$$\theta = 12.29\text{deg}$$

En la figura 2.11 tenemos la tabla de los valores del coeficiente de pérdidas en función del ángulo calculado.

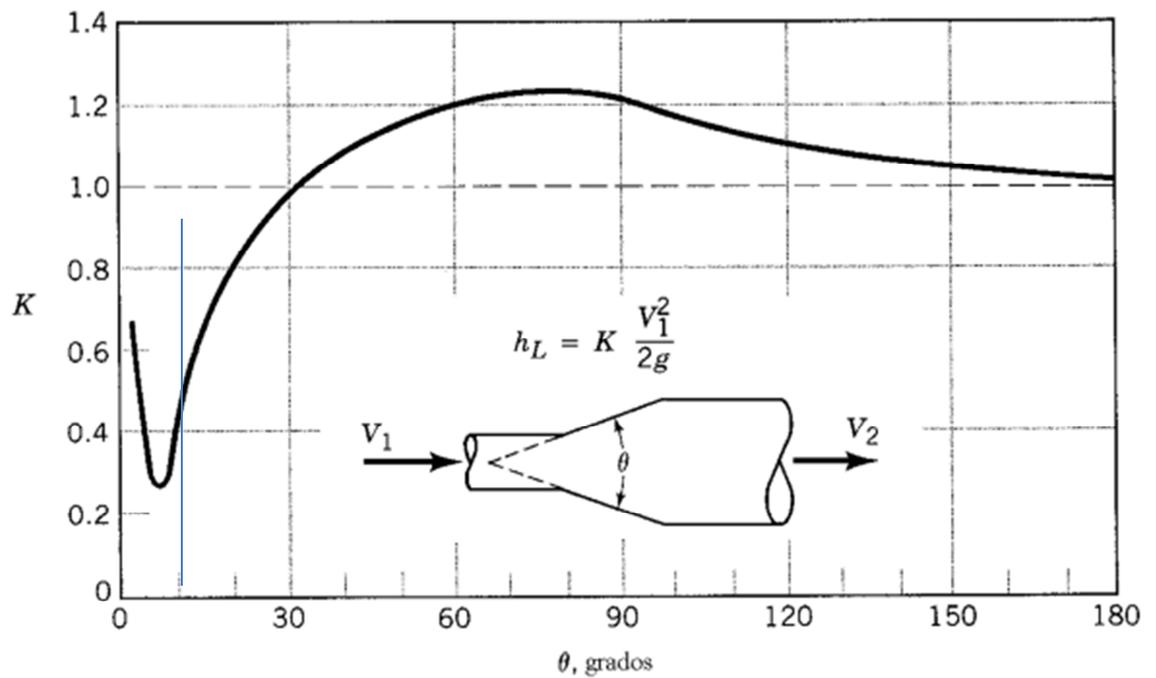


Figura 2.11 Coeficiente de pérdidas en una expansión gradual.

Fuente: Referencia 1

Seguidamente calcularemos las pérdidas mediante la ecuación de pérdidas menores de flujo al tener un coeficiente aproximado de 0.35:

Ecuación 2.21. Calculo de pérdidas del difusor

$$h_L = k_L \frac{V^2}{2g}$$

De donde:

k_L → Coeficiente de pérdidas

V^2 → La velocidad a la salida del difusor

g → La gravedad

$$h_L = 0.35 \frac{V^2}{2g}$$

La velocidad de salida del difusor es una incógnita nueva, pero se la puede calcular con la ecuación de continuidad o con los caudales que deben ser los mismos a lo largo de todo el tunel:

Ecuación 2.22 Cálculo de la velocidad a la salida del difusor.

$$V_{dif} = V_{secc\ pr} * \frac{A_2}{A_3}$$

Dónde:

A_3 → Es el área de salida del difusor

A_2 → Es el área de salida de la salida de la sección de pruebas

V_{dif} → Velocidad del difusor

$V_{secc\ pr}$ → Velocidad de la sección de pruebas

Reemplazando datos:

$$V_{dif} = V_{secc\ pr} * \frac{A_2}{A_3}$$

$$V_{dif} = 50m/s * \frac{0.09m^2}{0.283m^2}$$

$$V_{dif} = 15.91m/s$$

Finalmente calculamos la presión a la salida del difusor, conociendo la presión de entrada, que a su vez va ser la presión de salida de la cámara de pruebas, tenemos la ecuación 2.23:

Ecuación 2.23: Ecuación de Bernoulli

$$P_2 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2 + \gamma \cdot z_2 = P_3 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_3^2 + \gamma \cdot z_3$$

Como ya sabemos el peso específico y la altura $\gamma \cdot z$ no varían y tampoco la densidad del aire por lo que se simplifica la ecuación a:

$$P_2 + \frac{1}{2} \cdot v_2^2 = P_3 + \frac{1}{2} \cdot v_3^2$$

Ecuación 2.24. Calculo de presión a la salida del difusor.

$$P_3 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot v_2^2 - \frac{1}{2} \cdot v_3^2$$

De donde:

P_1 → Presión a la entrada

ρ → Densidad del aire a la altura de cuenca

V_3^2 → Velocidad a la salida del difusor

V_2^2 → Velocidad a la entrada del difusor

Con los siguientes datos:

$$P_2 = 73979.64Pa$$

$$V_3 = 15.91m/s$$

$$V_2 = 50m/s$$

y reemplazando

$$P_3 = 73979.64Pa + \frac{1}{2} \cdot (50m/s)^2 - \frac{1}{2} \cdot (15.91m/s)^2$$

$$\mathbf{P_3 = 75049.07Pa}$$

Que será la presión a la salida del difusor.

Finalmente hemos realizando todos los cálculos del túnel de viento propiamente, toda esta información deberá ser analizada varias veces para variar sus dimensiones si es preciso, dependiendo de los elementos que se demanden para hacer circular la cantidad de aire necesario.

2.7 Resultados y replanteo del diseño

Fue posible obtener todos los resultados de velocidades, presiones y pérdidas de carga que habrán dentro del túnel, a continuación se presenta el resumen de todos los resultados.

Dimensiones de la seccion del túnel de viento

Contracción

Altura	1000 [mm]
Ancho	1000 [mm]
Longitud	900 [mm]
Area	1000 m ²

Sección de pruebas

Altura	300 [mm]
Ancho	300 [mm]
Longitud	500 [mm]
Area	0.09 m ²

Sección de pruebas

Diámetro	600 [mm]
Longitud	1000 [mm]
Area	0.283 m ²

Condiciones Físicas del medio de trabajo

Presión	75160 [Pa]
Densidad del Aire	0.952 [kg/m ³]
Temperatura	15 [°C]
Velocidad de sección de pruebas	50 [m/s]

Elemento	Velocidad $v[m/s]$	Presión $P [Pa]$	Caudal $Q [m^3/h]$	Pérdidas $h_f [m]$
Direccionador de flujo	4.5	75160	16200	0.31
Reducción	4.5	75160	16200	3.186
Sección de pruebas	50	73979	16200	2.45
Difusor	15.92	75049	16200	4.52

Tabla 2.3 Resumen de resultados de dimensiones y pérdidas del diseño propuesto

Fuente: Autores

Los resultados obtenidos nos sirven primero para determinar las dimensiones más adecuadas del túnel, pero además nos sirven para determinar el tipo de ventilador que nos resulta mejor utilizar y además sus prestaciones.

En forma general, los datos más importantes para adquirir un ventilador son; *el caudal de aire a mover y la presión estática máxima a superar.*

Desde luego, todas estas características se reflejan en el costo final del ventilador y de igual manera en los accesorios necesarios para su utilización.

En los resultados vemos la velocidad requerida de 50m/s, y que se necesita un caudal de 4.5m³/s, pero por otro lado tenemos las presiones estáticas dentro del túnel, esta resulta de la sumatoria de todas las pérdidas de carga en cada elemento del túnel. Se puede representar por la ecuación 2.25

Ecuación 2.25. Perdida de carga total

$$h = f \frac{L_{pr} V_{pr}^2}{D_h 2g} + \sum_{i=1}^n k \frac{V_i^2}{2g}$$

$$h = f \frac{L_{pr} V_{pr}^2}{D_h 2g} + k_{df} \frac{V_{df}^2}{2g} + k_c \frac{V_c^2}{2g} + k_L \frac{V_L^2}{2g}$$

siendo

 $f \rightarrow$ factor de fricción en la sección de pruebas $L_{pr} \rightarrow$ Longitud de la sección de pruebas

$D_h \rightarrow$ Diámetro hidráulico de la sección de pruebas

$V_{pr} \rightarrow$ Velocidad de la sección de pruebas

$V_{df} \rightarrow$ Velocidad en el direccionador de flujo

$V_c \rightarrow$ Velocidad en la contracción

$V_L \rightarrow$ Velocidad en el difusor

$k_{df} \rightarrow$ Coeficiente de pérdidas del direccionador de flujo

$k_c \rightarrow$ coeficiente de pérdidas de la contracción

$k_L \rightarrow$ coeficiente de pérdidas del difusor

$$h = f \frac{L_{pr}}{D_h} \frac{V_{pr}^2}{2g} + k_{df} \frac{V_{df}^2}{2g} + k_c \frac{V_c^2}{2g} + k_L \frac{V_L^2}{2g}$$

$$h = 2.45 + 0.31 + 3.186 + 4.52$$

$$h = 10.46\text{m}$$

Este resultado es la pérdida total de carga que vamos a tener dentro del túnel. En la tabla 2.4 están los resultados generales de las demandas del túnel de viento. La presión estática se obtiene al multiplicar las pérdidas por el peso específico del aire, de aquí las otras unidades se derivan con factores de conversión.

Caudal	4.5 [m ³ /s]	9534.96 [CFM]	
Flujo másico	4.284 [kg/s]		
Pérdidas h_f	10.46 [m]		
Presión estática	97.702 [Pa]	9.97 [mmH2O]	0.392 [inH20]

Tabla 2.4 Resultados generales de las demandas del túnel de viento

Fuente: Autores

En el resumen final de resultados hemos reemplazado ya todos los resultados, y el resultado de las pérdidas de carga es aproximadamente de 10m y una presión estática de aproximadamente 100Pa o 10mmca. Estos resultados son necesarios para seleccionar un ventilador adecuado para llegar a las velocidades deseadas. La selección del ventilador se analizará en la siguiente sección.

2.7.1 Selección del ventilador

En el capítulo 1, no se trató en profundidad el tipo de ventilador que se usará para mover el aire dentro del túnel, esto es porque eran necesarios los cálculos descritos en la sección anterior, y luego consultar con los diagramas de trabajo de ventiladores axiales y centrífugos que cumplan con los requerimientos, aunque también es necesario conocer su disponibilidad en el mercado, su tamaño y su costo.

Por lo tanto el ventilador tiene cuatro parámetros que cumplir, lo más conveniente sería analizar los ventiladores que puedan llegar a cubrir dicho requerimiento, para luego consultar su disponibilidad en el mercado. Sería la manera más lógica y ordenada, pero debemos también indagar en el mercado y saber de qué ventiladores disponemos, que características, sus costos y en base a esto, replantear el diseño del túnel.

Existen catálogos de ventiladores de diferentes marcas, pudiendo ir desde uno elaborado artesanalmente hasta fabricados por marcas internacionales como Soler & Palau, GreenHeek, que tienen los diagramas de trabajo de sus ventiladores publicados en internet, pero su disponibilidad es una limitante, pues tienen sus distribuidores más cercanos en Colombia y Perú; Hasconwing es una marca italiana igualmente que posee los diagramas de trabajo con garantía de operación, disponible en Ecuador, por lo que también se lo puede considerar. Finalmente tenemos la marca de ventiladores Siemens, disponibles en el mercado pero de fabricación colombiana y no cuenta con el diagrama de trabajo, pero existen catálogos más o menos completos publicados de los ventiladores Siemens de origen alemán.

Analizado el primer punto que es la disponibilidad en el mercado, podemos estudiar algunos de los diagramas de trabajo que se cumplan con las demandas del proyecto. Hemos realizado una preselección de los ventiladores para no alargar demasiado, de estos vamos a analizar uno a la vez, finalmente realizamos un nuevo resumen de resultados y determinaremos qué ventilador nos conviene más, para ejecutar los nuevos cálculos correspondientes al ventilador seleccionado.

2.7.1.1 Ventilador centrífugo DA 18/18 de Soler & Palau

Como se trató en el capítulo anterior en la sección *1.4.1 Componentes de un túnel de viento* en la parte *1.4.1.1 Ventiladores*, un ventilador centrífugo genera más presión pero disminuye su caudal, por tal motivo justificamos el análisis de este tipo de ventilador.

En la figura 2.12 tenemos el diagrama correspondiente a este ventilador. En todos los diagramas, se enfrenta el caudal contra la presión estática, se trazan rectas perpendiculares a cada valor y su intersección se denomina punto de trabajo, al trabajar sobre una curva nos dará los demás datos del ventilador.

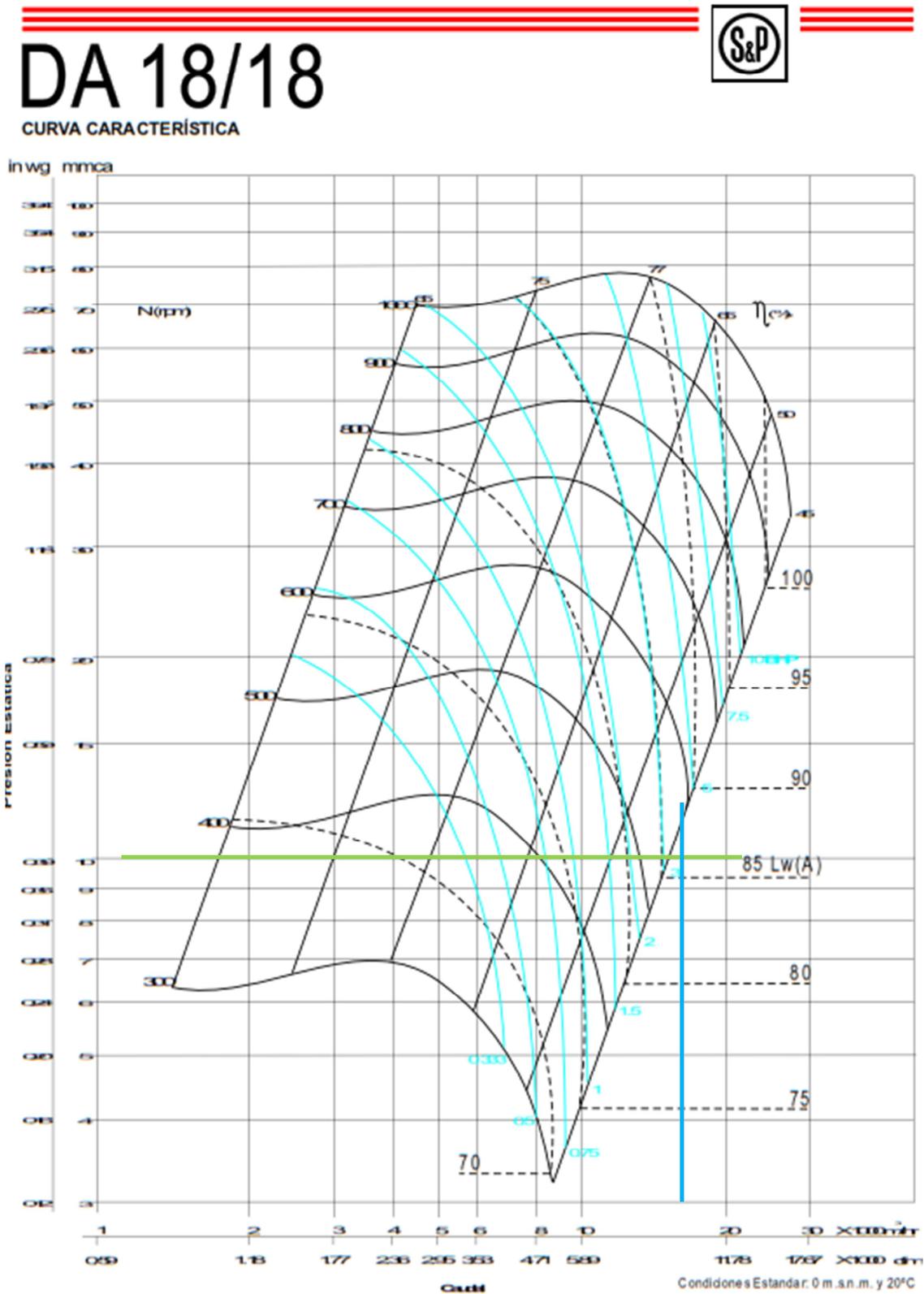


Figura 2.12 Diagrama de trabajo del ventilador DA 18/18 de Soler&Palau
 Fuente: Catalogo de ventiladores Soler&Palau

Punto de trabajo	
Presión estática	10mmca
Caudal	16200m ³ /h
Potencia	3hp
Eficiencia	47%
Ruido	85dB
Área de salida	0.266 m ²
Peso	45kg
RPM	380
Disponibilidad	
Mercado	Colombiano

Tabla 2.5. Cuadro resumen del ventilador DA 18/18 Soler&Palau

Fuente: Catalogo de ventiladores Soler&Palau

En esta opción, satisface completamente las demandas de nuestro diseño, pero el costo y la disponibilidad en el mercado es una limitante a considerar.

2.7.1.2 Ventilador axial Hasconwing 1200

El segundo caso, es un ventilador axial, de antemano sabemos que el caudal será alto pero las presiones no serán elevadas, pasemos a revisar los diagramas de trabajo en la figura 2.13.

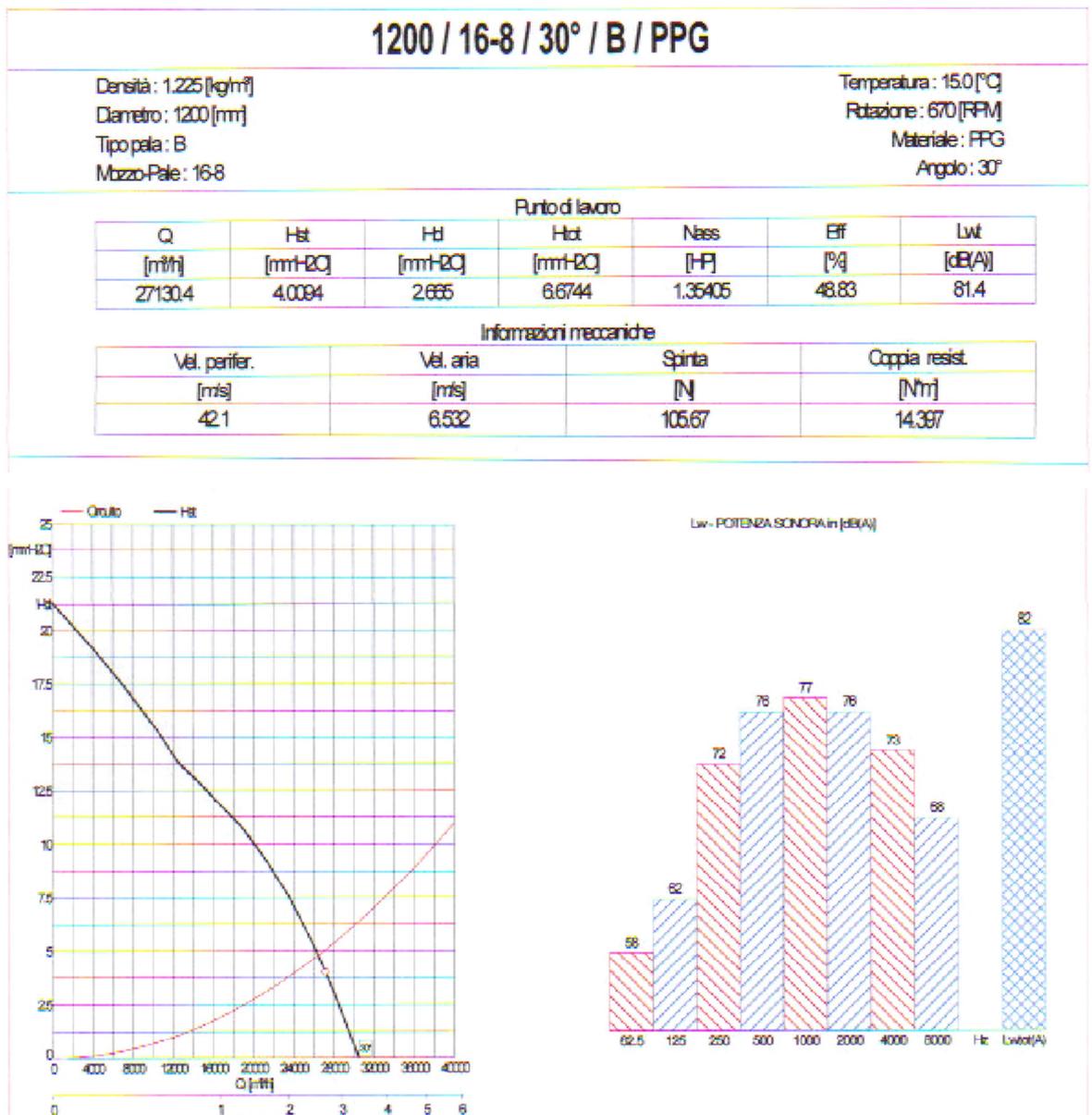


Figura 2.13 Diagrama de trabajo del ventilador Hasconwing 1200

Fuente: Importadores y proveedores de la marca Hasconwing

Punto de trabajo	
Presión estática	4mmca
Caudal	27130m ³ /h
Potencia	1.35hp
Eficiencia	49%
Ruido	58dB
Área de salida	1.13 m ²
Peso	-
RPM	670
Disponibilidad	
Mercado	Ecuatoriano

Tabla 2.6. Cuadro resumen del ventilador Axial Hasconwing 1200

Fuente: Importadores y proveedores de la marca Hasconwing

La segunda opción, supera ampliamente el caudal, pero apenas cubre la mitad de la presión estática requerida. El área de salida es mayor a la sección de entrada que es de 1m².

Por los costos y disponibilidad de los ventiladores, tendremos que bajar la velocidad impuesta, pero partiremos ahora de ventiladores disponibles en el mercado nacional y con un precio razonable.

La condición para la velocidad es que no debe ser inferior a los 80km/h, revisaremos dos ventiladores axiales más para empezar el replanteo del túnel.

2.7.1.3 Ventilador axial Hasconwing 900

A continuación en la figura 2.14, un nuevo diagrama de trabajo de un ventilador de la misma marca italiana.

