



**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE
CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MÉCANICA
ESCUELA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TÚNEL DE
VIENTO PARA PRUEBAS AERODINÁMICAS EN
VEHÍCULOS PARA LA ESCUELA DE INGENIERÍA
AUTOMOTRIZ”**

**RUIZ AGUIRRE HUGO EDUARDO
CURICAMA GADVAY ÁNGEL RAÚL**

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del título de:

INGENIERO AUTOMOTRIZ

RIOBAMBA - ECUADOR

2013

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

2012-11-29

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

HUGO EDUARDO RUIZ AGUIRRE

Titulada:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO PARA PRUEBAS
AERODINÁMICAS EN VEHÍCULOS PARA LA ESCUELA DE INGENIERÍA
AUTOMOTRIZ”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO AUTOMOTRIZ

Ing. Geovanny Novillo.

DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Diego Constante
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Víctor Bravo
ASESOR DE TESIS

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

2012-11-29

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

ÁNGEL RAÚL CURICAMA GADVAY

Titulada:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO PARA PRUEBAS
AERODINÁMICAS EN VEHÍCULOS PARA LA ESCUELA DE INGENIERÍA
AUTOMOTRIZ”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO AUTOMOTRIZ

Ing. Geovanny Novillo.

DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Diego Constante
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Víctor Bravo
ASESOR DE TESIS

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: HUGO EDUARDO RUIZ AGUIRRE

TÍTULO DE LA TESIS: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO PARA PRUEBAS AERODINÁMICAS EN VEHÍCULOS PARA LA ESCUELA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ”

Fecha de Examinación:2013-10-07

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Marco Santillán PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Diego Constante DIRECTOR DE TESIS			
Ing. Víctor Bravo ASESOR			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Marco Santillán
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: ÁNGEL RAÚL CURICAMA GADVAY

TÍTULO DE LA TESIS: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO PARA PRUEBAS AERODINÁMICAS EN VEHÍCULOS PARA LA ESCUELA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ”

Fecha de Examinación:2013-10-07

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Marco Santillán PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Diego Constante DIRECTOR DE TESIS			
Ing. Víctor Bravo ASESOR			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Marco Santillán
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

DERECHOS DE AUTORÍA

El trabajo de grado que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual e industrial le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Hugo Eduardo Ruiz Aguirre

Ángel Raúl CuricamaGadvay

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico a mis padres que fueron pilares importantes en mi diario vivir, brindándome su cariño y su comprensión para los momentos buenos y malos.

A mis hermanos quienes siempre me apoyaron y que además de ser mi familia se convirtieron en mis amigos.

Hugo Ruiz Aguirre

Este trabajo dedico principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A mis padres, por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su apoyo incondicional. Ya mi hijo por ser la más grande felicidad de mi vida.

Ángel Curicama Gadway

AGRADECIMIENTO

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por los conocimientos impartidos a lo largo de mi carrera estudiantil.

A usted que toma en sus manos este trabajo.

“No nos falta valor para emprender ciertas cosas porque son difíciles, sino que son difíciles porque nos falta valor para emprenderlas”

Hugo Ruiz Aguirre

A Dios quien nos dio la vida y la ha llenado de bendiciones en todo este tiempo, a Él que con su infinito amor nos ha dado la sabiduría suficiente para culminar nuestra carrera universitaria.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, por todo el conocimiento brindado para culminar una etapa más en mi vida estudiantil.

Gracias a todas aquellas personas que de una u otra forma me ayudaron a crecer como personas y como profesional

“Ahora puedo decir que todo lo que soy es gracias a todos ustedes”

Ángel Curicama Gadway

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación.....	1
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	3
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	3
2. MARCO TEÓRICO	
2.1 Flujo.....	4
2.1.1 <i>Flujo laminar</i>	4
2.1.2 <i>Flujo turbulento</i>	4
2.2 Capa límite.....	6
2.3 Teorema de Bernoulli.....	7
2.4 Número de Reynolds.....	8
2.5 Principios y leyes de la aerodinámica de los vehículos.....	9
2.6 Efecto Venturi.....	17
2.7 Túnel de viento.....	18
2.7.1 <i>Principios de funcionamiento</i>	19
2.7.2 <i>Tipos de túnel de viento</i>	19
2.7.3 <i>Partes del túnel de viento</i>	20
2.8 Teoría de los modelos.....	21
2.8.1 <i>Semejanza de modelos</i>	22
2.8.2 <i>Teoría de modelos</i>	23
2.8.3 <i>Semejanza dinámica con predominio de la viscosidad</i>	24
3. DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DEL TÚNEL DE VIENTO	
3.1 Parámetros de diseño.....	25
3.2 Cálculo del caudal.....	25
3.3 Cálculo del flujo másico.....	26
3.4 Diseño y dimensionamiento de las principales secciones del túnel.....	27
3.4.1 <i>Zona de pruebas</i>	27
3.4.1.1 <i>Consideraciones para el diseño</i>	27
3.4.1.2 <i>Selección de materiales</i>	31
3.4.1.3 <i>Dimensionamiento</i>	31
3.4.2 <i>Zona de Contracción</i>	32
3.4.2.1 <i>Consideraciones para el diseño</i>	32
3.4.2.2 <i>Selección de materiales</i>	36
3.4.2.3 <i>Dimensionamiento</i>	36
3.4.3 <i>Difusor cónico</i>	37
3.4.3.1 <i>Consideraciones para el diseño</i>	37
3.4.3.2 <i>Selección de materiales</i>	39
3.4.4 <i>Honeycombs</i>	39
3.4.4.1 <i>Consideraciones para el diseño</i>	39
3.4.4.2 <i>Selección de materiales</i>	39
3.5 Cálculo de las pérdidas en el túnel de viento.....	39
3.6 Potencia del ventilador.....	40
3.7 Selección del ventilador.....	40

4.	CONSTRUCCIÓN	
4.1	Construcción del molde.	42
4.1.1	Plantillas de corte y bridas de unión.	42
4.1.2	<i>Corte de molde.</i>	42
4.1.3	<i>Unión de medias secciones.</i>	43
4.1.4	<i>Tallado de formas.</i>	43
4.1.5	<i>Unión de secciones y corrección de formas.</i>	44
4.1.6	<i>División de secciones.</i>	45
4.2	Construcción zona de pruebas.....	45
4.3	Construcción de difusor cónico.....	47
4.4	Construcción zona de contracción.	48
4.5	Construcción honeycombs.	49
4.6	Construcción de la zona impulsora.	50
4.7	Construcción de la bancada.....	51
4.8	Selección de los dispositivos eléctricos.	51
4.9	Dispositivos electrónicos.	53
5.	PRUEBAS Y RESULTADOS	
5.1	Instructivo de operación.....	58
5.2	Ensayos y pruebas.	66
5.2