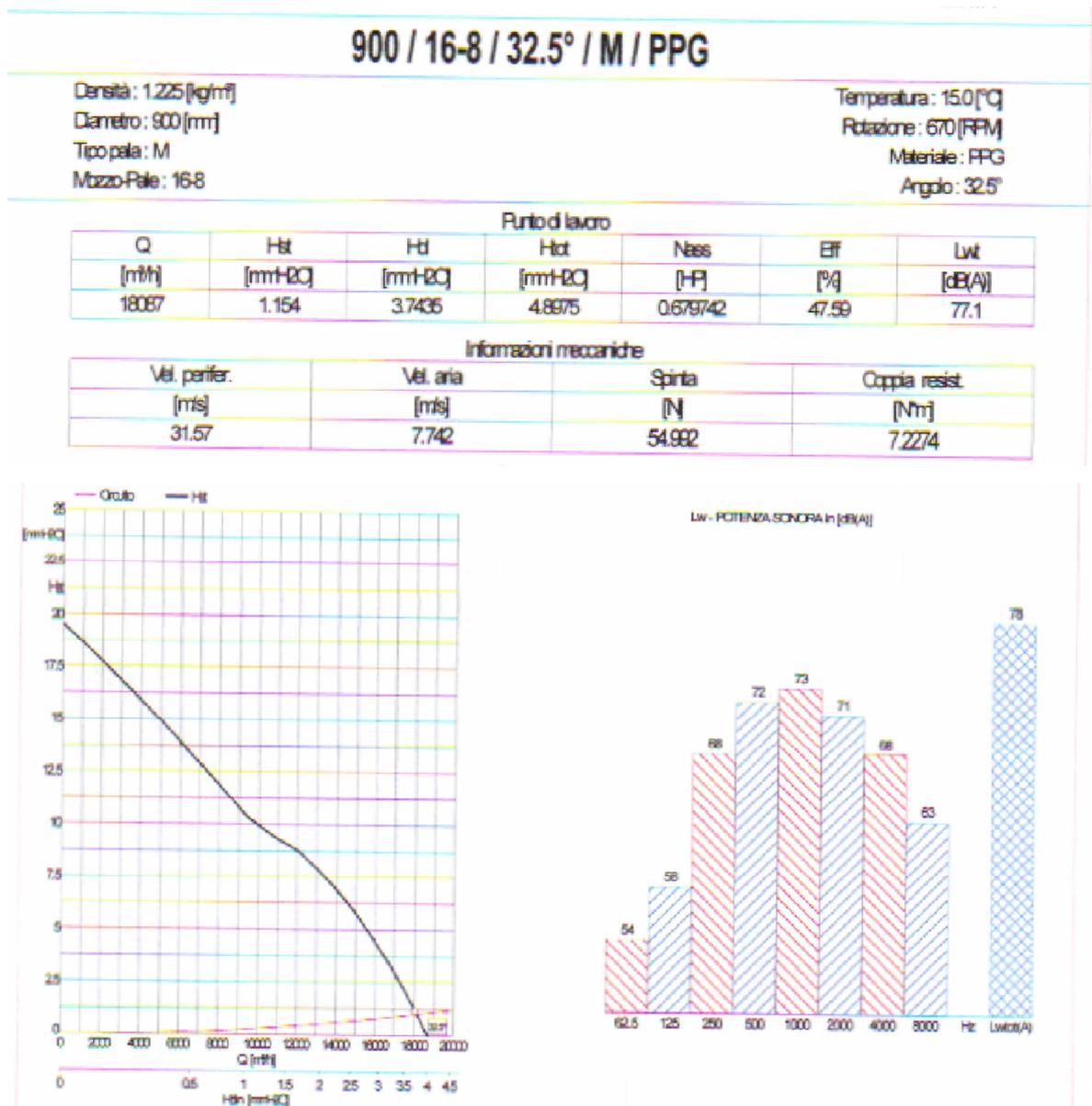


Figura 2.14 Diagrama de trabajo del ventilador Hasconwing 900

Fuente: Importadores y proveedores de la marca Hasconwing

Punto de trabajo	
Presión estática	1.15mmca
Caudal	18087m ³ /h
Potencia	0.7 hp
Eficiencia	47.5%
Ruido	54dB
Área de salida	0.636 m ²
Peso	-
RPM	670
Disponibilidad	
Mercado	Ecuatoriano

Tabla 2.7. Cuadro resumen del ventilador Axial Hasconwing 900

Fuente: Importadores y proveedores de la marca Hasconwing

No es de sorprenderse, el caudal elevado que posee este ventilador, y tampoco la presión estática tan pequeña que genera.

Pasemos a analizar el último ventilador disponible

2.7.1.4 Ventilador axial Siemens 2CC3 636-5YB6

Este ventilador de fabricación colombiana, no posee su diagrama de trabajo, y solamente conocemos su caudal y las presiones estáticas y la caída de caudal, no poseemos más información por lo que analizaremos la información disponible.

Ventilador Siemens 2CC3 636	Presión estática [mmca]				
	0	3	5	10	15
Caudal [m³/s]	3.55	3.32	3.1	2.50	1.65

Tabla 2.8 Caidas de caudal frente al incremento de presión estática

Fuente: Catalogo de ventiladores Siemens

Punto de trabajo	
Potencia	0.51 kW
Área de salida	0.312 m ²
Peso	-
RPM	1200
Disponibilidad	
Mercado	Ecuatoriano

Tabla 2.9 Dimensiones del ventilador Siemens 2CC3 636

Fuente: Catalogo de ventiladores Siemens

Tenemos un ventilador que reúne algunas de las condiciones que buscamos, si bien no llega a cumplir el caudal de 4.5m³/s, el caudal de 3.55m³/s y conservando las dimensiones inicialmente impuestas nos daría una velocidad de 39.44m/s o 142km/h y mantiene el límite inferior de velocidad. Ahora, podemos pasar a replantear el diseño y obtener nuevos datos de pérdidas cuyos valores repercutirán sobre la velocidad final que se obtenga.

2.7.2 Replanteo del diseño

Seleccionado el ventilador, variaremos la velocidad hasta llegar a una velocidad que se mantenga en el rango que nos establecimos, con la mínima de 80km/h, haremos varias iteraciones de velocidades a fin de poder estimar cual será la velocidad final que se obtenga.

Dimensiones de las secciones del Túnel de viento

Contracción

Altura = 1000.000mm
 Ancho = 1000.000mm
 Longitud = 900.000mm
 Area = 1.000m²

Sección de prueba

Altura = 320.000mm
 Ancho = 320.000mm
 Longitud = 500.000mm
 Area = 0.102m²

Difusor (dimensiones a la salida)

Diámetro = 600.000mm
 Longitud = 1000.000mm
 Area = 0.283m²

Presión exterior = 75160.000[Pa]
 Densidad del aire = 0.952[kg/m³]
 Temperatura de trabajo = 15.000[°C]
 Velocidad en sección de pruebas = 40.000[m/s] = 144.000[km/h]

Resultados por secciones del túnel de Viento

	Velocidad V[m/s]	Presión P[Pa]	Caudal Q[m ³ /h]	Perdidas hf[m]
Direc de flujo	4.096	75160.000	14745.600	0.257
Reducción	4.096	75160.000	14745.600	2.446
Seccion de pruebas	40.000	74406.386	14745.600	1.506
Difusor	14.487	75068.091	14745.600	3.744

 Caudal = 4.096[m³/s] = 8678.932[CFM]
 Flujo másico = 3.899[kg/s]
 Perdidas h = 7.953[m]
 Presion st = 74.272[Pa] = 7.576[mmH₂O] = 0.298[inH₂O]

Tabla 2.10 Resultados del túnel de viento a 40m/s

Fuente: Autores

Vemos que con la velocidad de 40m/s un poco más de 142km/h, aún se mantiene elevada la pérdida de carga, 7.58mmca, según el ventilador Siemens el caudal será de 2.5m³/s. Bajaremos aún más la velocidad.

Dimensiones de las secciones del Túnel de viento

Contracción

Altura = 1000.000mm
 Ancho = 1000.000mm
 Longitud = 900.000mm
 Area = 1.000m²

Sección de prueba

Altura = 320.000mm
 Ancho = 320.000mm
 Longitud = 500.000mm
 Area = 0.102m²

Difusor (dimensiones a la salida)

Diámetro = 600.000mm
 Longitud = 1000.000mm
 Area = 0.283m²

Presión exterior = 75160.000[Pa]
 Densidad del aire = 0.952[kg/m³]
 Temperatura de trabajo = 15.000[°C]
 Velocidad en sección de pruebas = 30.000[m/s] = 108.000[km/h]

Resultados por secciones del túnel de Viento

	Velocidad V[m/s]	Presión P[Pa]	Caudal Q[m ³ /h]	Perdidas hf[m]
Dirac de flujo	3.072	75160.000	11059.200	0.144
Reducción	3.072	75160.000	11059.200	1.376
Seccion de pruebas	30.000	74736.092	11059.200	0.889
Difusor	10.865	75108.301	11059.200	2.106

 Caudal = 3.072[m³/s] = 6509.199[CFM]
 Flujo másico = 2.925[kg/s]
 Perdidas h = 4.515[m]
 Presion st = 42.166[Pa] = 4.301[mmH₂O] = 0.169[inH₂O]

Tabla 2.11 Resultados del túnel de viento a velocidad de 30m/s o 108km/h

Fuente: Autores

Con una velocidad de 30m/s, aun nos mantenemos por encima de la velocidad inferior mínima, las presiones llegan a 4.3mmca, por lo que podríamos utilizar el ventilador Hasconwing 1200 o el Siemens 636, pues los dos satisfacen dichos requerimientos.

Con el Hasconwing 1200 a dicha presión tenemos un caudal de 27130m³/h que equivale a 7.54m³/s, llegando a velocidades de 73m/s o 264km/h, velocidad que puede ser utilizada para vehículos de F1 para una velocidad media alta, pero el proyecto de tesis va enfocado para pruebas de vehículos de turismo, o competición que pueda llegar a los 100km/h que es muy común en el medio.

Deberemos también considerar el tamaño de cada ventilador, el Hasconwing 1200 tiene un diámetro de 1200mm y el Siemens 636 tiene un diámetro de 630mm, que resulta más fácil de acoplar. Presentaremos una nueva tabla resumen para comparar los dos ventiladores y finalmente determinar el ventilador más adecuado.

Característica / Ventilador	Hasconwing 1200	Siemens 636
Caudal [m³/s]	7.54	3.1
Presión estática [mmca]	4	4
Velocidad máxima [km/h]	265.09	108
Diámetro [mm]	1200	630
Area de acople [m²]	1.131	0.312
Facilidad de acople*	Indirecta	Directa
Potencia [hp]	1.35	0.75
Disponibilidad	Inmediata	Inmediata

Tabla 2.12 Resumen de ventiladores más apropiados

Fuente: Catálogos de fabricantes

En lo que respecta al acople (*) se refiere a que si es posible adaptarlo directamente al túnel, como por ejemplo, si es túnel de aspirado, podría acoplarse en el difusor aumentando unos milímetros su diámetro, no así con el Hasconwing que se lo debería acoplar para soplado e incrementar el tamaño de la contracción, variando nuevamente las dimensiones y por ende los cálculos.

El ventilador que cumple con los requerimientos de velocidad y caudal, presiones, disponibilidad y costo razonable, es el ventilador Siemens 2CC3 636 será el que se va a utilizar para la construcción del túnel.

Finalmente las dimensiones del túnel serían las que se muestran en la figura 2.16.

Dimensiones de las secciones del Túnel de viento

Contracción

Altura = 1000.000mm
Ancho = 1000.000mm
Longitud = 900.000mm
Area = 1.000m²

Sección de prueba

Altura = 320.000mm
Ancho = 320.000mm
Longitud = 500.000mm
Area = 0.102m²

Difusor (dimensiones a la salida)

Diámetro = 630.000mm
Longitud = 1000.000mm
Area = 0.312m²

Tabla 2.13 Dimensiones finales del túnel de viento

Fuente: Autores

Hemos diseñado y dimensionado el túnel de viento, en el siguiente capítulo se simulará el flujo de aire dentro del túnel y se contrastará con los resultados obtenidos en los cálculos, que no deben estar con valores alejados a los calculados.

Capítulo 3. Simulación del Túnel de viento mediante software especializado

Introducción

Hoy en día, es muy común utilizar software para simular el comportamiento de un sistema, luego de realizar un análisis previo del mismo, se generan los modelos virtuales con las dimensiones del modelo real que se va a estudiar, luego se ponen las condiciones a las que se le va a someter al modelo para que las procese el ordenador con el software adecuado, para finalmente obtener los resultados de la simulación.

Al obtener los resultados, podríamos tener gran cantidad de información incluso más de la que requerimos, y es tarea del diseñador interpretarla de manera lógica y con mucho criterio para poder llegar a tomar una decisión sobre su diseño.

Antiguamente, el único método disponible era el método de la prueba y error, es decir, se construía un prototipo para realizar las pruebas necesarias y verificar los resultados, sin embargo difícilmente se llegaba a los resultados esperados por lo que era necesario construir varias maquetas, esto si el costo no era elevado o se contaba con financiamiento suficiente, pero cuando su costo es considerable o el tiempo y complejidad de construcción son importantes, este método resultaba muy poco ortodoxo.

Al simular los procesos o fenómenos que ocurren dentro del sistema, no es necesario construir nada sino hasta el momento que se esté seguro y conforme con los resultados obtenidos luego de experimentar con varios diseños, usando únicamente el ordenador y conceptos suficientes para efectuar los cambios necesarios.

Uno de los objetivos de nuestra tesis es la simulación del flujo de aire dentro del túnel, conocemos todas las condiciones y dimensiones y hemos calculado los posibles resultados de nuestro túnel. Podríamos construir el prototipo desde los resultados obtenidos en el capítulo anterior, pero si contamos con la herramienta de simulación, podremos comprobar los resultados obtenidos mediante el cálculo con un

modelo virtual, de esa manera estaremos más seguros de que nuestro prototipo funcionará de acuerdo a lo planificado.

3.1 Etapas de la simulación

De manera general, la simulación abarca tres etapas que se presentan el siguiente diagrama:

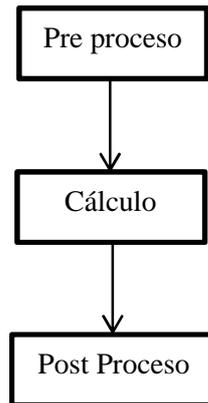


Figura 3.1 Diagrama de las etapas de la Simulación

Fuente: Autores

En el *pre proceso*, se dan todas las condiciones iniciales del modelo realizado, el método más utilizado es el de elementos finitos, que se refiere a que todo un cuerpo sólido se divide en elementos muy pequeños en los cuales se analizará individualmente, y luego todos los resultados se reunirán para dar a conocer el resultado final. Ejemplo de condiciones iniciales sería: presión atmosférica, temperatura ambiente, densidad del aire, flujo másico del aire, etc.

En la etapa de *cálculo*, se resuelven las ecuaciones de cada tipo de análisis, por lo general, se utiliza el método de elementos finitos o volúmenes finitos, es el método que reemplaza a la solución exacta o mediante ecuaciones diferenciales que pueden llegar a ser demasiado complejas de resolver, siendo el camino más factible el método de volúmenes finitos que de igual manera llega a resultados muy precisos.

Finalmente el *post proceso*, son todos los resultados que se pueden apreciar en una ventana gráfica que indicará diagramas de velocidades, temperaturas, presiones, etc., con valores que deberán ser muy próximos a los calculados y a lo que se

obtenga en la realidad, todo esto si las condiciones iniciales se han ingresado correctamente y se han hecho las consideraciones necesarias.

3.2 Modelado tridimensional del túnel de viento

Para el análisis debemos partir de un modelo tridimensional, conocemos ya las dimensiones del túnel, que obtuvimos en el capítulo anterior, y debemos generar un sólido con la forma final del túnel.

En la figura 3.2 a y b, mostramos el túnel de viento que será utilizado para la simulación, y en la figura 3.3 a y b el aspecto final que deberá tener el mismo.

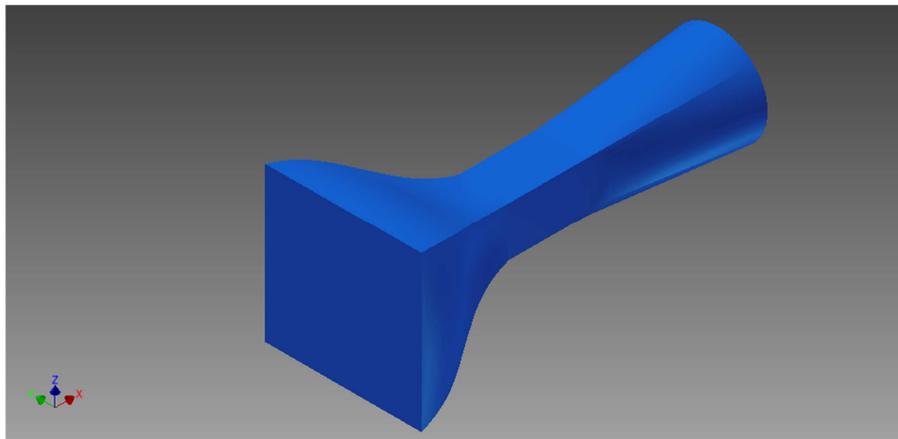


Figura 3.2a. Modelo sólido tridimensional del túnel de viento. Vista frontal

Fuente: Autores

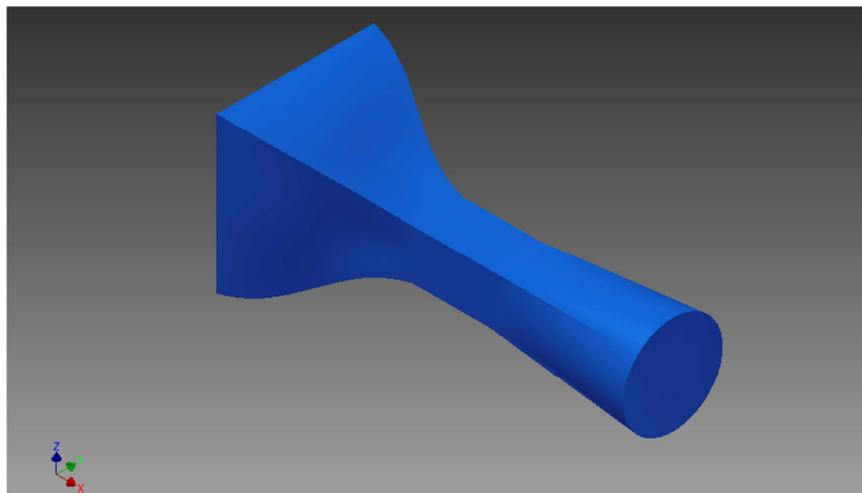


Figura 3.2b. Modelo sólido tridimensional del túnel de viento. Vista posterior

Fuente: Autores

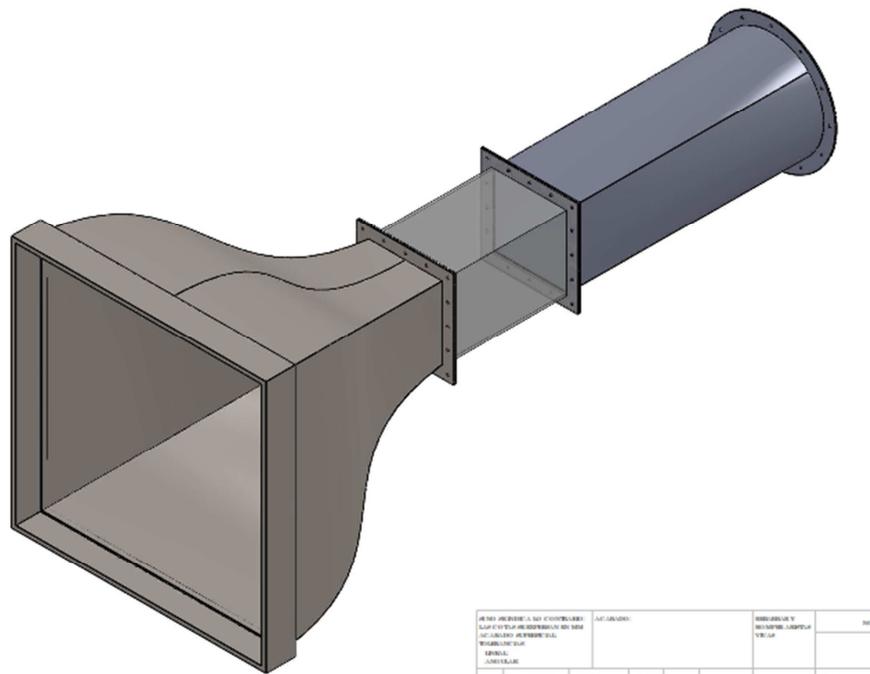


Figura 3.3a. Visto isométrica frontal del aspecto final túnel de viento

Fuente: Autores

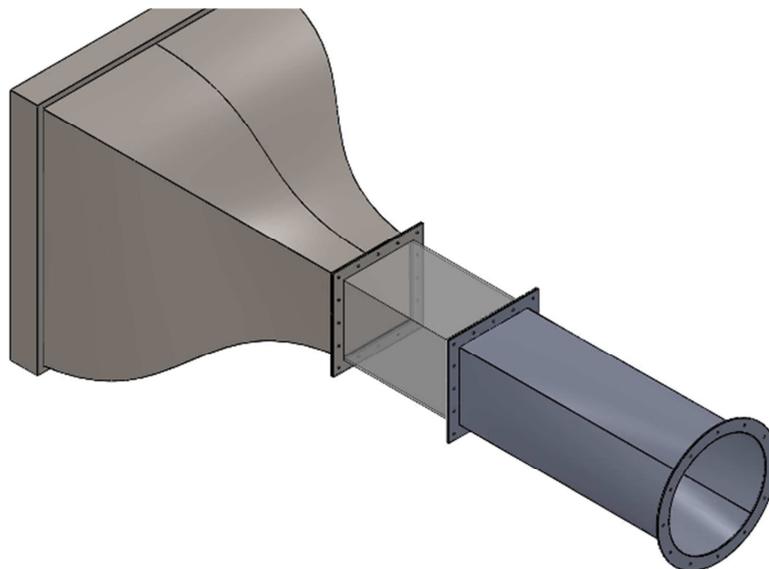


Figura 3.3b. Visto isométrica posterior del aspecto final túnel de viento

Fuente: Autores

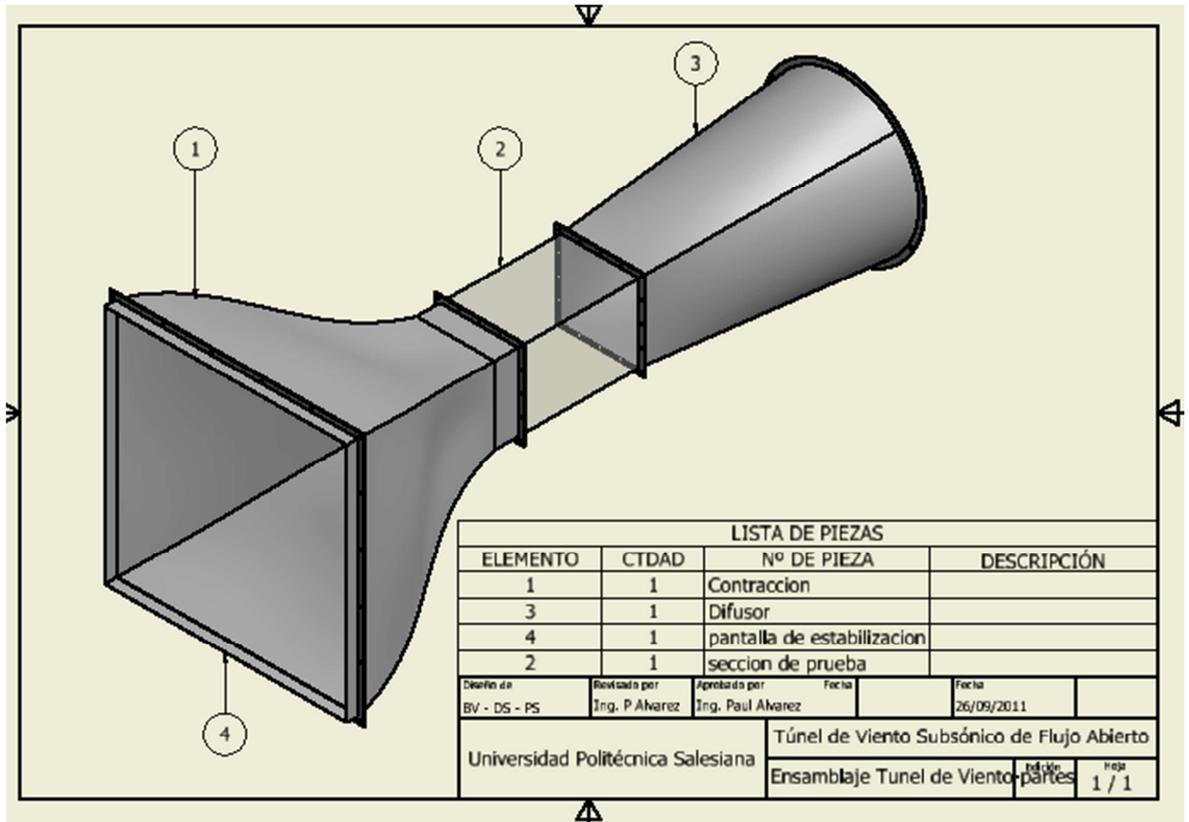


Figura 3.4 Esquema del ensamblaje del túnel de viento y sus componentes

Fuente: Autores

En la figura 3.4 tenemos los componentes básicos del túnel de viento, los planos completos del mismo se puede observar en el anexo A y no entraremos en detalle en este capítulo.

Con el modelo virtual generado con las dimensiones específicas, podemos empezar finalmente a realizar la simulación.

3.3 Pre proceso

Al inicio del capítulo en la sección 3.1 comentamos que la manera más utilizada para evaluar el comportamiento en elementos de geometría compleja es el método de volúmenes finitos, cómo se interpreta esto, a un sólido o a un plano con fronteras, lo dividimos en partes muy pequeñas de dimensión finita, estos se unen en sus vértices por nodos, y toda información se transmitirá al siguiente por las superficies de contacto o sus nodos, llegando así a resolver todo el sistema.

A esta división de elementos finitos se le conoce como mallado, y existen varios tipos de mallas cuya selección suele hacerse de acuerdo a la geometría del modelo a evaluar. Como elementos finitos suelen utilizarse las figuras geométricas de la figura 3.5 que son: triángulos, cuadriláteros, tetrahedros, hexaedros, pirámides y prismas. Habrá que ajustar de la mejor manera estos elementos a la malla que tomará la forma del sistema a analizar.

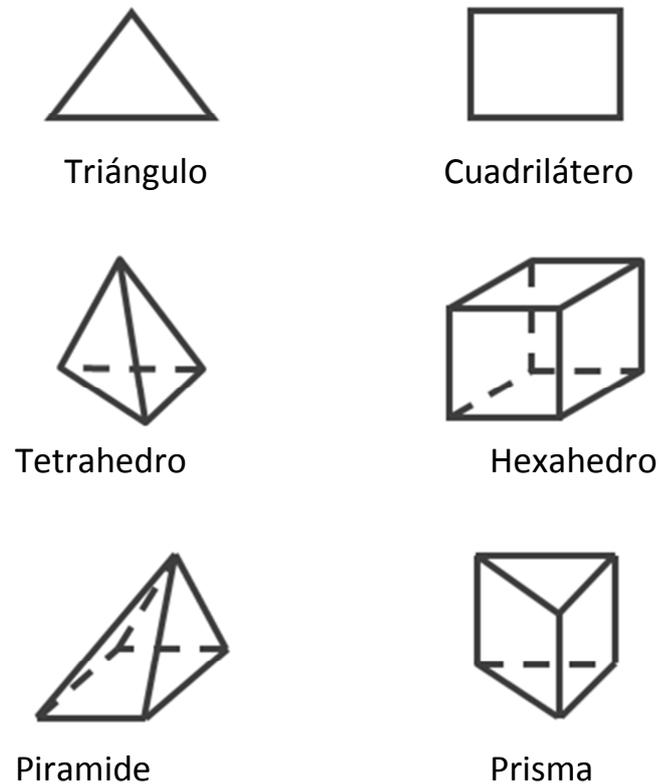


Figura 3.5 Figuras geométricas de para el mallado.

Fuente: Autores

Las dos primeras se pueden ajustar a sistemas bidimensionales y mientras más elementos formen la malla, los resultados serán más precisos. Evidentemente los cuatro últimos elementos se utilizan para sólidos e igualmente uno u otro elemento dependerá de la geometría del modelo.

Como se puede observar en la figura 3.2, la geometría del túnel no es completamente uniforme, pues tiene formas curvadas, rectangulares, y transiciones de formas rectangulares a circulares. Si utilizamos elementos prismáticos o hexaédricos, no sería conveniente, pues estos no se acoplarían muy bien a las formas curvas y circulares, o sería necesario utilizar muchos elementos para adaptarlo a estas

formas. Los elementos piramidales o tetraédricos se adaptarían mejor y se ocuparían menos elementos. Ahora únicamente dependerá del software y recursos de máquina para generar la malla con unos de estos dos elementos.

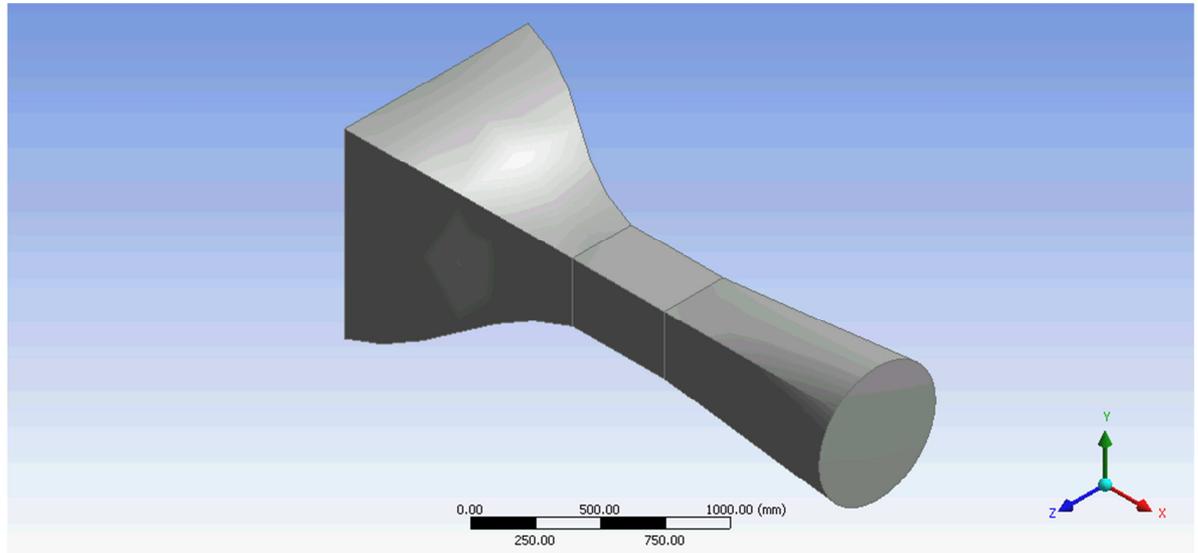


Figura 3.6 Geometría importada lista para ser mallada

Fuente: Autores

En la figura 3.6 vemos la forma del túnel importada como un sólido, es importante tener presente que, a pesar de ser un conducto hueco, este debe ser importado como un sólido, luego con las condiciones frontera se indicará cual es la entrada y salida del aire pero además será necesario indicar las fronteras del sistema, que para el caso será la curbierta del túnel, es así como reconocerá el programa cómo y por donde fluirá el aire.

A continuación en la figura 3.7, se muestra los datos de la malla que se va a generar. La tabla lleva de encabezado el *método de conformado de la malla*, lo interesante de esta tabla es el método de mallado, el mismo programa preselecciona un método, pero el criterio indicado anteriormente deberá ser aplicado, el software nos permite un mallado triangular, prismático y tetraédrico, por tanto utilizaremos este último.

Details of "Patch Conforming Method" - Method	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Method	Tetrahedrons
Algorithm	Patch Conforming
Element Midside Nodes	Use Global Setting
Expansion Factor	1

Figura 3.7 Método de conformación del mallado

Fuente: Autores

En la figura 3.8 el modelo está mallado completamente y se pueden apreciar los elementos tetraédricos, se puede observar que la malla se estrecha más en las secciones más curvadas. En la figura 3.9 se presenta en la tabla el detalle de la malla generada.

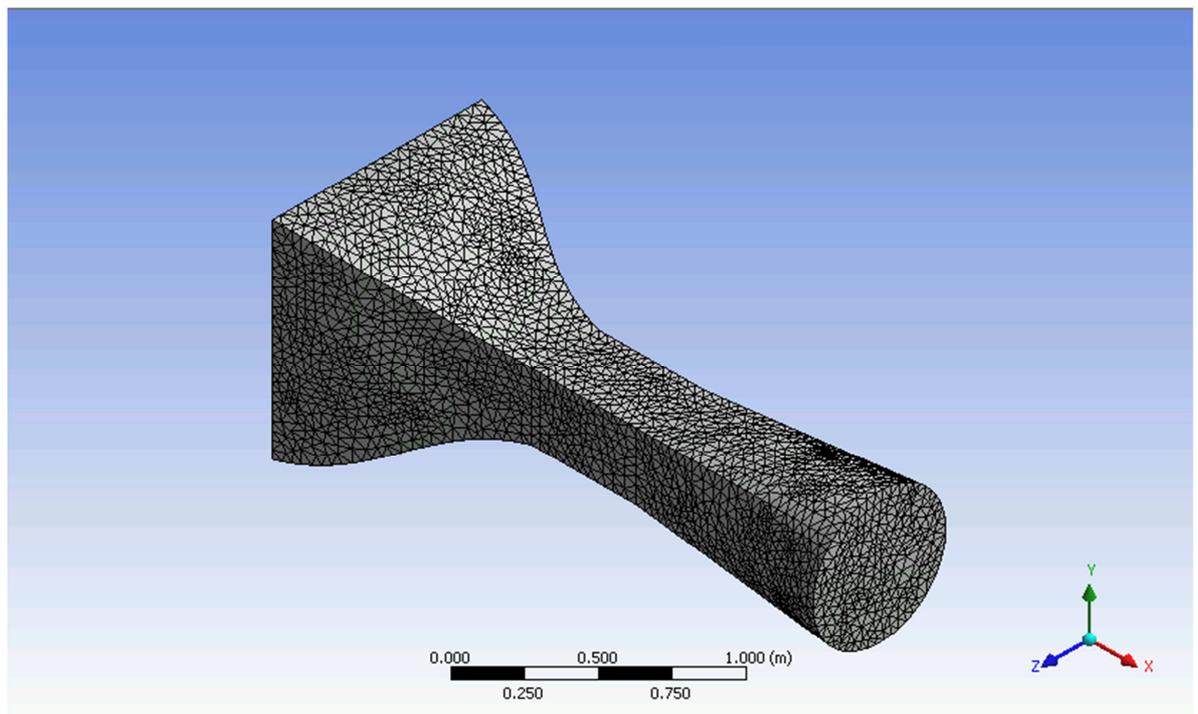


Figura 3.8 Modelo mallado con elementos tetraédricos. El mallado se estrecha en los lugares más curvados

Fuente: Autores

Details of "Mesh" ⌵	
[-] Defaults	
Physics Preference	CFD
Relevance	0
[+] Advanced	
[-] Statistics	
Nodes	8146
Elements	33289

Figura 3.9 Detalle de la malla

Fuente: Autores

En las estadísticas, nos indica que se han generado 33289 elementos y 8146 nodos, esta cantidad y la misma forma de la malla, sugiere que los cálculos serán muy aproximados. En la parte de *Defaults* o valores por defecto, nos muestra que la aplicación física será CFD que son iniciales en inglés que al español es Dinámica de Fluidos Computacional y, para nuestro caso que es análisis de flujo de aire será el adecuado.

Definido este parámetro, podremos indicar al programa las condiciones iniciales. Tenemos que empezar indicando en el modelo mallado cuales serán las superficies de entrada, de salida y las fronteras fijas.

En la figura 3.10, se ha seleccionado (en verde) la cara plana de la sección de contracción, pues esta es la superficie de entrada, y en la figura 3.11 la cara plana del difusor (en verde) como superficie de salida del flujo de aire. En la tabla 3.1 se indican las condiciones exteriores y las propiedades termodinámicas del fluido a tratar.

Parámetro a definir	Valor
Fluido a tratar	Aire
Presión atmosférica	75,16 [kPa]
Temperatura ambiente	20[°C]
Densidad	0,952 [kg/m ³]
Flujo másico del fluido	2.9[kg/s]

Tabla 3.1 Condiciones iniciales para la simulación

Fuente: Autores

Deberemos introducir todos estos valores en el software de simulación para que el programa calcule y nos entregue los resultados del problema. Todos estos datos han sido calculados en el capítulo dos sobre el *Diseño del túnel*.

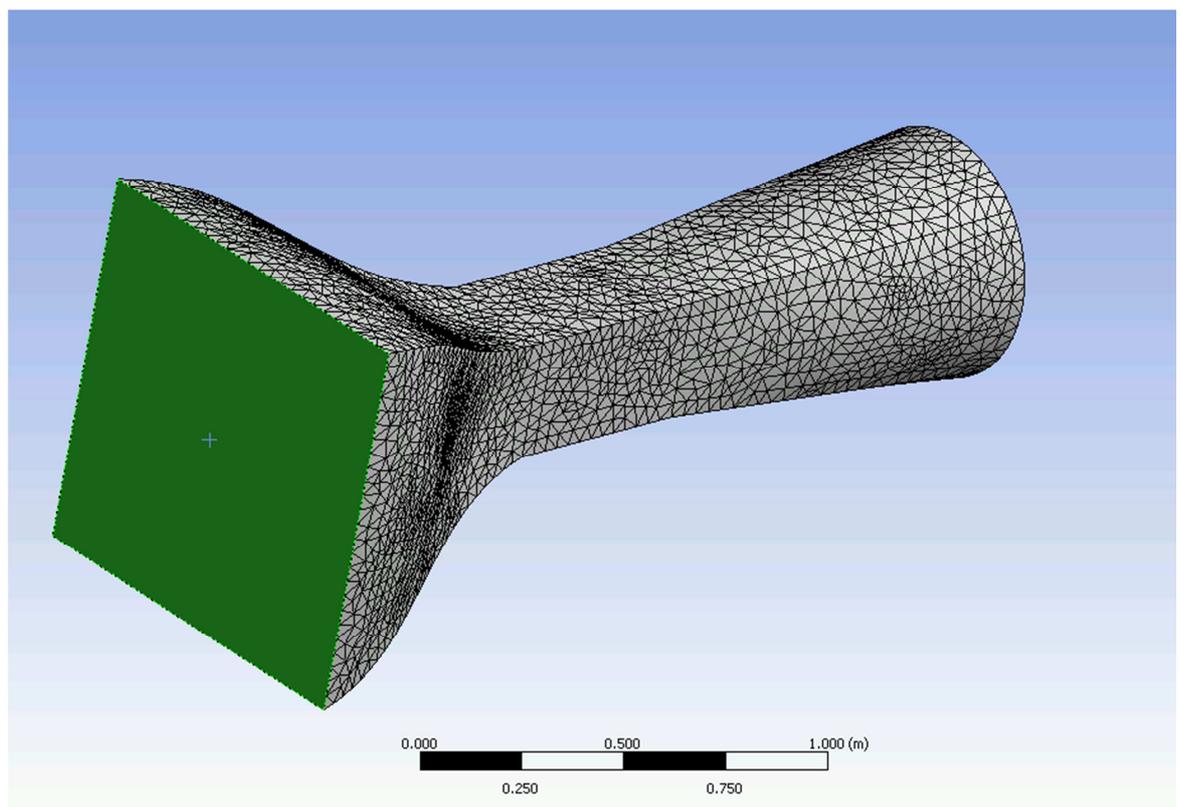


Figura 3.10 Selección de la entrada del flujo de aire

Fuente: Autores

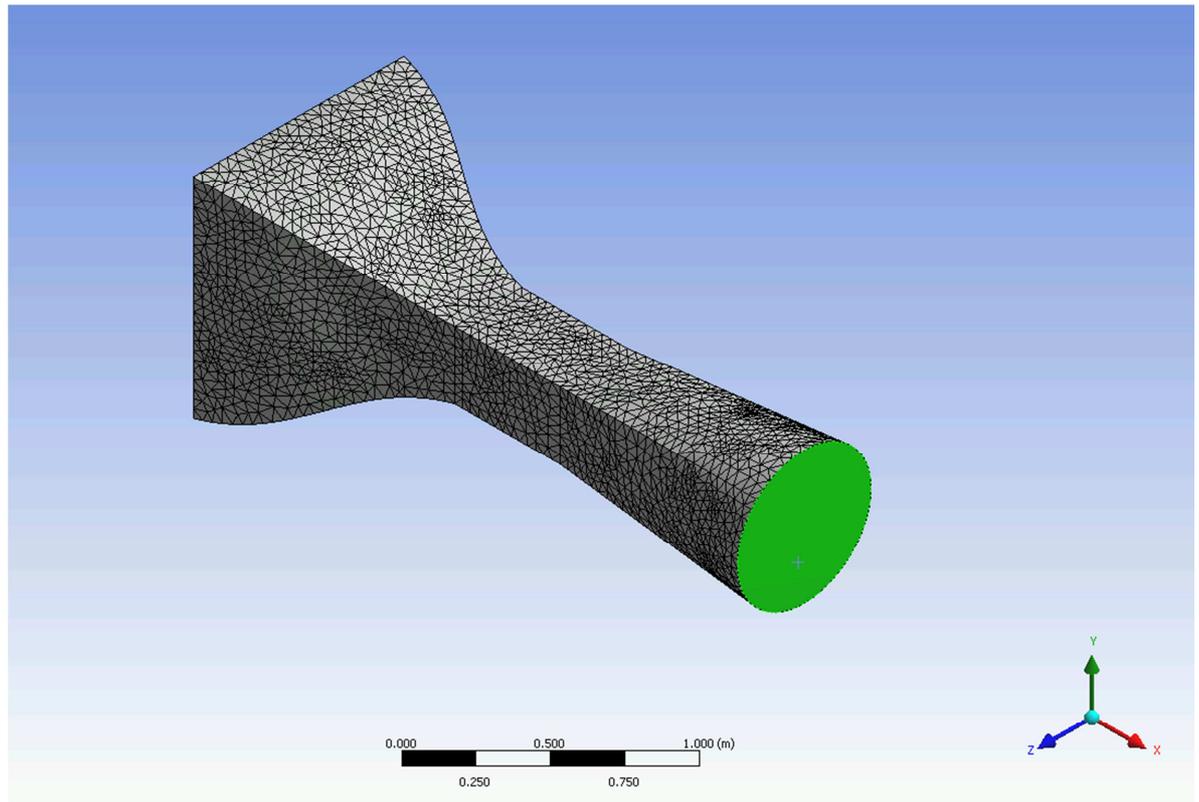


Figura 3.11 Selección de la salida del flujo de aire del túnel

Fuente: Autores

3.4 Post Proceso

Hemos omitido la etapa de cálculo, pues el software realizará todos los cálculos de acuerdo a su programación, pero no los presenta, sino nos muestra directamente los resultados obtenidos al realizar y resolver todas las ecuaciones con los datos o condiciones iniciales que hemos ingresado.

En la figura 3.11, vemos el resultado que nos interesa de primer plano que es la velocidad, otros resultados que nos interesa además son las presiones, el gradiente de presión y turbulencia. Este último, por requerir un estudio más profundo y con nivel de conocimiento de mayor grado, no lo mostraremos o consideraremos. En cuanto al gradiente hace referencia al cambio de velocidad entre dos puntos.

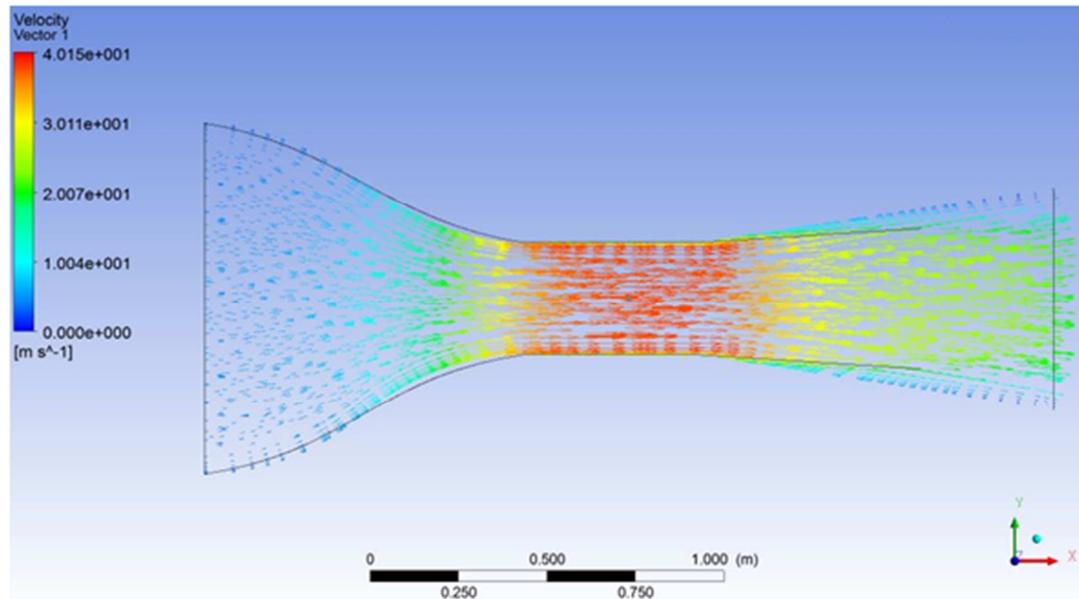


Figura 3.12 Velocidades del flujo de aire alcanzadas dentro del túnel

Fuente: Autores

Podemos ver que la velocidad máxima se da en la cámara de pruebas, llegando a cerca de los 32m/s, contra los 30m/s que hemos calculado, por lo tanto el programa nos indica que lo calculado va muy próximo a los resultados, esto valida los cálculos y nos confirma que los procedimientos que hemos aplicado están bastante correctos. Los resultados en las demás secciones se detallan en la tabla 3.2

En la figura 3.12 tenemos los resultados de las presiones dentro de las secciones del túnel, recordemos que a menor sección transversal menor presión, estos se conoce como el efecto Venturi.

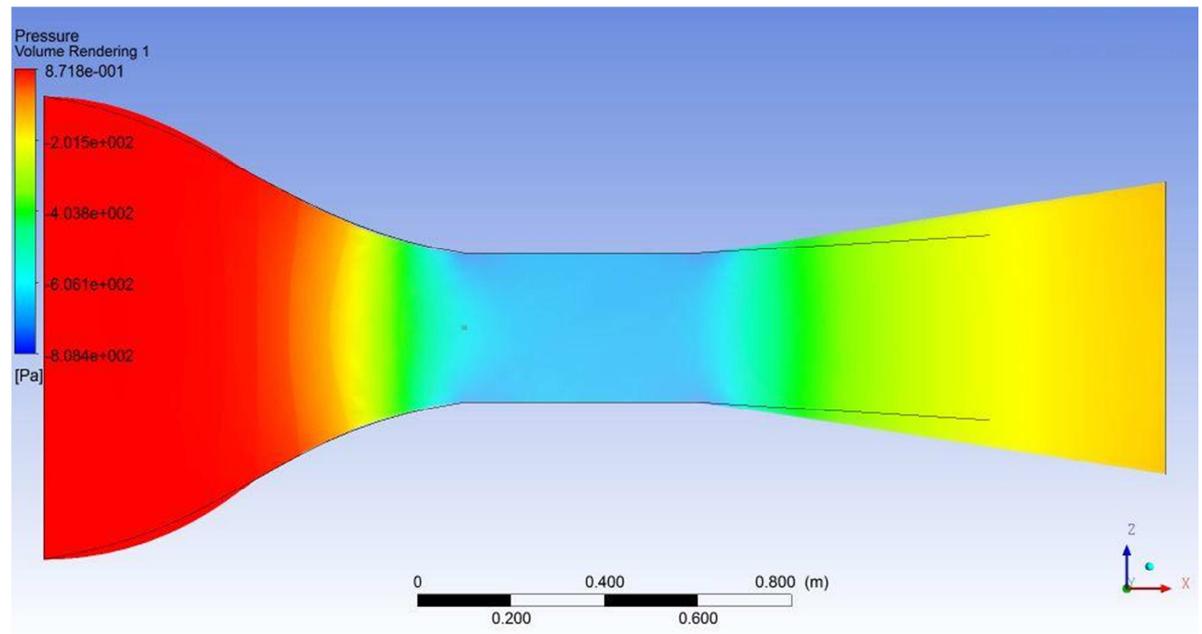


Figura 3.13 Presiones en las secciones del túnel

Fuente: Autores

El programa nos indica los resultados con una referencia desde la presión exterior, es decir que un aumento (presión positiva) o reducción (presión negativa) serán relativas a los 75160 [Pa] que es la presión atmosférica de Cuenca. Antes de ingresar a la sección de pruebas vemos que la presión casi cae 400 [Pa], por lo que la presión a la entrada de la sección de pruebas es de 75160 [Pa] menos 400 [Pa] que nos da 74760 [Pa], y en los cálculos tenemos 74736 [Pa], que es el segundo resultado acertado o más que acertado, correctamente calculado.

Por último el gradiente de presión indica el cambio de velocidad del aire que fluye, si existe un gradiente de presión (indicado por su coloración) habrá un cambio de velocidad dentro del túnel y si no hay cambio del gradiente de presión la velocidad se mantendrá estable.

Ubicación	Velocidad [m/s]	Presiones [Pa]
Entrada del túnel de viento	3.985	75160
Sección de Pruebas	32.00	74760
Salida del difusor	11.00	75060

Tabla 3.2 Resultados de las velocidades y presiones obtenidos de la simulación

Fuente: Autores

Los resultados que se aprecian en la tabla 3.2 deberán volver a ser analizados en el capítulo 5 que se evaluará el desempeño real del túnel de viento una vez que ya esté construido. Por lo pronto nos mantenemos a un rango muy aproximado de los resultados calculados y simulados.

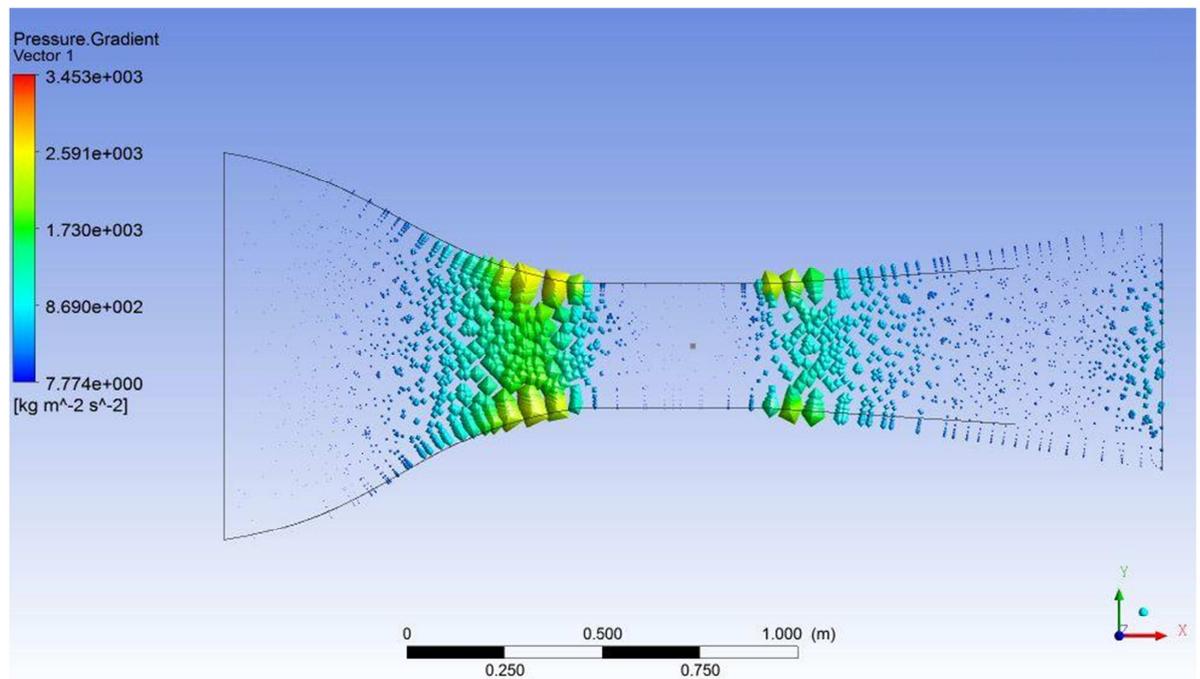


Figura 3.14 Gradiente de presiones

Fuente: Autores

Observando la sección de pruebas en la figura 3.13 vemos que no existe ningún gradiente de presión, por lo que la velocidad será estable en todo su trayecto, esta es muy buena noticia, dado que debemos conservar las condiciones de prueba dentro de esta sección lo más uniforme que sea posible y gracias a este resultado sabemos que si se mantendrán condiciones estables.

Se han analizado los resultados más relevantes de la simulación, sin duda se han aplicado bastante bien las ecuaciones de mecánica de fluidos y se han tomado las consideraciones apropiadas, y con dos resultados que concuerdan con lo calculado podemos considerar a nuestro diseño como aceptable y empezaremos con la construcción en el siguiente capítulo en el mismo que se hará un análisis de los resultados obtenidos en la vida real y finalmente compararemos con lo calculado con el objeto de conocer su eficiencia.

Capítulo 4. Construcción del túnel de viento

Introducción

En este capítulo se tratará sobre los materiales utilizados y la importancia que tiene cada uno de estos dentro de la construcción del túnel de viento con sus respectivas características y propiedades, dentro de los cuales se destacan el latón, vidrio y hierro debido a que son los materiales más utilizados, todos los materiales utilizados para este fin tienen un análisis previo en sus prestaciones de tal manera que en el momento de darles la forma deseada sean eficientes.

Todos los elementos constitutivos del túnel están realizados según los cálculos y análisis que se muestran en capítulos anteriores lo que nos garantizará la efectividad del túnel en el momento de que se realicen las pruebas planteadas. En cuanto a los elementos de control utilizados podemos decir que son elementos que cumplen con nuestros requerimientos, los mismos que están detallados dentro de este capítulo en las secciones posteriores dado a que son los encargados de comandar la velocidad del ventilador, recibir y procesar las señales para su respectiva visualización dentro del ordenador, con lo que respecta a los diversos elementos que también son parte del túnel se dará una breve explicación de su uso dentro de este.

También se abordará el proceso de fabricación de las partes del túnel con su respectiva explicación y el orden de ensamblaje en sus diferentes etapas una vez que los materiales han tomado su forma final tal es el caso del estabilizador, la zona de contracción, la zona de pruebas y el difusor los mismo que estarán montados sobre una bancada que adopta la forma y soporta al túnel.

Una vez realizado, comprobado y simulado el diseño en el software se procede a realizar el siguiente proceso:

- Selección de materiales para la construcción,
- Selección de materiales eléctricos y electrónicos.

4.1 Selección de materiales para la construcción

Una vez obtenidos los planos del túnel con sus respectivos materiales se procede a detallar la utilización y características de cada uno de los elementos y así tenemos:



Figura 4.1 Materiales y descripción de su uso

Fuente: Autores

4.2 Características de los materiales

A continuación se darán a conocer las características de los materiales antes mencionados.

4.2.1 Tol Negro

El tol negro es un producto laminado plano, constituido con acero (con un contenido en carbono entre 0,03% y 0,13%), recubierto por una capa de estaño.

La composición de este material es la siguiente (del exterior al interior):

- Película de aceite;
- Estaño libre;
- Aleación Fe Sn₂;
- Acero libre.

Se trata de un material ideal para la fabricación de envases metálicos debido a que combina la resistencia mecánica y la capacidad de conformación del acero con la resistencia a la corrosión del estaño. Se trata de un material ideal para la fabricación de productos de complemento, a disposición de los clientes, toda una gama de tapones, tachas, manijas, hondas, tapaderas y botes metálicos para alimentos, producidos sintéticos, aceites y derivados.

Mientras el tol negro fue un elemento habitual para la fabricación de herramientas de cocina, juguetes, menaje, etc. Su facilidad de manejo es obvia ya que puede ser cortada con tijeras de una forma y tamaños específicos.



Figura 4.2 tol negro

Fuente: Autores

Este material lo empleamos en la construcción de la sección de contracción y en el difusor *por sus propiedades mecánicas como la maleabilidad*, gracias a esto podemos moldear, acoplar y mecanizar a nuestras necesidades, otro punto muy importante de la utilización de este material fue el coste y la facilidad de adquisición.

4.2.2 Vidrio

Es un material inorgánico duro, frágil, transparente y amorfo que ocurre en la naturaleza y también es creado artificialmente por el hombre. El vidrio artificial se usa para hacer ventanas, lentes, botellas y una gran variedad de productos. El vidrio es un tipo de material cerámico amorfo.



Figura 4.3 Vidrio artificial

Fuente: Autores

Propiedades

- Permite ver el producto que contiene.
- Es un material totalmente inocuo que no reacciona con el producto.
- No es poroso
- Es un aislante perfecto.
- Es 100% reciclable.
- Puede ser utilizado para guardar algún otro producto.
- Pueden crearse una variedad infinita de formas y tamaños.

Este material se utilizó en la zona de pruebas debido a que puede adaptarse a la forma deseada mediante la realización de cortes según nuestra necesidad, también por su bajo costo en el mercado, y lo más importante de este material es que permite la visualización del comportamiento de los elementos en estudio dentro de la misma.

4.2.3 Termoplásticos

Material plástico maleable a temperaturas específicas, parcialmente cristalino. Es utilizado en una amplia variedad de aplicaciones que incluyen empaques para alimentos, tejidos, equipo de laboratorio, componentes automotrices y películas transparentes. Tiene gran resistencia contra diversos solventes químicos.



Figura 4.4 a Sorbetes

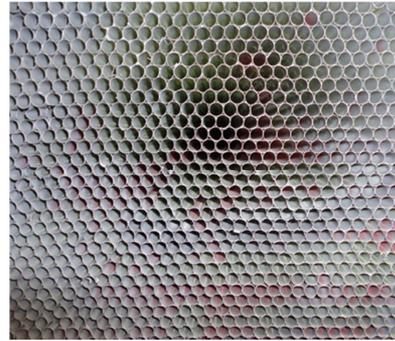


Figura 4.4 b Pila de sorbetes del direccionador de flujo

Fuente: Autores

Propiedades

- Bajo costo
- Fácil moldeo
- Fácil de colorear
- Alta resistencia a la fractura por flexión o fatiga
- Buena estabilidad térmica

Como se indicó en el capítulo 2, en la sección 2.5 direccionador de flujo, determinamos que lo más idóneo era utilizar una forma circular para obtener un flujo laminar, al tener en el mercado disponibles tubos plásticos fáciles de obtener y de bajo costo, resulta muy práctico utilizar sorbetes plásticos, recortarlos y ubicarlos en la posición como indica la figura 4.4b, una cantidad suficiente para cubrir toda el área de entrada de la contracción.

Una vez que tengamos el flujo laminar nos permitirá visualizar fácilmente el comportamiento de la capa limite sobre el objeto sometido a pruebas.

4.3 Selección de elementos de acción y control

Dependiendo del análisis de la aerodinámica longitudinal que se desee analizar, serán necesarios los elementos que permitirán visualizar sea de forma directa o mediante un ordenador los fenómenos que se provoquen sobre el vehículo al hacer fluir aire por su superficie a distintas velocidades.

En nuestro proyecto, analizaremos la capa límite y la antisustentación generada por el flujo de aire a distintos rangos de velocidad sobre el vehículo, son los efectos de más fácil visualización y demostración, por lo que nos limitaremos a su análisis, dado la versatilidad del túnel nos da la facilidad de utilizarlo en proyectos futuros.

Para la antisustentación, que es el efecto de la adherencia del vehículo sobre la calzada, no entraremos en detalles de su análisis en este capítulo y lo retomaremos en el capítulo 5, pero para poderla demostrar necesitamos sensores que detecten la fuerza con la que el vehículo se asienta al piso, por lo tanto, deberán ir ubicados en cada neumático. Estos resultados se los podrá visualizar en un ordenador con un software especializado LabView con Licencia estudiantil, e indicará los efectos del flujo de aire.

La capa límite que se forme sobre el vehículo, se puede visualizar coloreando el aire, la manera más práctica es emitir humo cuya velocidad variará en proporción a la velocidad de flujo de aire.

Para realizar pruebas a distintos rangos de velocidad, necesitamos un dispositivo que varíe las revoluciones del ventilador (seleccionado en el capítulo 2).

Para procesar todas las señales de los sensores y poder visualizarlas en el ordenador y comandar la velocidad de giro del ventilador desde el mismo, podemos utilizar un sistema de control compatible con el software LabView, y los más comerciales, confiables y disponibles son las tarjetas de adquisición de datos DAQ National Instruments, que dependiendo de los recursos su costo será más o menos elevado.

A continuación se representa en la figura 4.5 los elementos y una leve descripción de su uso.



Figura 4.5 Elementos eléctricos y electrónicos y descripción de su uso

Fuente: Autores

4.3.1 Características de los Materiales eléctricos y electrónicos

4.3.1.1 Tarjeta de adquisición de datos NI – USB 6212 DAQ MIO

El módulo USB-6212 de National Instruments es un módulo de adquisición de datos (DAQ) multifunción de la Serie M energizado por bus USB y optimizado para una precisión superior a velocidades de muestreo más altas. Ofrece 16 entradas analógicas, velocidad de muestreo de 400 kS/s, dos salidas analógicas, 32 líneas de E/S digital, cuatro rangos de entrada programable (± 0.2 V a ± 10 V) por canal, disparo digital y dos contadores/temporizadores.

El módulo NI USB-6212 está diseñado específicamente para aplicaciones móviles o con restricciones de espacio. La instalación plug-and-play minimiza el tiempo de configuración y montaje mientras que la conectividad directa con terminal de tornillo mantiene los precios bajos y simplifica las conexiones de señal. Este producto no requiere potencia externa.



Figura 4.6 Tarjeta de adquisición de datos NI – USB 6212 DAQ MIO

Fuente: Autores

Características:

- 16 entradas analógicas (16 bits, 400 kS/s)
- 2 salidas analógicas (16 bits a 250 kS/s), 32 E/S digitales, dos contadores de 32 bits
- Energizado por bus USB para una mayor movilidad, conectividad de señal integrada
- NI signal streaming para transferencia de datos bidireccional a alta velocidad en USB; la versión OEM está disponible
- Compatible con LabVIEW, ANSI C/C++, C#, Visual Basic .NET y Visual Basic 6.0
- El software de NI-DAQmx y software interactivo LabVIEW SignalExpress LE para registro de datos.

Esta tarjeta se utiliza para procesar las señales que provienen de los sensores ubicadas dentro de la sección de pruebas las mismas que serán visualizadas en un ordenador que recibirá directamente los datos emitidos por la tarjeta mediante un cable USB, las señales que se visualizarán dentro de la pantalla del ordenador son pequeñas variaciones de resistencia que se representan en forma de líneas y nos indican la antisustentación que tiene el vehículo.

4.3.1.2 Sensores de presión

Una galga extensiométrica es un sensor basado en el efecto piezorresistivo. Un esfuerzo que deforma a la galga producirá una variación en su resistencia eléctrica.

En su forma más común, consiste en un estampado de una lámina metálica fijada a una base flexible y aislante.

Los materiales que suelen utilizarse para fabricar galgas son aleaciones metálicas, como por ejemplo constatan, nicrom o elementos semiconductores como por ejemplo el silicio y el germanio. Es por ello que podemos clasificar las galgas en dos tipos: las metálicas y las semiconductoras.

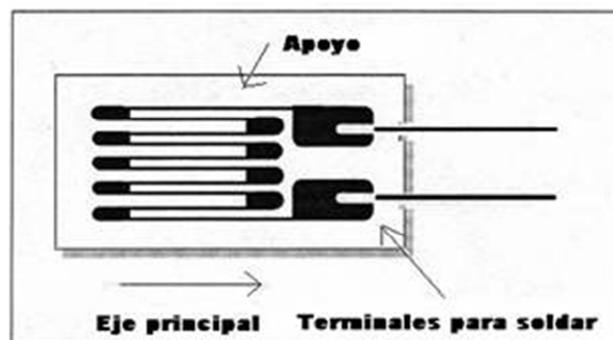


Figura 4.7 Sensores de presión

Fuente: http://www.unet.edu.ve/~ielectro/GALGAS1_archivos/image004.jpg

Características

- Pequeño tamaño
- Pueden ser alimentadas con corriente continua o corriente alterna
- Tienen una excelente respuesta en frecuencia
- Pueden utilizarse para medidas estáticas y dinámicas
- Compensación de temperatura relativamente fácil
- No son influidas por los campos magnéticos.

Estos sensores son utilizados en la sección de pruebas y están encargados de generar una señal que variará en relación al peso que se le aplique, que en nuestro caso será el vehículo sometido a prueba, la variación de la presión en el sensor se dará el momento en que se asiente el vehículo sobre este, dicha variación aumentará a medida que se incremente la velocidad del flujo de aire dentro del túnel, el mismo que nos permitirá determinar la carga aerodinámica negativa o antisutentacion del vehículo.

4.3.1.3 Variador de frecuencia

Es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna (AC) por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor. Un variador de frecuencia es un caso especial de un variador de velocidad.



Figura 4.8 Variador de frecuencia

Fuente: Autores

Características:

- Es posible mover la velocidad del motor según las necesidades de la producción o el proceso, esto puede ser hecho de forma automática o manual.
- El variador cuenta con una pantalla en donde se indican corriente circulante, voltaje, velocidad del motor, fallas, etc.
- No se requieren protecciones adicionales de sobre corriente para la protección del motor, esto lo hace el propio variador de forma fina y ajustable sin ningún costo adicional protegiendo al motor.
- Se puede arrancar suavemente (tanto como se requiera) una determinada carga sin golpear la transmisión variando el tiempo de aceleración.
- Se puede regular la corriente de arranque del motor aumentando la capacidad de arranques y paros frecuentes (hasta 20-25 por minuto) sin sobrecalentar el motor y disminuyendo el consumo de energía.
- Mejora el factor de potencia y el consumo de corriente de la instalación disminuyendo los costos operativos.
- El costo inicial de adquisición es menor que un variador mecánico o un conjunto de corriente directa (CD).

El variador de frecuencia dentro de nuestro proyecto es de suma importancia debido a que para la realización de las pruebas se requiere trabajar con velocidades puntuales del ventilador, dándonos así un flujo de aire constante, en otras palabras este variador se utiliza para el control de la velocidad de giro del ventilador lo que nos servirá para realizar un análisis correcto de los fenómenos que se suscitan dentro de la aerodinámica vehicular a diferentes rangos de velocidad.

4.3.1.3 Ventilador

Un ventilador es una máquina de fluido concebida para producir una corriente de aire mediante un rodete con aspas que giran produciendo una diferencia de presiones. Entre sus aplicaciones, se utiliza para desplazar aire o gas de un lugar a otro, dentro de o entre espacios, para motivos industriales o uso residencial, para ventilación o para aumentar la circulación de aire en un espacio habitado.

Un ventilador también es la turbo máquina que absorbe energía mecánica y la transfiere a un gas, proporcionándole un incremento de presión leve, por lo que da lugar a una variación muy pequeña del volumen específico.



Figura 4.9 Ventilador axial

Fuente:

[http://www.siemens.com.co/SiemensDotNetClient_Andina/Medias/IMAGES/2157_20090612190732.](http://www.siemens.com.co/SiemensDotNetClient_Andina/Medias/IMAGES/2157_20090612190732.jpg)

.jpg

4.4 Construcción del túnel

Luego de haber realizado la selección de los materiales de construcción, eléctricos electrónicos y basándonos en el diseño procedimos a realizar los respectivos planos de la maqueta en el software AutoCAD, de tal manera que se pudo representar el túnel dividido en tres secciones principales para su construcción las mismas que se anotan a continuación:

- Sección de contracción
- Sección de pruebas
- Difusor



Figura 4.10 Túnel de viento

Fuente: Autores

Una vez dividido el túnel en tres secciones y con los respectivos planos procedemos con la explicación de la construcción y ensamble.

4.4.1 Sección de contracción

Una vez ya seleccionado el material que vamos a utilizar en esta sección como es el caso del tol negro de 1mm de espesor, extraemos el plano de esta sección, del mismo vamos a extraer una cara ya que las cuatro son simétricas e imprimimos en un formato A0, esto nos va a ayudar en el trazado de dicha parte, seguidamente la lámina de papel la pegamos sobre la superficie del tol negro, una vez realizado esto, procedemos a cortar el tol con la forma deseada, este procedimiento realizamos 4 veces, para posteriormente unirlos mediante suelda eléctrica cuidando que el cordón de suelda sea homogéneo debido a que esto es uno de los factores influenciará en la turbulencia generada en el interior del túnel.



Figura 4.11 Sección de Contracción

Fuente: Autores

4.4.2 Sección de pruebas

La construcción de esta zona se realizó con vidrio de 9mm de espesor y su forma es la de un prisma rectangular de 30cm x 30cm x 40cm como se explicó anteriormente este debe poseer como característica principal la facilidad de visualización en el momento de realizar las pruebas, en tanto basándonos en los respectivos planos se procedió a realizar una estructura rectangular en hierro angular donde se aloja el vidrio, el mismo que con el espesor antes mencionado nos da la suficiente rigidez en esta sección del túnel como puede observarse en las figuras 4.12 a) y b).

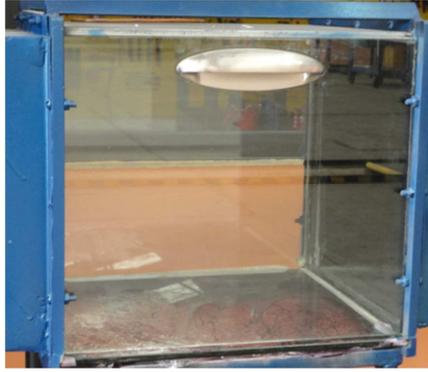


Figura 4.12 a) Sección de Pruebas



Figura 4.12 b) Sección de Pruebas

Fuente: Autores

4.4.3 Difusor

Esta sección es la que más complicaciones presenta por su forma, ya que como podemos apreciar por un extremo posee una forma cuadrada y por el otro extremo tiene una forma circular como indica la Figura 4.13 , para dar solución a este inconveniente recurrimos a los planos realizados con la ayuda del software INVENTOR con lo que se pudo extraer el plano abierto de esta parte, para posteriormente imprimirla en papel lo que nos sirvió de molde para luego cortarla en el latón, la unión de esta sección se la realizó también con suelda eléctrica, en los extremos se colocó unos marcos realizados en chapa metálica según la forma deseada para su respectivo acople tanto para la sección de pruebas como para el ventilador.



Figura 4.13 Difusor

Fuente: Autores

4.4.4 Estructura o base del túnel

Este elemento será el encargado de soportar el túnel de viento como puede verse en la figura 4.14, esta estructura se fabricó con hierro angular de una pulgada, se le adicionó soportes a medida de las necesidades sin dejar de lado la nivelación ya que de ello dependerá el ensamble correcto de las secciones antes mencionadas, la unión de la estructura se la realizó con suelda eléctrica además en la base se agregó ruedas para el traslado y manejo del túnel, también se le adiciono pernos que nos servirán para nivelar la estructura con el fin de garantizar que el túnel trabaje totalmente horizontal.



Figura 4.14 Estructura o base del túnel de viento

Fuente: Autores

4.4.5 Estabilizador

Conocido también como panel de abejas para su elaboración utilizamos tubos de polipropileno de 5mm de diámetro y una longitud de 60mm previo calculo, en este proceso se colocaron alrededor de 8000 unidades superpuestas y unidas mediante pegamento, el marco del estabilizador tiene las mismas dimensiones de la entrada de la zona de contracción 1000mm por 1000mm, este marco se construyó de madera, en el mismo se colocaron los tubos hasta llenarlo, dentro del túnel de viento este es un elemento muy importante ya que ello depende que el flujo sea laminar.



Figura 4.15 a) Estabilizador

Figura 4.15 b) Vista frontal del estabilizador

Fuente: Autores

4.4.6 Ventilador

En base a cálculos realizados en el capítulo 2 se llegó a la conclusión de usar el ventilador de marca Siemens modelo A52B 636 este ventilador cumple con nuestros requerimientos, cabe recalcar que el mismo viene con su respectiva base como se ve en la figura 4.16 a), por lo que para este elemento se realizó un pedestal de tubo circular de una pulgada de diámetro, el mismo que está a la altura de la parte posterior del túnel para su fácil acople, de igual manera que se hizo en la estructura se le colocó ruedas en la base del pedestal para su transporte, en el acople del ventilador al difusor colocamos un tubo hecho de lona (figura 4.16 b) con la finalidad de evitar que las vibraciones que se generan en el ventilador se transmitan al túnel, es decir va a filtrar vibraciones.



Figura 4.16 a) Montaje del ventilador Figura 4.16 b) Manga acople del ventilador

Fuente: Autor

4.4.7 Máquina de humo

Es el elemento encargado de generar el humo dentro de la sección de pruebas de este elemento dependerá la visualización de la capa límite en los objetos sometidos a prueba.

Para lograr que este elemento cumpla su misión dentro de la sección de pruebas se dispuso de manguera de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro a la salida de la máquina de humo la misma que está ajustada mediante abrazaderas, en el otro extremo de la manguera se dispuso de un acople realizado con tubos de cobre de $\frac{1}{4}$ de pulgada el mismo que permitirá dispersar y visualizar el flujo de aire (humo) generado sobre el vehículo sometido a la prueba.



Figura 4.17 Máquina de humo

Fuente: Autores

4.4.8 Sensores

Son los encargados de recibir las señales obtenidas durante las pruebas de sustentación aerodinámica (Figura 4.18), dichas señales serán enviadas hacia la tarjeta de adquisición de datos para a su vez realizar la visualización en un ordenador, dichos sensores van colocados en la base de la sección de pruebas, de tal manera que cada sensor vaya bajo un neumático del vehículo, por lo que para nuestro análisis utilizaremos 4 sensores debido a que se analizarán vehículos de manera exclusiva.



Figura 4.18 Sensor de presión

Fuente: Autores

Capítulo 5. Análisis de la dinámica longitudinal en los vehículos de prueba

Introducción

5.1 Acciones aerodinámicas sobre los vehículos:

La aerodinámica vehicular tiene como objeto el estudio del conjunto de acciones y efectos que ejerce el aire sobre el vehículo en movimiento, así como la forma de lograr que estos sean lo más favorables posible. Pueden distinguirse dos grupos de efectos asociados a dos flujos diferentes de aire.

- Flujo de aire externo al vehículo.
- Flujo de aire que pasa a través de compartimentos del vehículo.

En nuestro proyecto de tesis analizaremos, el primer ítem; sobre las superficies exteriores del vehículo, produce zonas de presión o depresión y rozamiento viscoso con las paredes; todo ello origina esfuerzos que influyen, no solo en el avance del vehículo, ofreciendo una resistencia de naturaleza aerodinámica, sino que afectan a las cargas sobre las ruedas y, en ocasiones a la estabilidad del automóvil.

Por otra parte, ciertos fenómenos, como los de despegue de la capa límite, pueden producirse en forma intermitente a frecuencias audibles, por lo que se convierten en fuentes de ruido.

Aunque los aspectos aerodinámicos de los vehículos han sido estudiados casi desde el inicio de la era automovilística, la llamada crisis del petróleo hizo incrementar considerablemente la atención por estos problemas, lo cual es completamente lógico si se piensa que a 100 Km/h la resistencia aerodinámica viene a representar del orden del 80% de la resistencia total de un vehículo de tamaño medio.

De todos modos, cada tipo de vehículo plantea problemas aerodinámicos que son críticos en aspectos diferentes. La principal preocupación en turismos ha sido, durante estos últimos años, reducir la resistencia al avance, por razones de economía. En microbuses o furgonetas, los problemas de sensibilidad al viento lateral han requerido más atención. En cuanto a los vehículos de competición, uno de los problemas fundamentales es la fuerza de tracción, cuyo incremento impone el uso de elementos que producen una sustentación aerodinámica negativa.

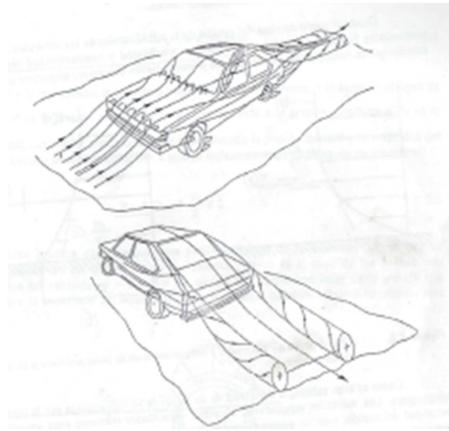


Figura5.1 Flujo alrededor de un vehículo automóvil.

Fuente: Referencia 3

Mientras que la aerodinámica es un factor clave con el diseño de aeronaves, en el caso de los vehículos de superficie, las demandas respecto a su estilo, prestaciones, comportamiento direccional, seguridad, confort y problemas de producción, disminuyen su importancia relativa. Por otra parte, la proximidad al suelo, dimensiones y forma de los vehículos acondicionados, entre otras, por exigencias de optimización de sus habitáculos y otros aspectos constructivos, crean un campo de flujo alrededor del automóvil. (Figura 5.1) muy diferente de los aviones.

5.1.1 Flujo exterior:

Si consideramos que el aire está en reposo, o se mueve a una velocidad despreciable frente a la del vehículo, podemos suponer que este está quieto y el aire se mueve respecto a él con la velocidad V_{∞} con que el automóvil avanza. En torno al vehículo se forma un campo de flujo como el representado en la figura 5.2

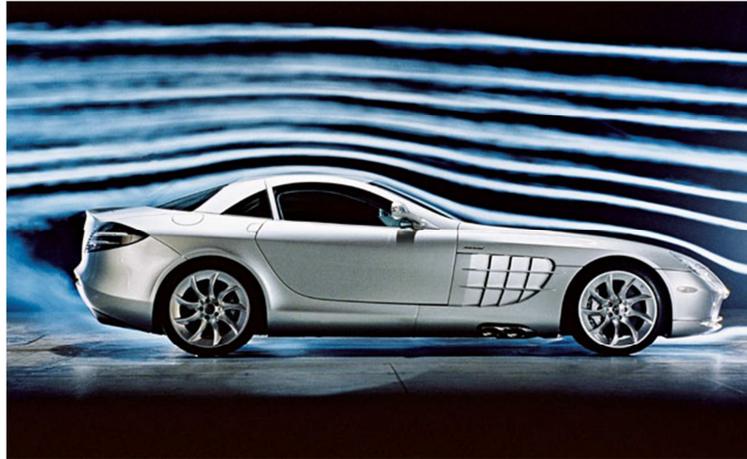


Figura 5.2 flujos del aire alrededor de un vehículo

Fuente: <http://pi2bach.colegioalboran.es/wp-content/uploads/2011/12/mercedes-tunel-viento.jpg>

En las zonas en las que no se producen "separaciones" entre el fluido y la superficie del vehículo, se forma una capa límite de unos pocos milímetros de espesor gobernado por la viscosidad del aire.

5.2 Acciones aerodinámicas sobre los vehículos automóviles

5.2.1 Fuerzas sobre los vehículos

Las acciones aerodinámicas que actúan sobre un vehículo automóvil, en el caso más general, pueden representarse por una resultante general de las fuerzas, aplicadas al centro de gravedad del vehículo, así tenemos las fuerzas que influyen en la aerodinámica del vehículo al estar en circulación:

- Resistencia aerodinámica al avance F_{xa}
- Empuje lateral aerodinámico F_{ya}
- Sustentación aerodinámica F_{za}

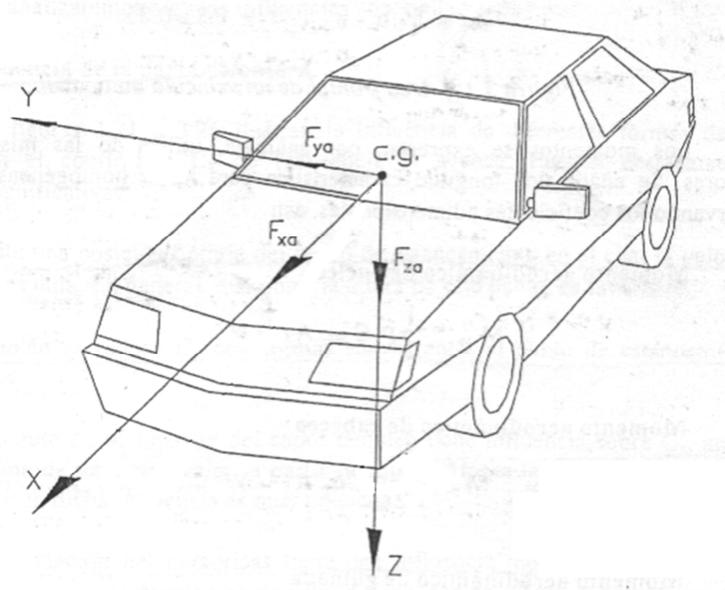


Figura 5.3: fuerzas de naturaleza aerodinámica que actúan sobre un vehículo.

Fuente: Referencia 3

Como área característica se adopta la mayor sección transversa, que denominaremos área frontal (figura 5.4).

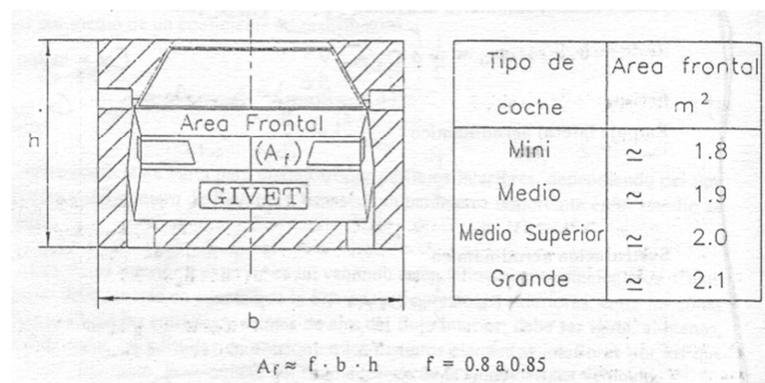


Figura 5.4 Área frontal de un vehículo automóvil

Fuente: Referencia 3

5.2.2 Resistencia al avance

El valor del coeficiente de resistencia al avance de C_x se ve afectado por un elevado número de factores de diseño: forma de la delantera, inclinación del parabrisas, techo, laterales, bajos, ruedas, spoiler delanteros y traseros, salientes, flujo interior, equipajes en techo, remolques, etc. Su análisis requiere una extensión que sobrepasa los límites de este trabajo.

Aunque se presentan valores con los que se pueden apreciar la influencia de ciertas partes y diseños del vehículo, en el coeficiente de resistencia al avance, deben tenerse en cuenta que tales influencias son interdependientes entre si y que, por tanto, en el diseño de un vehículo han de contemplarse conjuntamente todas las partes y zonas.

Debemos insistir, en que no existen modelos teóricos precisos para predecir la resistencia aerodinámica, como tampoco las demás acciones de esta naturaleza, por lo que los resultados experimentales constituyen la fuente más importante de datos y conocimientos sobre la influencia de diferentes variables geométricas, o de otra naturaleza, sobre los distintos coeficientes aerodinámicos.

La resistencia aerodinámica depende del flujo exterior del vehículo y de la circulación interior. La proporción en que cada una de estas resistencias influye en la global, depende de la forma del cuerpo y de la lisura de sus superficies.

5.2.3 Empuje lateral aerodinámico

Cuando el aire se mueve respecto al vehículo asimétricamente respecto a su plano longitudinal es decir con un cierto ángulo de incidencia, se produce un incremento de presión de lado de barlovento y depresión en el sotavento, ello origina una fuerza lateral F_{ya} aplicada en el punto adelantado respecto al centro de gravedad.

Las formas del vehículo influyen en los valores de estas dos acciones aerodinámicas, en general, superficies laterales planas y prolongadas hacia la parte trasera, como vehículos tipo furgonetas o familiares (trasera cuadrada) aumenta F_{ya} .

5.2.4 Influencia de la parte Trasera

En la figura 5.5 se representan las tres formas más usuales del perfil longitudinal de la parte trasera del vehículo, esta influencia en la resistencia aerodinámica al avance es significativa, así tenemos



Figura 5.5 Formas usuales de la trasera de los vehículos.

Fuente: <http://www.16valvulas.com.ar/wp-content/uploads/2009/06/td-atras-fiat-linea.JPG>

Las diferentes formas producen flujos de aire distintos, que afectan, lógicamente, a la presión de la parte trasera o a la pérdida de origen viscoso. *En el caso de la parte trasera cuadrada, típica de furgonetas, turismos de tipo familiar o similares, se producen separaciones formando vórtices en dirección perpendicular al flujo, es decir en dirección transversal al vehículo. La trasera tipo (a), inclinada, se caracteriza por generar un flujo con dos vórtices orientados en dirección longitudinal como se presenta en la figura 5.1. El ángulo de inclinación respecto al techo suele ser pequeño. La parte trasera tipo (c), en escalón es una mezcla entre las dos anteriores.*

En la figura 5.6 se pone de manifiesto la influencia del ángulo de pendiente de la superficie trasera sobre el coeficiente aerodinámico de avance C_x , y se establece un criterio para definir el límite entre las formas “cuadrada” e “inclinada” caracterizada por flujos diferentes como antes se indicó. Este límite se encuentra para valores del ángulo ϕ comprendidos entre unos 28 y 32°. Para los valores grandes de ϕ , el flujo se separa desde la línea de finalización del techo.

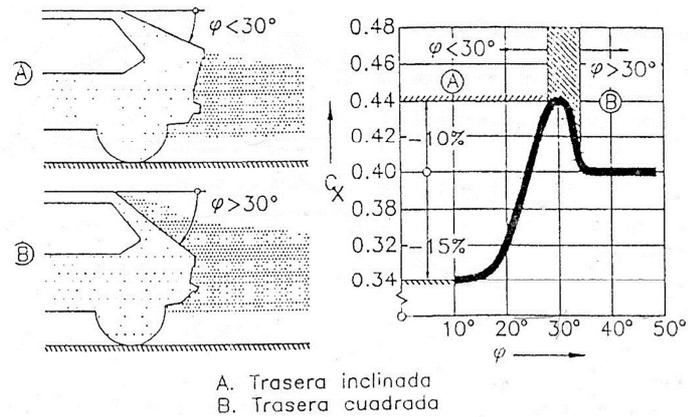


Figura 5.6 Influencia de la pendiente de la superficie trasera en el C_x

Fuente: Referencia 3

En la tabla 5.1 se indica la clasificación según tipos de traseras, en función de los valores angulares. Se ha puesto de manifiesto, experimentalmente, para cada tipo de parte trasera, los efectos que se indican en la tabla siguiente.

Tipo	C_x	C_z (Eje trasero)
(a) Inclinada	Baja	Baja
(b) Cuadrada	Moderada	Baja
(c) En escalón	Alta	Alta

Tabla 5.1 Influencia de los tipos de trasera sobre diferentes coeficientes aerodinámicos.

Fuente: Autores

5.2.5 Sustentación aerodinámica

La diferencia entre las presiones en la parte inferior y superior del vehículo origina un empuje aerodinámico. Normalmente F_{za} tiene un sentido tal que compensa parte del peso del vehículo descargando los ejes, en consecuencia, reduce el peso adherente, lo cual puede tener alguna influencia negativa en la dinámica longitudinal y lateral del vehículo. Esta influencia es importante en los vehículos de competición, con peso relativamente reducido y velocidades muy elevadas.

El valor del coeficiente de sustentación C_z suele variar, en turismos entre 0.2 y 0.5. En vehículos de competición suele ser negativo y tomar un valor mucho mayor.

Existen tres formas fundamentales de reducir o incluso hacer negativa, la fuerza de sustentación aerodinámica, estas son:

- Variando la configuración básica del vehículo
- Instalando deflectores con “efecto de ala negativa”
- Mediante dispositivo de efecto de suelo

En relación con la configuración básica del vehículo el valor de coeficiente de sustentación disminuye si se elimina zonas de separación de flujo en la parte superior, las cuales originan disminución de presión. Los valores del coeficiente de sustentación se reduce con una parte delantera baja (figura 5.7), y si es posible cóncava, superficie lisa en el techo y parte posterior elevada en la (figura 5.8) pueden usarse spoilers y otras ayudas aerodinámicas para lograr efectos análogos (figura 5.9). El ángulo de ataque del vehículo y la distancia al suelo de sus bajos afectan también al coeficiente de sustentación.

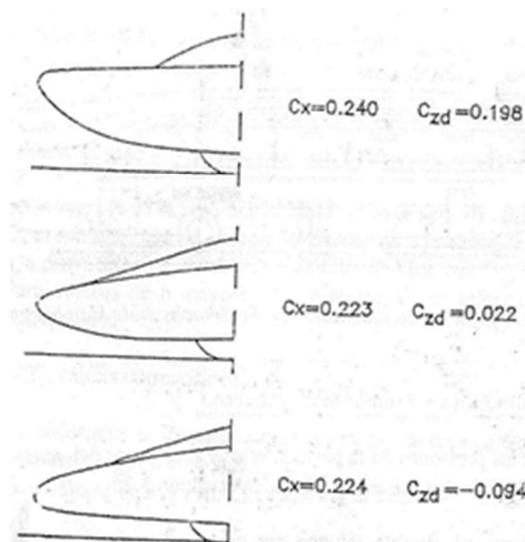


Figura 5.7 Coeficientes para diferentes configuraciones de la delantera

Fuente: Referencia 3

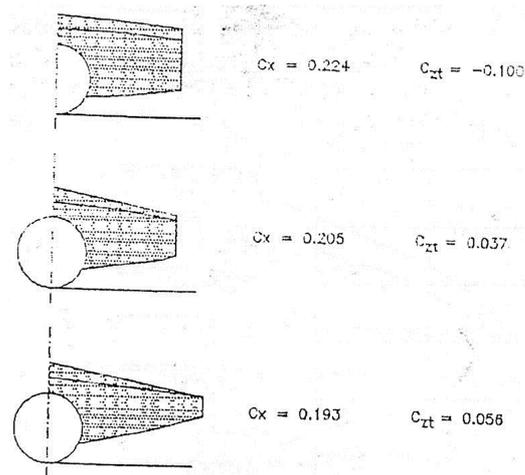


Figura 5.8 Coeficientes aerodinámicos para diferentes configuraciones de la parte posterior del vehículo.

Fuente: Referencia 3

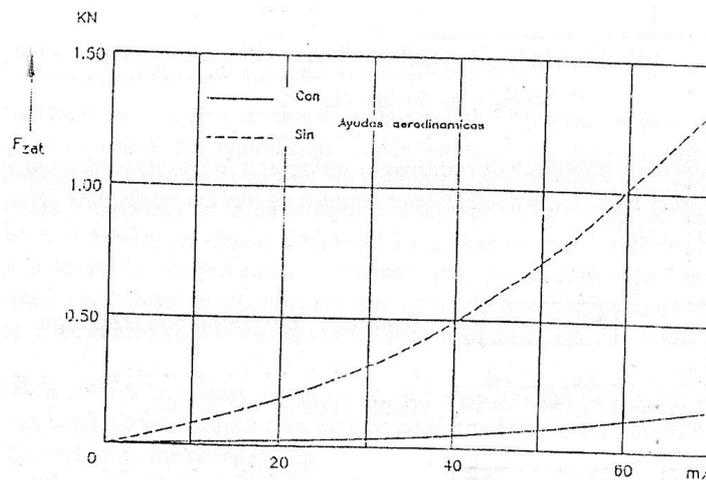


Figura 5.9 Variación de la sustentación aerodinámica con la velocidad y uso de ayudas aerodinámicas (faldón delantero y spoiler trasero) en el porche 911 carrera.

Fuente: Referencia 3

Para lograr sustentaciones pueden instalarse “alas” invertidas; el efecto de estas aumenta con sus separación del suelo así como retrasando el “ala” posterior cuanto sea posible por detrás del eje trasero y separando la delantera por delante del eje anterior.

Por último, el efecto suelo, consiste en producir una zona de alta velocidad y baja presión (efecto Venturi) entre el bajo del vehículo y el suelo. Este efecto puede lograrse curva hacia afuera una parte del bajo del vehículo y carenando los laterales

para producir una especie de túnel en la que se logre el denominado efecto Venturi. Con estas disposiciones se puede lograr una fuerza sustentadora negativa muy altas.

5.3 Comprobación de la velocidad de flujo de aire dentro del túnel

Dentro de los puntos importantes a tomar en cuenta es la velocidad del flujo que genera el túnel en la sección de pruebas, en la entrada y en la salida. Dicha velocidad fue tomada mediante el posicionamiento adecuado de un anemómetro en los diferentes puntos a medir; así tenemos que el túnel desarrolla 23.4m/s en la zona de pruebas a una frecuencia de 70 hz del variador de frecuencia como se muestra en la figura 5.10, sin alcanzar los 30m/s que se obtuvo en los cálculos, esto debido a que ocurren pérdidas de presión en el difusor ya que su construcción no está de acuerdo a los planos que se presentan en el anexo A con una transición adicional para el que no estaba calculado y diseñado, otro de los factores causantes de la baja velocidad es la baja eficiencia del ventilador y el incorrecto balance de sus aspas, el acabado superficial interno del túnel y por las fugas inevitables que se suscitan dentro del túnel todo esto hace que la eficiencia alcanzada sea del 75%.

A continuación se presentan los gráficos tomados en los puntos de prueba en donde se representan las diferentes velocidades generadas.



Figura 5.10 Velocidad máxima alcanzada en la sección de pruebas

Fuente: Autores

La velocidad alcanzada en los diferentes puntos de la entrada se representa en las siguientes figuras.

En la figura 5.10 muestra la velocidad alcanzada en la parte central del direccionador de flujo que es de 3.5m/s.



Figura 5.11 Velocidad alcanzada en el centro del direccionador de flujo

Fuente: Autores

En la parte superior derecha se alcanza una velocidad de 2.3 m/s como indica la figura 5.12



Figura 5.12 Velocidad alcanzada en la esquina superior derecha del direccionador de flujo

Fuente: Autores

En la parte superior izquierda se alcanza una velocidad de 2.0 m/s como indica la figura 5.13



Figura 5.13 Velocidad alcanzada en la esquina superior izquierda del direccionador de flujo

Fuente: Autores

En la parte inferior izquierda se alcanza una velocidad de 2.4 m/s como indica la figura 5.14



Figura 5.14 Velocidad alcanzada en la esquina inferior izquierda del direccionador de flujo

Fuente: Autores

En la parte inferior derecha se alcanza una velocidad de 2.3 m/s como indica la figura 5.15



Figura 5.15 velocidad alcanzada en la esquina inferior izquierda del direccionador de flujo

Fuente: Autores

Como conclusión podemos decir que el flujo de aire a la entrada del túnel es estable, debido a que los valores no son iguales son similares en las 4 esquinas del direccionador de flujo variando en rangos con un máximo de 2.4m/s a un mínimo de 2.0m/s, demostrando un buen comportamiento en esta sección.

La velocidad que se alcanza en la salida del túnel es de 9.1 m/s como se representa en la figura 5.16



Figura 5.16 Velocidad alcanzada en la salida del túnel de viento

Fuente: Autores

Una vez obtenidos los resultados en la práctica se procede en la tabla 5.2 a contrastar con los resultados que se obtuvieron en los cálculos presentados en el capítulo 2 tabla 2.7 y con la simulación ubicada en el capítulo 3 figura 3.11.

Elemento	Vel. Calculada (m/s)	Vel. Simulada (m/s)	Vel. Real(m/s)
Direccionador de flujo	3.072	3.985	3.50
Sección de pruebas	30.00	32.00	23.4
Difusor	10.865	11.00	9.10

Tabla 5.2 Diferencia entre las velocidades calculada, simulada y real

Fuente: Autores

La velocidad 23.4 m/s es la real alcanzada siendo 8.6 m/s menos que la simulada y 6.6 m/s de la calculada, la diferencia está en un rango aceptable. De igual manera nos mantenemos sobre la velocidad mínima de 20 m/s, de manera que estamos cumpliendo con las condiciones de las consideraciones de diseño que nos planteamos en el capítulo 2.

5.3 Análisis de la sustentación aerodinámica y visualización del flujo de aire sobre el perfil de los automóviles de prueba

Dentro de este análisis se considera la sustentación que se genera en el vehículo en función de su forma y modelo, de igual manera se podrá apreciar su variación mediante un ordenador, que nos facilitara realizar su respectivo análisis observándose como varía de un vehículo a otro *al modificar la velocidad del flujo de aire y la forma básica del vehículo mediante ayudas aerodinámicas (alerones)*.

En las fotografías siguientes se presentara el proceso de montaje y calibración de los sensores dentro de la sección de pruebas figura 5.17:



Figura 5.17 Calibración de los sensores en la zona de pruebas

Fuente: Autores

Los sensores deben estar dispuestos de tal manera que cada uno de ellos estén bajo los neumáticos del vehículo, previo a la medición de la batalla y ancho de vía del vehículo que será sometido a pruebas como se muestra en la figura 5.18.



Figura 5.18 Calibración de sensores (ancho de vía y batalla)

Fuente: Autores

Para la comprobación del correcto posicionamiento de los sensores se deberá visualizar las gráficas que mostraran la variación de sustentación en cada uno de los neumáticos en el ordenador las mismas que deben estar alineadas y enceradas como se indica en la figura 5.19:



Figura 5.19 Encerado de los sensores en el ordenador

Fuente: Autores

La variación de cada uno de los sensores se podrá ver con facilidad dado a que estos están asignados con un color diferente.

5.3.1 Pruebas del efecto de sustentación

Para realizar esta prueba utilizamos sensores de presión, los mismos que como se explicó irán colocados en cada uno de los neumáticos de tal manera que estas variaciones de presión nos indican la sustentación aerodinámica de los vehículos, los vehículos que van a ser sometidos a pruebas son:

- CHEVROLET CORVETTE (Figura 5.20)
- AUDI R8 (Figura 5.24)
- BMW Z4 (Figura 5.28)

Prueba Chevrolet Corvette



Figura 5.20 Vehículo a escala 1:18 sometido a pruebas de sustentación aerodinámica

Fuente: Autores

Prueba a 10 km/h

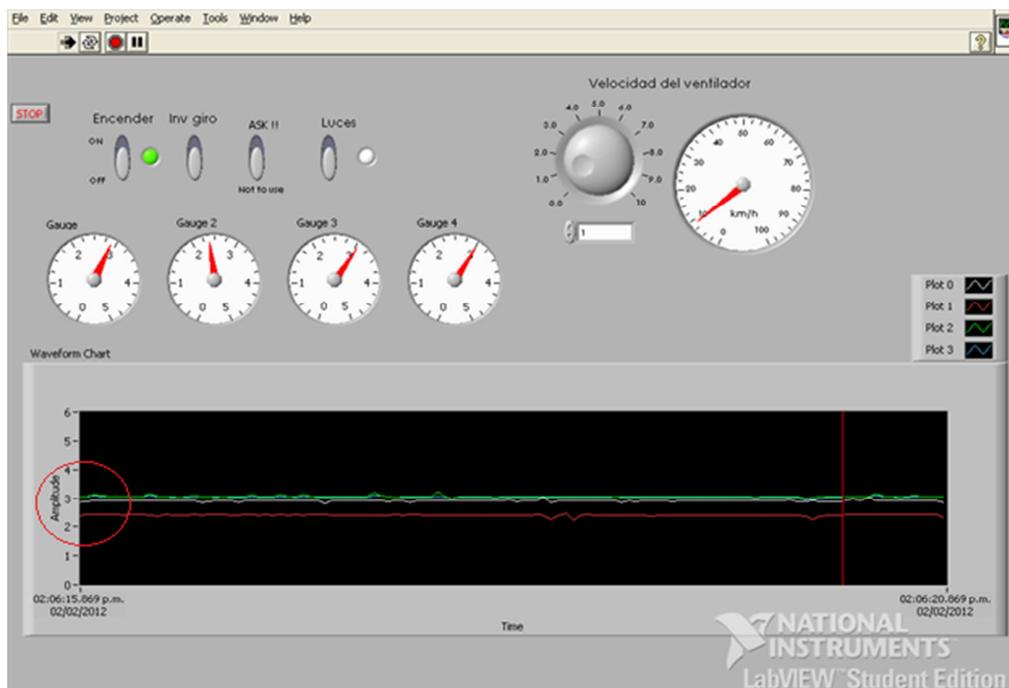


Figura 5.21 Prueba en vehículo corvette a escala a 10Km/h

Fuente: Autores

Prueba a 45 Km/h

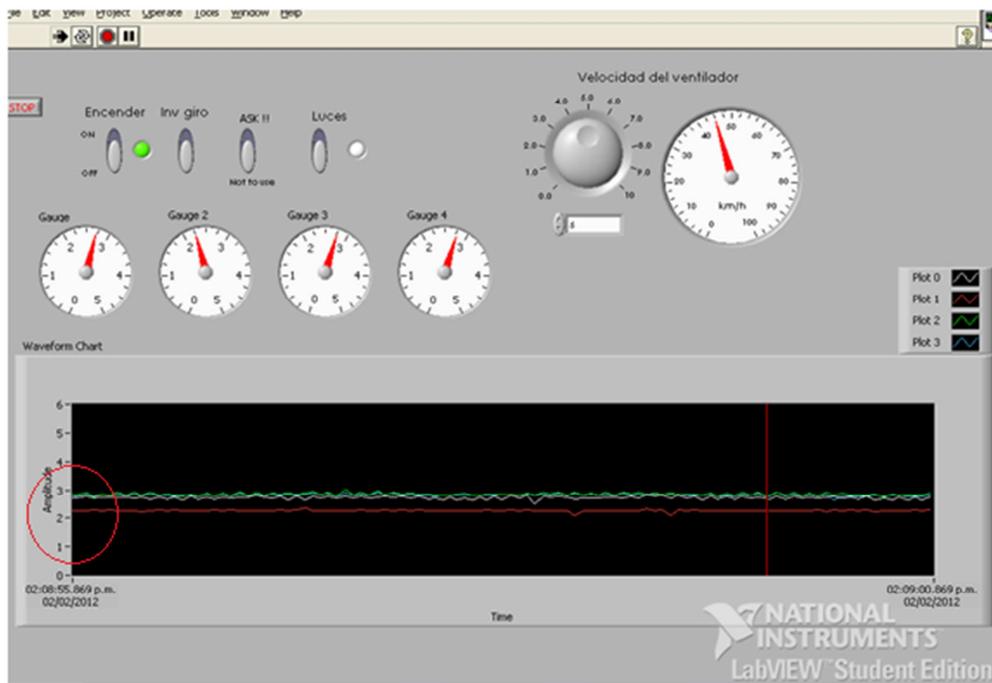


Figura 5.22 Prueba en vehículo corvette a escala a 45 Km/h

Fuente: Autores

Prueba a 90 Km/h

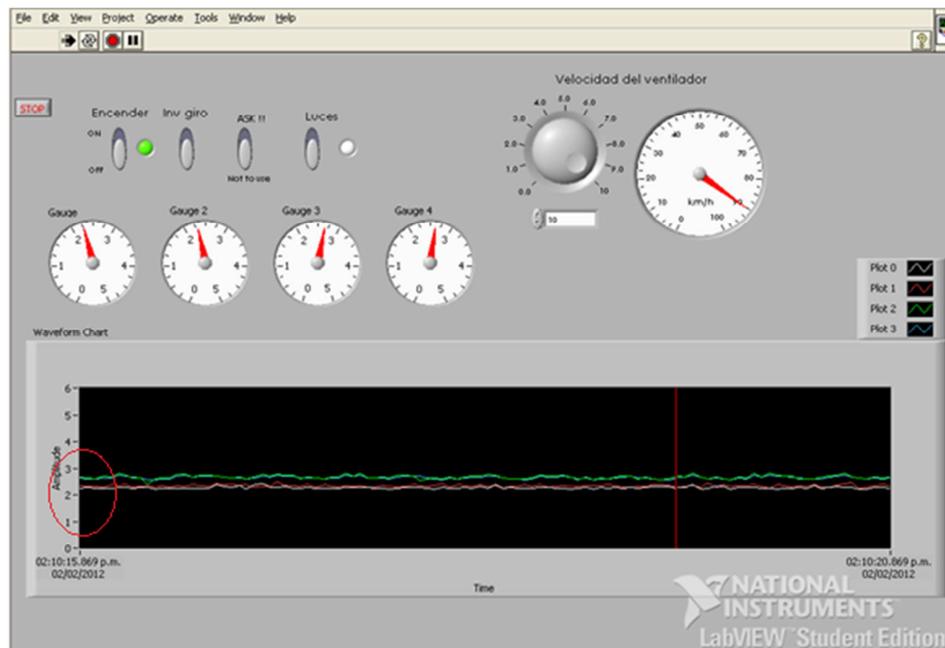


Figura 5.23 Prueba en vehículo corvette a escala a 90Km/h

Fuente: Autores

Mediante la prueba sobre este vehículo podemos concluir que existe variación de sustentación negativa, dado que los valores emitidos por los sensores nos indican lo antes mencionado, es decir es inversamente proporcional al mayor velocidad menor sustentación, esto se debe a que el vehículo está diseñado para este fin ya que son de altas prestaciones lo que sirve para una mayor estabilidad y adherencia a la calzada.

Prueba en Audi R8



Figura 5.24 Vehículo a escala 1:18 sometido a pruebas de sustentación

Fuente: Autores

Prueba a 10 Km/h

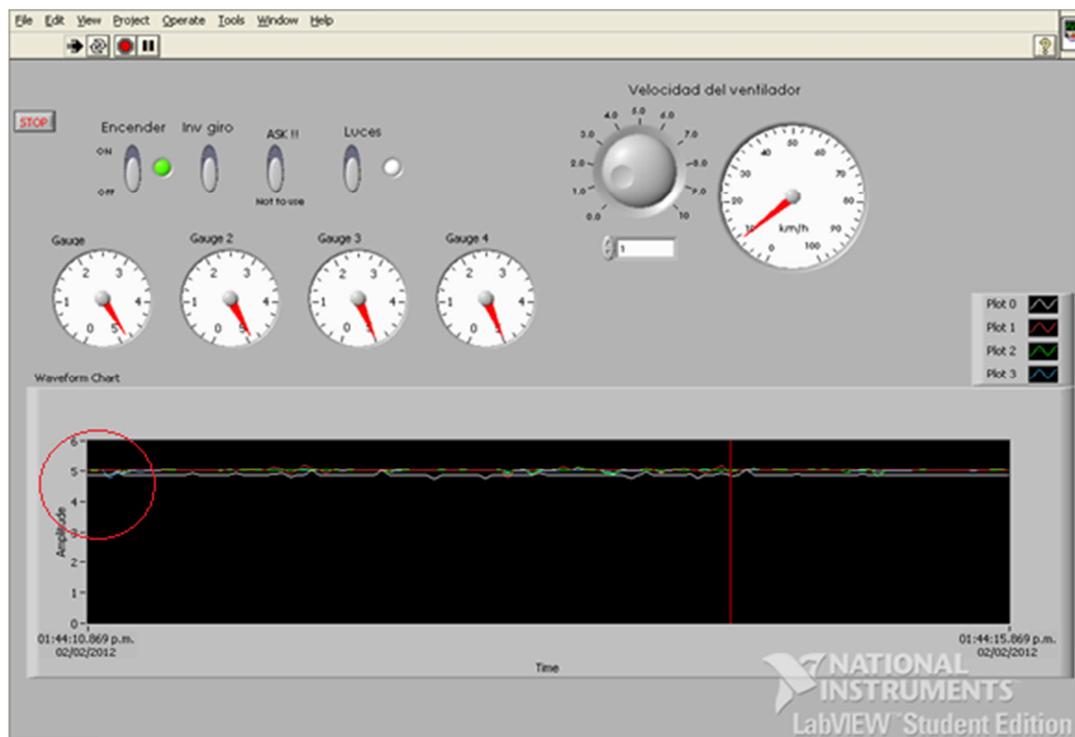


Figura 5.25 Prueba en vehículo Audi R8 a escala a 10Km/h

Fuente: Autores

Prueba a 45 Km/h

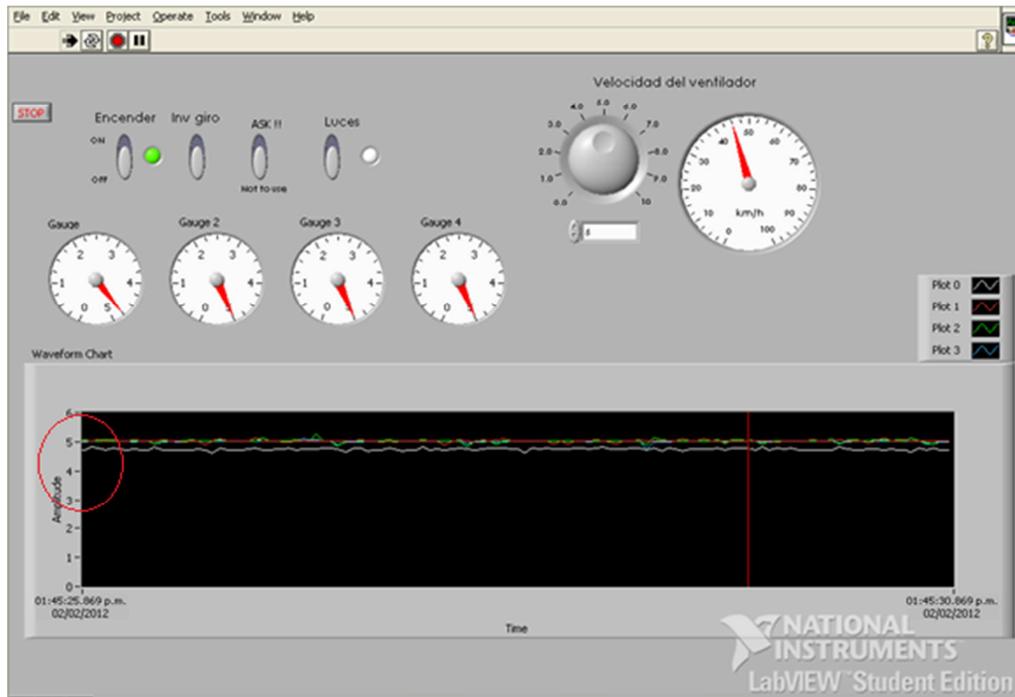


Figura 5.26 Prueba en vehículo Audi R8 a escala a 45Km/h

Fuente: Autores

Prueba a 90 Km/h

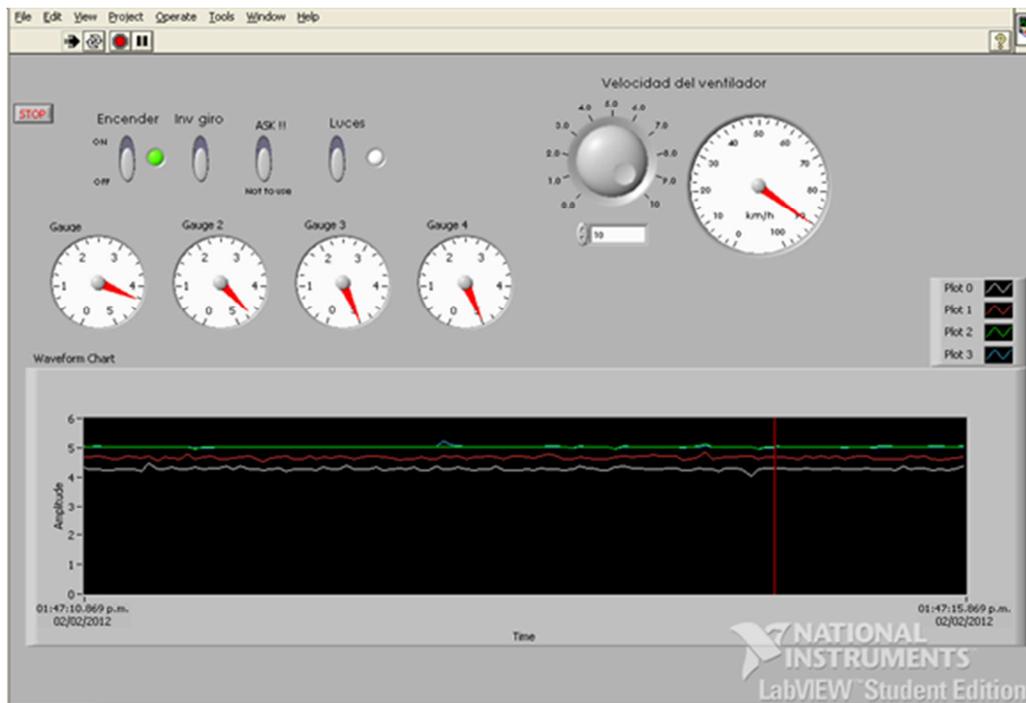


Figura 5.27 Prueba en vehículo Audi R8 a escala a 90 Km/h

Fuente: Autores

De igual manera para esta prueba se calibró los sensores como se indicó anteriormente, las velocidades utilizadas para este efecto son las mismas, arrojando los resultados mostrados en las figuras anteriores, dándonos como conclusión que existe un evidente sustentación negativa la misma que va aumentando a medida que se eleva la velocidad.

Prueba BMW Z4



Figura 5.28 Vehículo a escala 1:18 sometido a pruebas de sustentación

Fuente: Autores

Prueba a 10 km/h

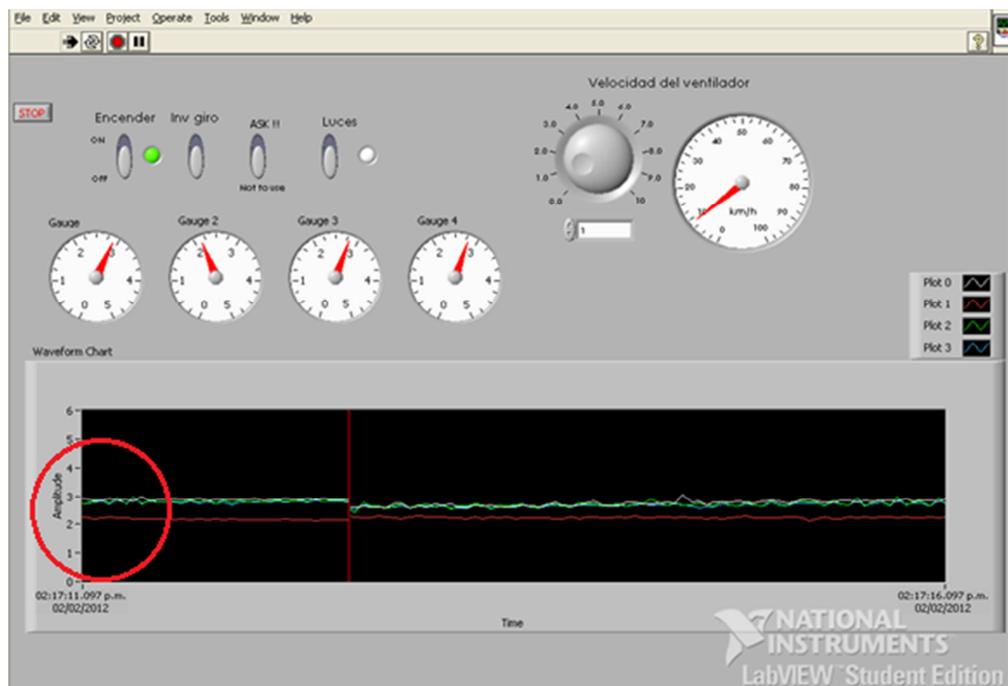


Figura 5.29 Prueba en vehículo BMW Z4 a escala a 10 Km/h

Fuente: Autores

Prueba a 90 Km/h

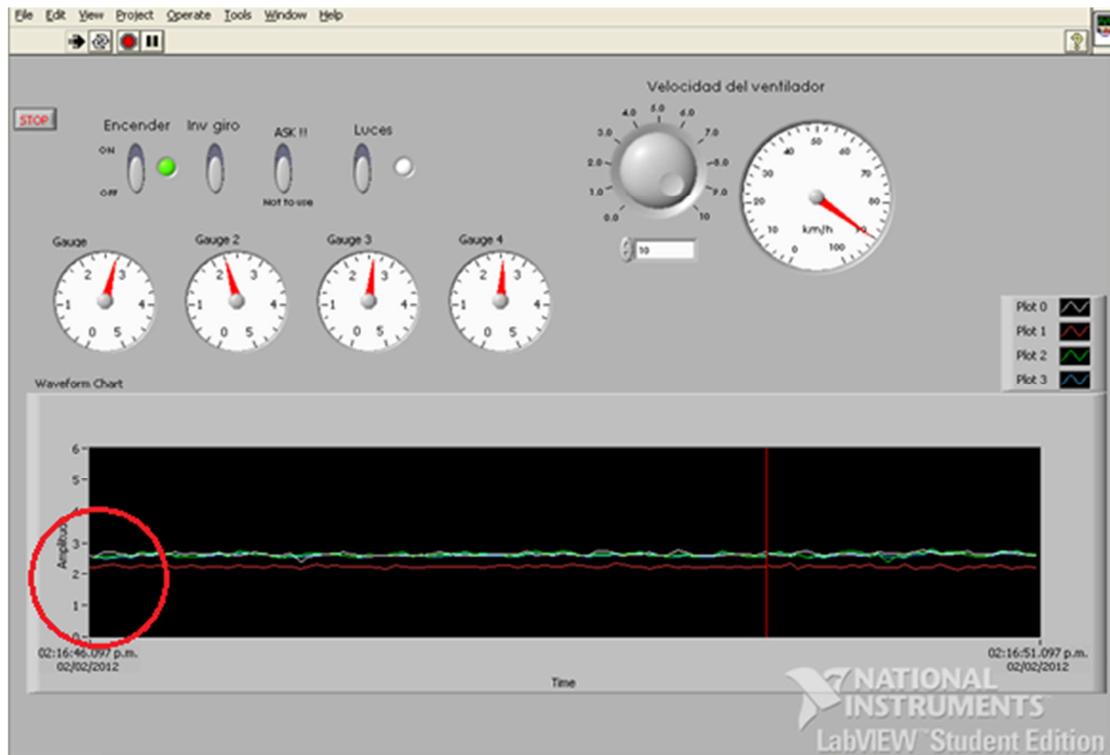


Figura 5.30 Prueba en vehículo BMW Z4 a escala a 90 Km/h

Fuente: Autores

En esta prueba se puede observar que la sustentación negativa dada en el vehículo varía equitativamente en las ruedas posteriores ya que casi no existe desfase entre las líneas de color verde y amarillo indicándonos que el asentamiento del vehículo en la parte posterior es uniforme y de igual manera en la parte delantera del vehículo también existe variación.

Podemos concluir diciendo que mediante estas pruebas los vehículos se comportan de tal forma que a altas velocidades estos se adhieren más al piso dándonos también mayor estabilidad al momento de curvar o simplemente viajando en línea recta.

Las ayudas aerodinámicas utilizadas en los vehículos de prueba como es el caso del Audi "R8" y BMW "Z4" hacen que las fuerzas sustentadoras negativas sean mayores como se ve en la teoría haciendo que el túnel de viento sean de gran ayuda

al momento de analizar y abordar este tema, debido a que mediante el estudio y fabricación de spoilers, alerones se podrá comprobar lo mencionado.

5.3.2 Análisis del comportamiento de la capa límite

Las pruebas que se realizaron sobre este tema, se analizaran el comportamiento del flujo de aire, así como de las turbulencias generadas en la parte posterior del vehículo, en los distintos modelos sometidos a estudio como son:

- CREVROLET CORVETTE (Figura 5.20)
- BMW Z4(Figura 5.28)
- AUDI R8 (Figura 5.24)
- VOLKSWAGEN NEW BEETLE (Figura 5.36)

Chevrolet Corvette

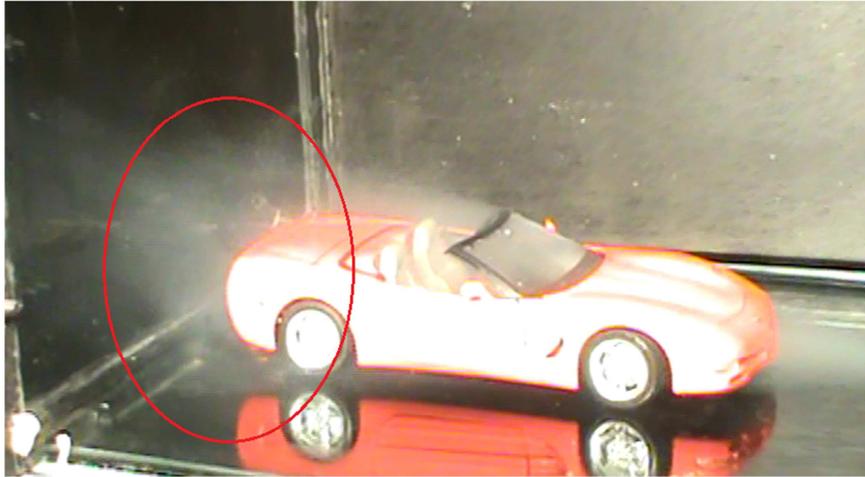


Figura 5.31 Vehículo a escala 1:18 sometido a pruebas de capa límite

Fuente: Autores

En los siguientes gráficos se observa la formación de la capa límite en la superficie del vehículo misma que se genera por el contacto del aire con la superficie exterior y que se destruye en la parte posterior del automóvil generándose así turbulencia.

En los gráficos posteriores iremos observando cómo se comporta el fluido cuando se pone en contacto con la superficie del vehículo.

BMW Z4

Figura 5.32 Vehículo con alerón sometido a pruebas de capa limite

Fuente: Autores



Figura 5.33 Vehículo sin alerón sometido a prueba de capa limite

Fuente: Autores

En el BMW “Z4” debido a que dispone una parte posterior en forma de escalón hace que se genere separaciones formando vórtices figura 5.33 en dirección perpendicular al flujo y a su vez también se producirá dos vórtices en dirección longitudinal del vehículo, todo esto de forma teórica. En la práctica mediante el uso de humo podemos observar que se cumple este postulado, el mismo que se podrá corroborar el momento de observar los videos realizados durante el ensayo.

En la figura 5.32 mediante la utilización de un alerón con derivas hacemos que disminuya la formación de vórtices en la parte posterior del vehículo, por lo tanto de esta manera se reduce la turbulencia y aumentamos la carga aerodinámica.

Audi R8



Figura 5.34 Vehículo con alerón sometido a prueba de capa límite

Fuente: Autores



Figura 5.35 Vehículo sin alerón sometido a prueba de capa límite

Fuente: Autores

En estas graficas podemos observar de mejor manera la influencia del alerón sobre la parte posterior del vehículo dándonos resultados similares en las pruebas anteriores

Volkswagen New Beetle



Figura 5.36 Vehículo a escala con parte trasera inclinada

Fuente: Autores



Figura 5.37 Vista superior de vehículo con la parte trasera inclinada

Fuente: Autores

Este modelo de vehículo debido a su forma inclinada en la parte posterior, se caracteriza por generar dos vórtices orientados en dirección longitudinal al vehículo como se representa en la figura 5.37, generándose turbulencia en la parte posterior baja del mismo.

De esta manera podemos observar la importancia de la parte posterior del vehículo y su influencia dentro del comportamiento aerodinámico del mismo. Lo que nos da una carga aerodinámica baja según la tabla 5.1.

La forma que más influencia tiene sobre la resistencia al avance es la configuración en escalón. Especialmente si se sube la altura del maletero y se consigue que el flujo que se desprende al final del techo se vuelva a adherir al final del maletero, se obtiene una reducción del C_x .

Capítulo 6. Análisis de costos

6.1 Análisis de costos

En este capítulo, analizaremos la factibilidad económica del proyecto de tesis. Desde un principio, al realizar el anteproyecto de esta tesis, los costos de inversión iban a ser elevados, y consientes de aquello mantuvimos nuestro tema.

A pesar de utilizar muy pocos elementos, el costo final era importante, pues los elementos eran costosos, pero se los podía conseguir en el mercado nacional o su importación era posible. Nos hemos valido de los materiales y equipamiento de la Universidad para abaratar costos, afortunadamente el elementos más costoso pero indispensable como es la Tarjeta de adquisición DAQ NI 6212, estaba disponible en los laboratorios de Ingeniería Eléctrica, de ahí que se pudo acortar el presupuesto, llegando de igual manera a finalizar la tesis y cumplir con nuestros objetivos.

En capítulos anteriores se ha detallado y señalado la aplicación de cada elemento del túnel, y ahora trataremos los costos de cada uno, en los anexos se mostrará las proformas de los elementos en detalle.

En la tabla 6.1 se muestra el resumen de costos de la inversión.

Descripción	Costo unitario	Cantidad	Costo Total (USD)
Túnel de viento en tol negro	800.00	1	800.00
Ventilador 2CC3 636-5YB6 Siemens	565.6	1	565.60
Variador de frecuencia más accesorios	280.00	1	280.00
Celdas de carga (sensores de presión)	18.00	4	80.64
Tarjeta de adquisición <i>NI USB 6212</i>	1397.09	1	1397.09
Máquina de humo más accesorios	165.00	1	165.00
Cable de alimentación	15.00	1	15.00
Ordenador	550.00	1	550.00
Anemómetro	200.00	1	200.00
Estabilizador de flujo	20.00	1	20.00
Manga de acople del ventilador	30.00	1	30.00
Material de oficina	100.00	-	100.00
Extras	200.00	-	200.00
Total			4403.33

Tabla 6.1 Descripción y costos de los elementos

Fuente: Autores

Este es el presupuesto real para la construcción y funcionamiento del túnel, con sus componentes básicos. Gracias al apoyo de la Universidad Politécnica Salesiana a las carreras de Ingeniería Mecánica Automotriz, Ingeniería Mecánica e Ingeniería Eléctrica, nos entregaron con acta de préstamo los siguientes elementos.

Descripción	Costo unitario	Cantidad	Costo Total (USD)
Celdas de carga (sensores de presión)	18.00	4	80.64
Tarjeta de adquisición <i>NI USB 6212</i>	1397.09	1	1397.09
Ordenador	550.00	1	550.00
Anemómetro	200.00	1	200.00
Total			2227.73

Tabla 6.2 Elementos prestados por la universidad Politécnica Salesiana

Fuente: Autores

Siendo la inversión final para realizar la Tesis de **USD2175.6**, y con esto tener el túnel finalizado y funcional para realizar las pruebas.

Realizamos algunas consultas sobre túneles de Viento con diseño similar, por ejemplo “Omega’s laboratory-grade Bench Wind Tunnel” de la casa fabricante Omega, con accesorios llega a un costo de USD11700, sin contar con los impuestos de importación y transporte, con velocidad máxima de 45m/s, y dimensiones de la sección de pruebas cuadrada de 200mm de lado y 230mm de longitud. Este túnel duplica la velocidad a la que alcanzamos con nuestro túnel, pero la sección de prueba es 3/4 partes de la nuestra, la inversión de nuestro túnel es de USD4400 frente a los USD11700 + imp del túnel de Omega. Adicionalmente nuestro túnel mide la sustentación lo que no hace el de Omega, al nuestro se lo puede acoplar accesorios adicionales (implementación de un nuevo proyecto) y la sección de pruebas es amplia y los vehículos serían prácticamente inmunes a los efectos de las paredes laterales. El flujo es estable y en las pruebas que hemos realizado ha sido necesaria solo la mitad de la capacidad para observar el comportamiento del flujo.

Con esto, validamos nuestro proyecto de tesis de manera positiva al ser estable y confiable, y se lo podrá utilizar para el estudio de la aerodinámica de los vehículos u otros objetos según sea la necesidad de análisis, conociendo las propiedades y limitaciones de nuestro túnel de viento.

Conclusiones

Mediante el análisis de resultados del proyecto se llegó a establecer las siguientes conclusiones

- Previo a la construcción del túnel de viento se realizó un análisis comparativo de varios tipos de túneles de viento, mediante matrices de alternativas en las cuales se ubicaron condiciones que debían cumplir los distintos tipos, teniendo en cuenta como parámetro principal la velocidad y complejidad del diseño, es así como se descartaron túneles con número de Mach $M > 0.7$ pues una velocidad de 400km/h da un número Mach de aproximadamente 0.27. De aquí que es suficiente un subsónico. Y en lo que respecta a la complejidad de diseño, supera ampliamente el de ciclo cerrado a uno de ciclo abierto, con prestaciones y utilidades similares; por último, se seleccionó un túnel de aspirado por tener menores pérdidas y mayor facilidad de acople, de modo que la selección final fue un *túnel de viento subsónico de aspirado de ciclo abierto*.
- Un túnel de viento es un tubo de Venturi, y reduciendo la sección de pruebas se consigue un incremento de la velocidad. Idealmente al tener un caudal de aire circulando, este va a ser el mismo en todas las secciones y tendrá que variar la velocidad, de forma inversamente proporcional a la sección; sin embargo las pérdidas de carga reducen la eficiencia del túnel reduciendo la velocidad máxima calculada, es por eso que se deben calcular bien todas las pérdidas para optimizar el diseño geométrico de todos los componentes del túnel reduciendo las pérdidas. La velocidad final replanteada resultó ser de 30m/s o 108km/h, un caudal de aire de 3m³/s y una pérdida de carga de 4.52m
- En base a las pérdidas de carga, se puede calcular la presión estática que se va a generar dentro del túnel. Este dato y el caudal son los mínimos necesarios para determinar el tipo de ventilador a utilizar. Se debe también saber que un ventilador centrífugo supera mayor presión estática pero el caudal no es muy

elevado, lo contrario ocurre con un ventilador axial siendo mayor su caudal pero se utiliza para presiones estáticas altas. El diseño hubiera alcanzado muy bien esas velocidades con un ventilador centrífugo, pero su limitante fue el costo y su adquisición.

- La simulación con el software especializado reafirmó nuestros cálculos, al ser muy similares en velocidades y las presiones dentro del túnel, este capítulo fue determinante para calmar la intriga que se tiene al realizar los cálculos, además de ser un método moderno de optimización de energía y evitar sobredimensionar los elementos, incrementando así los costos de producción.
- La velocidad del aire alcanzada en el túnel fue de 23.4 m/s, a diferencia de la calculada y simulada que fue de 30m/s, esto nos da una eficiencia de 75% en los que respecta a la velocidad, el 25% restante, se le puede atribuir a:
1- la eficiencia del ventilador, 2- mal balance de las hélices del ventilador, 3 - Mala manufacturación del difusor no muy conforme con los planos, al tener una transición para el que no estaba calculado y diseñado, 4 – acabado superficial interno irregular y 5 – Fugas inevitables. Algunas de estas no se podían remediar como en la parte del ventilador, sin embargo podemos hablar de un costo beneficio bastante aceptable.
- Los materiales utilizados para la elaboración del túnel resultaron prácticos por su facilidad de moldeo, fácil adquisición y costo económico, permitiéndonos abaratar costos por la cantidad de tol negro utilizado.
- Dentro de las pruebas, es de gran importancia la emisión de humo y una correcta iluminación, debido a que nos permite visualizar el comportamiento del flujo de aire sobre la superficie exterior del vehículo, permitiéndonos apreciar cómo actúa el aire sobre las diferentes formas del vehículo, especialmente las perturbaciones de la capa límite en el contorno de la parte trasera de diversos diseños.

- El túnel de viento diseñado es una herramienta muy importante dentro del análisis de la aerodinámica vehicular, pudiendo analizar las modificaciones aerodinámicas que se puede realizar en la estructura básica de los vehículos sometidos a pruebas. Una de los fenómenos más apreciables es la anti sustentación, de la cual mediante nuestro software especializado, pudimos observar y concluir que es directamente proporcional a la velocidad, al obtener señales de amplitudes diferentes que indican que el vehículo se asienta más con una mayor velocidad.

- El estabilizador es un elemento clave dentro del túnel, ya que a pesar de que el flujo era turbulento con un número de Reynolds de $1.16E6$ (un flujo laminar tiene un $Re < 2100$), lo rectifica y lo vuelve laminar, esto nos ayuda en la visualización y estabilidad dentro de la sección de pruebas, permitiéndonos tomar datos adecuadamente en cada una de las pruebas.

- Como conclusión final podemos considerar a nuestro túnel como una herramienta confiable y estable, que se puede aplicar en el análisis aerodinámico en general, no únicamente en aplicaciones de diseño vehicular sino también en diseño de perfiles que vayan a someterse al flujo de un fluido a su alrededor, al tener una sección de pruebas amplia y con sensores que permiten visualizar el desbalance del equilibrio sobre la superficie en que reposa podríamos interpretar como está influenciando su geometría frente a la acción del viento.

Recomendaciones

En base a los resultados obtenidos luego de la construcción y pruebas hechas con el túnel de viento, recomendamos:

- Utilizar un ventilador con diagramas de trabajo garantizados al igual que su funcionamiento, para de esta manera alcanzar las velocidades calculadas y mantener una eficiencia elevada del túnel.
- Al ser muy influyente el acabado superficial interior del túnel, sugerimos utilizar un material al que se le pueda pulir de manera que se alcance rugosidades mínimas, para que este no sea un factor que se vea reflejado en los resultados finales.
- Ubicar adecuadamente los sensores de presión para obtener señales que partan de un mismo punto referencial.
- Antes de hacer las pruebas, nivelar el túnel para evitar turbulencias y un incorrecto flujo del aire.
- No manipular descuidadamente los equipos de control del túnel, son costosos y delicados, y al hablar del variador de frecuencia tiene carga acumulada que si no se lo deja descargar (5 minutos mínimo) luego de la desconexión, podría descargarse en quien lo está manipulando.
- Poner atención en la correcta elaboración del direccionador de flujo, una buena manufacturación de este objeto casi nos garantiza un flujo laminar a pesar de que la ecuación de Reynolds nos indique un flujo turbulento.
- Reducir o eliminar las fugas en el túnel, especialmente en la sección de pruebas, estas fugas reducen la velocidad además que perturba el flujo normal del aire y/o el humo que arrastre.

- *Utilizar, implementar y explotar esta herramienta de laboratorio con nuevas investigaciones que permitan desarrollar el estudio en el área de la aerodinámica. Hemos desarrollado esta tesis de diseño y construcción de un túnel de viento con el objeto principal de hacer un aporte de ingeniería y contribuir con el crecimiento de nuevas ideas, y no continuar por una senda en la que muchas aspiraciones mueren al querer alzar el vuelo...*

Bibliografía

- [1] MUNSON, Bruce, y otros, *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*, Primera Edición, Editorial Limusa, México, 1999
- [2] MOTT, Robert, *Mecánica fluidos Aplicada*, Cuarta Edición, Editorial Prentice Hall Hispanoamericana SA, México, 1996
- [3] APARICIO, F., y otros. *Teoría de los vehículos automóviles*, Editorial Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid - España 2001.
- [4] YUNUS Çengel y MICHAEL Boles, *Termodinámica*, 5^{ta} edición Editorial Mc Graw Hill, México, 2007.
- TATMAN, Nathan. Wind Tunnel Design and Operation, Abril de 2011
<http://www.radford.edu/~chem-web/Physics/images/nathan-tatman-thesis.pdf>
- BLANCO, Jhonatan, Diseño de un túnel de viento, Abril de 2011
http://www.tecnicafl.es/UserFiles/File/articulos/2010/27-marzo/tunel_de_viento.pdf
- Túnel de Viento. Abril de 2011
http://es.wikipedia.org/wiki/Túnel_de_viento
- Flujo compresible. Abril de 2011
http://es.wikipedia.org/wiki/Flujo_compresible
- Principio de Bernoulli. Abril de 2011
http://es.wikipedia.org/wiki/Principio_de_Bernoulli
- Ventiladores Centrífugos. Marco Teórico. Abril 2011
<http://www.unet.edu.ve/~maqflu/doc/LAB-1-128.htm>

- s/a. Universidad EAFIT. Colombia
<http://bdigital.eafit.edu.co/PROYECTO/P620.0042CDA174/marcoTeorico.pdf>

- Ventiladores Centrífugos. Soler&Palau Ventilation Group. Enero 2010
http://www.soler-palau.com.mx/ima/products/pdf/190_03112010_Cat%20SA.pdf

- Ventiladores Industriales. Siemens
http://www.siemens.com.co/SiemensDotNetClient_Andina/Medias/PDFS/697_20090612191056.pdf

NI - 402 - 11

Cuenca, 11 de agosto del 2011

Sres.

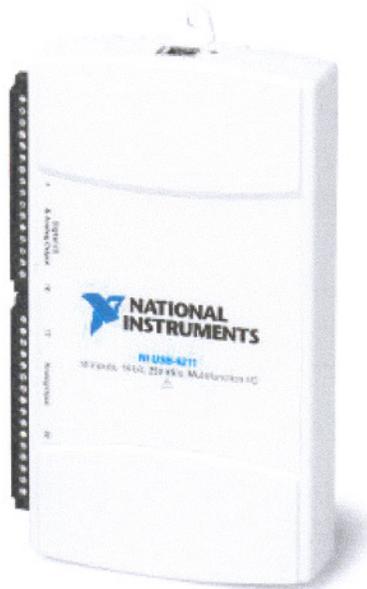
José Bermeo

Universidad Politécnica Salesiana
Cuenca

De mis consideraciones.

A continuación usted puede encontrar la oferta económica por la tarjeta de adquisición de datos DAQ NI USB 6211.

NI USB-6211



DAQ Multifunción de la Serie M de 16 bits, 250 kS/s, Energizado por Bus

- 16 entradas analógicas (16 bits, 250 kS/s)
- 2 salidas analógicas (16 bits a 250 kS/s), 4 entradas digitales, 4 salidas digitales, contadores de 32 bits
- Energizado por bus USB para una mayor movilidad, conectividad de señal integrada
- NI signal streaming para transferencia de datos bidireccional a alta velocidad en USB; la versión OEM está disponible
- Compatible con LabVIEW, LabWindows™/CVI y Measurement Studio para Visual Studio .NET
- Software controlador NI-DAQmx y software interactivo NI LabVIEW SignalExpress LE para registro de datos

Información General

El módulo USB-6211 de National Instruments es un módulo de adquisición de datos (DAQ) multifunción de la Serie M energizado por bus USB y optimizado para una precisión superior a velocidades de muestreo más altas. Ofrece 16 entradas analógicas, velocidad de muestreo de un solo canal a 250 kS/s, dos salidas analógicas, cuatro líneas de entrada digital, cuatro



líneas de salida digital, cuatro rangos de entrada programable (de ± 0.2 V a ± 10 V) por canal, disparo digital y dos contadores/temporizadores.

El módulo NI USB-6211 está diseñado específicamente para aplicaciones móviles o con restricciones de espacio. La instalación plug-and-play minimiza el tiempo de configuración y montaje mientras que la conectividad directa con terminal de tornillo mantiene los precios bajos y simplifica las conexiones de señal. Este producto no requiere potencia externa.

Este módulo también cuenta con la nueva tecnología NI Signal Streaming la cual permite transferencia de datos bidireccional a alta velocidad parecida a DMA a través del bus USB. Para mayor información sobre NI Signal Streaming, consulte la sección de Recursos.

Cada módulo cuenta con una versión OEM. Consulte la sección de recursos o use el menú de la izquierda para obtener información técnica y precios.

OFERTA ECONOMICA:

Ítem	p/n	descripción	p.u.	cant	p.t.
1	779676-01	NI USB-6211 Bus-Powered M Series Multifunction DAQ Device, NI-DAQmx driver software and Signal Express LE for Windows	1.122,00	1	1.122,00
Subtotal:					1.122,00
IVA 12%					134,64
TOTAL					1.256,64

CONDICIONES COMERCIALES:

Tiempo de entrega: 45 días
Forma de pago: 70% al pedido 30% contra entrega.
Validez de la oferta: 45 días.
Garantía: 1 año contra defectos de fabricación.

Atentamente,

Fabián Romero Córdova
Ingeniero de Aplicación

NI - 401 - 11

Cuenca, 11 de agosto del 2011

Sres.

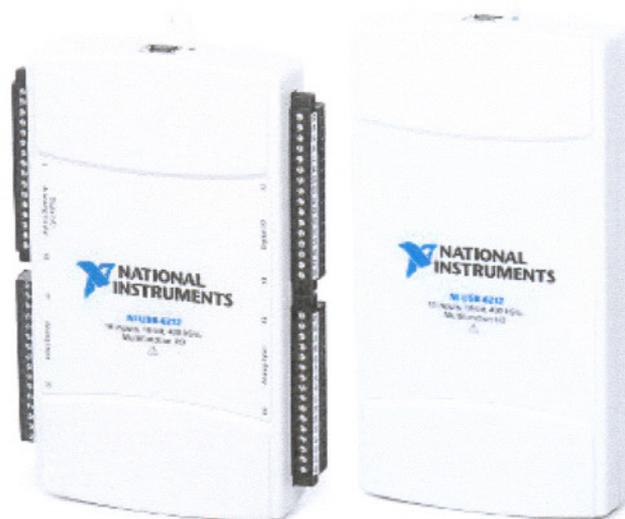
José Bermeo

Universidad Politécnica Salesiana
Cuenca

De mis consideraciones.

A continuación usted puede encontrar la oferta económica por la tarjeta de adquisición de datos DAQ NI USB 6212.

NI USB-6212



DAQ MIO de la Serie M de 16 bits, 400 kS/s, Energizado por B

- 16 entradas analógicas (16 bits, 400 kS/s)
- 2 salidas analógicas (16 bits a 250 kS/s), 32 E/S digitales, dos contadores de 32 bits
- Energizado por bus USB para una mayor movilidad, conectividad de señal integrada
- NI signal streaming para transferencia de datos bidireccional a alta velocidad en USB; la versión OEM está disponible
- Compatible con LabVIEW, ANSI C/C++, C#, Visual Basic .NET y Visual Basic 6.0
- El software de NI-DAQmx y software interactivo LabVIEW SignalExpress LE para registro de datos

Información General

El módulo USB-6212 de National Instruments es un módulo de adquisición de datos (DAQ) multifunción de la Serie M energizado por bus USB y optimizado para una precisión superior a velocidades de muestreo más altas. Ofrece 16 entradas analógicas, velocidad de muestreo de 400 kS/s, dos salidas analógicas, 32 líneas de E/S digital, cuatro rangos de entrada programable (± 0.2 V a ± 10 V) por canal, disparo digital y dos contadores/temporizadores.

El módulo NI USB-6212 está diseñado específicamente para aplicaciones móviles o con restricciones de espacio. La instalación plug-and-play minimiza el tiempo de configuración y montaje mientras que la conectividad directa con terminal de tornillo mantiene los precios bajos y simplifica las conexiones de señal. Este producto no requiere potencia externa.

El NI USB-6212 también cuenta con la nueva tecnología NI Signal Streaming la cual permite transferencia de datos bidireccional a alta velocidad parecida a DMA a través del bus USB. Para mayor información sobre NI Signal Streaming, consulte la sección de Recursos.

Cada módulo cuenta con una versión OEM. Consulte la sección de recursos o use el menú de la izquierda para obtener información técnica y precios.

OFERTA ECONOMICA:

Ítem	p/n	descripción	p.u.	desc	cant	p.t.
1	780107-01	NI USB-6212 Bus-Powered M Series Multifunction DAQ Device, NI-DAQmx driver software and LabVIEW SignalExpress LE for Windows	1.386,00	10%	1	1.247,40
Subtotal:						1.247,40
IVA					12%	149,69
TOTAL						1.397,09

CONDICIONES COMERCIALES:

Tiempo de entrega: 45 días
Forma de pago: 70% al pedido 30% contra entrega.
Validez de la oferta: 45 días.
Garantía: 1 año contra defectos de fabricación.

Atentamente,



Fabián Romero Córdova
Ingeniero de Aplicación

Cuenca, 1 de noviembre de 2011

ACTA DE ENTREGA RECEPCION

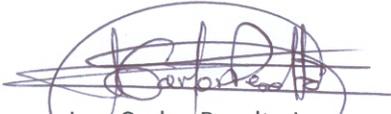
El día de hoy se entrega a los señores estudiantes: BERMEO VALLEJO JOSE ENRIQUE con cedula N° 0302025614, SERPA MEDINA PEDRO ISRAEL y el señor SIGUENCIA BERMEO DANY FABIAN con cedula N° 0302193099, alumnos de la carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz, una DAC con las siguientes características:

- CABLE USB
- SERIE 14BFD
- 32 ENTRADAS/SALIDAS DIGITALES
- 16 ENTRADAS/SALIDAS ANALOGICAS
- 16 SALIDAS ANALOGICAS

Plazo de devolución 5 semanas a partir de hoy (2 de diciembre del año en curso).

Los señores estudiantes se comprometen a devolver la DAC en perfecto estado y si surgiera algún daño por su mala utilización devolverán una nueva.

Para constancia firma el Coordinador de laboratorios y los dos estudiantes que llevan la tarjeta.



Ing. Carlos Peralta L



BERMEO VALLEJO JOSE ENRIQUE



SIGUENCIA BERMEO DANY FABIAN





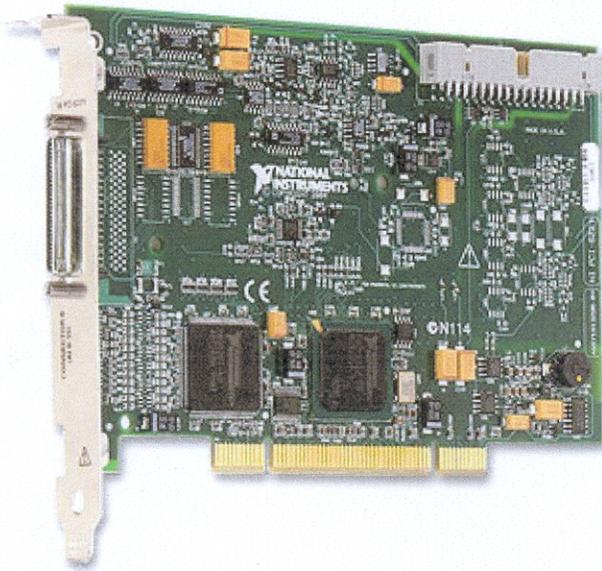
NI - 482 - 11

Cuenca, 26 de septiembre de 2011

Señores.
UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA
Atn. Ing. Jose Bermeo
Cuenca

Ref.: Sistemas DAQ

NI PCI-6221



16 Entradas Analógicas de 16 Bits a 250 kS/s

- Dos salidas analógicas de 16 bits (833 kS/s), 24 E/S digitales, contadores de 32 bits
- Certificado de calibración trazable expedido por el NIST y más de 70 opciones de acondicionamiento de señales
- E/S digital correlacionadas (8 líneas sincronizadas, 1 MHz)
- La tecnología de calibración NI-MCal proporciona una mayor precisión
- Seleccione la Serie M de alta velocidad para alcanzar velocidades de muestreo 5 veces más rápidas o la Serie M de alta precisión para obtener 4 veces más resolución.
- Software controlador NI-DAQmx y software interactivo NI LabVIEW SignalExpress LE para registro de datos

Información General

La PCI-6221 de National Instruments es una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) multifunción de bajo costo de la Serie M optimizada para aplicaciones condicionadas por costos. Seleccione los dispositivos de la Serie M de alta velocidad para alcanzar velocidades de muestreo 5 veces más rápidas o los dispositivos de alta precisión de la Serie M para obtener 4 veces más resolución y precisión superior en las medidas.

Las tarjetas de bajo costo de la Serie M ofrecen características avanzadas como el controlador de sistema NI-STC 2, el amplificador programable NI-PGIA 2 y la tecnología de calibración NI-MCal para mejorar el rendimiento y la precisión. Para aprender más sobre las tecnologías de la Serie M, especificaciones de dispositivos e información sobre cables y accesorios recomendados, por favor consulte la hoja de especificaciones.



Software Controlador

Los dispositivos de la Serie M funcionan con diversos sistemas operativos usando tres opciones de software incluyendo NI-DAQmx, NI-DAQmx Base y el Hardware de Medida DDK. Busque la información en la sección de Recursos para aprender más sobre el software controlador o para descargar un controlador. Los dispositivos de la Serie M no son compatibles con el controlador Traditional NI-DAQ (Legado).

Software de Aplicación

Cada tarjeta de adquisición de datos de la Serie M incluye una copia de NI LabVIEW SignalExpress así usted puede adquirir, analizar y presentar datos rápidamente sin programación. Además de LabVIEW SignalExpress, los dispositivos de adquisición de datos de la Serie M son compatibles con las siguientes versiones (o posteriores) del software de aplicación de NI – LabVIEW 7.x, LabWindows™/CVI 7.x, o Measurement Studio 7.x; o LabVIEW con el Módulo LabVIEW Real-Time 7.1. Los dispositivos de adquisición de datos de la Serie M también son compatibles con Visual Studio .NET, C/C++ y Visual Basic 6.

Especificaciones

General

Producto	PCI-6221
Familia de Productos	DAQ Multifunción
Formato Físico	PCI
Número de Parte	779066-01
Sistema Operativo/Objetivo	Real-Time , Linux , Mac OS , Windows
Soporte para LabVIEW RT	Sí
Familia de Productos DAQ	Serie M
Tipos de Medida	Codificadores de cuadratura , Digital , Frecuencia , Voltaje
Compatibilidad con RoHS	Sí
Entrada Analógica	
Canales	16 , 8
Canales de una sola terminal	16
Canales Diferenciales	8
Resolución	16 bits
Velocidad de Muestreo	250 kS/s
Máx. Voltaje de Entrada Analógica	10 V
Rango de Voltaje Máximo	-10 V , 10 V
Precisión Máxima del Rango de Voltaje	3100 µV
Sensibilidad Máxima del Rango de Voltaje	97.6 µV
Rango de Voltaje Mínimo	-200 mV , 200 mV
Mínima Precisión del Rango de Voltaje	112 µV
Mínima Sensibilidad del Rango de Voltaje	5.2 µV
Número de Rangos	4
Muestreo Simultáneo	No



Memoria Interna	4095 muestras
Salida Analógica	
Canales	2
Resolución	16 bits
Máx. Voltaje de Entrada Analógica	10 V
Rango de Voltaje Máximo	-10 V , 10 V
Precisión Máxima del Rango de Voltaje	3230 μ V
Rango de Voltaje Mínimo	-10 V , 10 V
Mínima Precisión del Rango de Voltaje	3230 μ V
Razón de Actualización	833 kS/s
Capacidad de Corriente Simple	5 mA
E/S Digital	
Canales Bidireccionales	24
Canales de Entrada Únicamente	0
Canales de Salida Únicamente	0
Número de Canales	24 , 0
Temporización	Software , Hardware
Máximo Rango de Tiempo	1 MHz
Niveles Lógicos	TTL
Entrada de Flujo de Corriente	Sinking , Sourcing
Salida de Flujo de Corriente	Sinking , Sourcing
Filtros de Entrada Programables	Sí
¿Soporta Estados de Encendido Programables?	Sí
Capacidad de Corriente Simple	24 mA
Capacidad de Corriente Total	448 mA
Temporizador Watchdog	No
¿Soporta Protocolo de Sincronización para E/S?	No
¿Soporta E/S de Patrones?	Sí
Máximo Rango de Entrada	0 V , 5 V
Máximo Rango de Salida	0 V , 5 V
Contadores/Temporizadores	
Número de Contadores/Temporizadores	2



Número de Canales DMA	2
Operaciones a Búfer	Sí
Eliminación de Rebotes	Sí
Sincronización GPS	No
Rango Máximo	0 V , 5 V
Frecuencia Máxima de la Fuente	80 MHz
Entrada Mínima de Ancho de Pulso	12.5 ns
Generación de Pulso	Sí
Resolución	32 bits
Estabilidad de Tiempo	50 ppm
Niveles Lógicos	TTL

Especificaciones Físicas

Oferta económica:

Ítem	p/n	descripción	p.u.	cant	p.t.
1	779066-01	NI PCI-6221, M Series DAQ (16 Analog Inputs, 24 Digital I/O, 2 Analog Outputs) with NI-DAQmx driver software.	792,00	1	792,00
2	776844-01	SCB-68 Noise Rejecting, Shielded I/O Connector Block	396,00	1	396,00
3	192061-02	SHC68-68-EPM Shielded Cable, 68-D-Type to 68 VHDCI Offset, 2 m	168,00	1	168,00
Subtotal:					1.356,00
IVA 12%					162,72
TOTAL					1.518,72

CONDICIONES COMERCIALES:

Tiempo de entrega: 45 días
 Forma de pago: 70% al pedido, 30% contra entrega
 Validez de la oferta: 30 días.
 Garantía: 1 año contra defectos de fabricación.
 Entrega a domicilio en las principales ciudades del país.

Esta cotización está sujeta a términos y condiciones publicados en <http://www.ni.com/legal/termsofsale/us>.

Los tiempos de entrega están sujetos a disponibilidad del producto. La fecha exacta de entrega se conoce al momento de colocar la orden. Para colocar la orden de compra incluya el número de esta cotización, nombre al cual saldrá la factura, número de RUC y dirección de envío.

Atentamente

Ing. Fabián Romero Cordova
Ingeniero de Aplicación



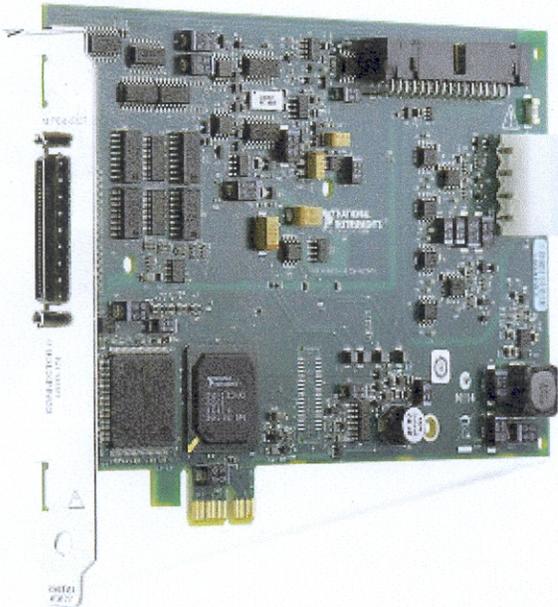
NI - 483 - 11

Cuenca, 26 de septiembre de 2011

Señores.
UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA
Atn. Jose Bermeo.
Cuenca

Ref.: Sistemas DAQ

NI PCIe-6321



Adquisición de Datos de la Serie X

- 16 entradas analógicas, 250 kS/s, resolución de 16 bits, ± 10 V
- Dos salidas analógicas, 900 kS/s, resolución de 16 bits, ± 10 V
- 24 líneas de E/S digital (8 temporizadas por hardware hasta 1 MHz)
- Cuatro contadores/temporizadores de 32 bits para PWM, codificador, contar eventos y más
- Temporización y disparo avanzados con la tecnología NI-STC3 de temporización y sincronización.
- Soporte para Windows 7/Vista/XP/2000

Información General

Los dispositivos de adquisición de datos multifunción de la Serie X proporcionan un nuevo nivel de rendimiento con el bus PCI Express de alto rendimiento, la tecnología NI-STC3 de temporización y sincronización y software controlador y de aplicación optimizado por multinúcleo.

Bus PCI Express de Alto Rendimiento

PCI Express ofrece ancho de banda dedicado de hasta 250 MB/s en cada dirección de cada dispositivo y los dispositivos de la Serie X tienen una interfaz PCI Express con optimizaciones para alto rendimiento y baja latencia.

Tecnología NI-STC3

La tecnología NI-STC3 de temporización y sincronización ofrece funcionalidad avanzada de temporización, incluyendo motores independientes de temporización analógica y digital, tareas de medida repetidas y cuatro contadores/temporizadores con más



funcionalidad que antes.

Software de Adquisición de Datos

Los dispositivos de la Serie X incluyen el software controlador NI-DAQmx de hilos múltiples, el cual es compatible con las siguientes versiones (o posteriores) de software de aplicación de NI - LabVIEW 8.2, LabWindows™/CVI 7.x; o Measurement Studio 7.x; LabVIEW SignalExpress 1.x; o LabVIEW con el Módulo LabVIEW Real-Time 8.2. Los dispositivos de la Serie X son también compatibles con C/C++ y Microsoft Visual Studio .NET. NI-DAQmx incluye gratis el software de registro de datos LabVIEW SignalExpress LE y cientos de ejemplos para ayudarle a comenzar a trabajar rápidamente con su aplicación.

La marca LabWindows se usa bajo una licencia de Microsoft Corporation. Windows es una marca registrada de Microsoft Corporation en Estados Unidos y otros países.

Especificaciones

General

Producto	NI PCIe-6321
Familia de Productos	DAQ Multifunción
Formato Físico	PCI Express
Número de Parte	781044-01
Sistema Operativo/Objetivo	Real-Time , Windows
Soporte para LabVIEW RT	Sí
Familia de Productos DAQ	Serie X
Tipos de Medida	Codificadores de cuadratura , Digital , Frecuencia , Voltaje
Compatibilidad con RoHS	Sí
Entrada Analógica	
Canales	16 , 8
Canales de una sola terminal	16
Canales Diferenciales	8
Resolución	16 bits
Velocidad de Muestreo	250 kS/s
Rendimiento (Todos los Canales)	250 kS/s
Máx. Voltaje de Entrada Analógica	10 V
Rango de Voltaje Máximo	-10 V , 10 V
Precisión Máxima del Rango de Voltaje	2.26 mV
Rango de Voltaje Mínimo	-0.2 V , 0.2 V
Mínima Precisión del Rango de Voltaje	72 µV
Número de Rangos	4
Muestreo Simultáneo	No
Salida Analógica	
Canales	2



DataLights

Soluciones de Control e Iluminación



Los Juglares 1-17 y Francisco de Orellana
PBX: (593) 7 288 2288 ■ Fax: (593) 7 281 7800
www.datalights.com.ec
info@datalights.com.ec
P.O.BOX: 01 05 1879 ■ Cuenca - Ecuador

Resolución	16 bits
Máx. Voltaje de Entrada Analógica	10 V
Rango de Voltaje Máximo	-10 V , 10 V
Precisión Máxima del Rango de Voltaje	3.27 mV
Razón de Actualización	900 kS/s
E/S Digital	
Canales Bidireccionales	24
Canales de Entrada Únicamente	0
Canales de Salida Únicamente	0
Número de Canales	24 , 0
Temporización	Software , Hardware
Líneas Sincronizadas	8
Máximo Rango de Tiempo	1 MHz
Niveles Lógicos	TTL
Entrada de Flujo de Corriente	Sinking , Sourcing
Salida de Flujo de Corriente	Sinking , Sourcing
Filtros de Entrada Programables	Sí
¿Soporta Estados de Encendido Programables?	Sí
Capacidad de Corriente Simple	24 mA
Capacidad de Corriente Total	576 mA
Temporizador Watchdog	Sí
¿Soporta Protocolo de Sincronización para E/S?	No
¿Soporta E/S de Patrones?	Sí
Máximo Rango de Entrada	0 V , 5 V
Máximo Rango de Salida	0 V , 5 V
Contadores/Temporizadores	
Número de Contadores/Temporizadores	4
Número de Canales DMA	8
Operaciones a Búfer	Sí
Eliminación de Rebotes	Sí
Sincronización GPS	No
Rango Máximo	0 V , 5 V



DataLights

Soluciones de Control e Iluminación



Los Juglares 1-17 y Francisco de Orellana
 PBX: (593) 7 288 2288 ■ Fax: (593) 7 281 7800
 www.datalights.com.ec
 info@datalights.com.ec
 P.O.BOX: 01 05 1879 ■ Cuenca - Ecuador

Frecuencia Máxima de la Fuente	100 MHz
Entrada Mínima de Ancho de Pulso	10 ns
Generación de Pulso	Sí
Resolución	32 bits
Estabilidad de Tiempo	50 ppm
Niveles Lógicos	5 V
Especificaciones Físicas	
Longitud	16.8 cm
Ancho	50 mm
Altura	9.9 cm
Conector de E/S	VHDCI hembra de 68 pines
Temporización/Disparo/Sincronización	
Disparo	Digital
Bus de Sincronización (RTSI)	Sí

Oferta Económica:

Ítem	p/n	descripción	p.u.	cant	p.t.
1	781044-01	NI PCIe-6321, X Series Multifunction DAQ (16 AI, 24 DIO, 2 AO), 250 kS/s single-channel sampling rate	792,00	1	792,00
2	776844-01	SCB-68 Noise Rejecting, Shielded I/O Connector Block	396,00	1	396,00
3	192061-02	SHC68-68-EPM Shielded Cable, 68-D-Type to 68 VHDCI Offset, 2 m	168,00	1	168,00
Subtotal:					1.356,00
IVA 12%					162,72
TOTAL					1.518,72

CONDICIONES COMERCIALES:

Tiempo de entrega: 45 días
 Forma de pago: 70% al pedido, 30% contra entrega
 Validez de la oferta: 30 días.
 Garantía: 1 año contra defectos de fabricación.
 Entrega a domicilio en las principales ciudades del país.

Esta cotización está sujeta a términos y condiciones publicados en <http://www.ni.com/legal/termsforsale/us>.

Los tiempos de entrega están sujetos a disponibilidad del producto. La fecha exacta de entrega se conoce al momento de colocar la orden. Para colocar la orden de compra incluya el número de esta cotización, nombre al cual saldrá la factura, número de RUC y dirección de envío.

Atentamente

Ing. Fabián Romero Cordova
 Ingeniero de Aplicación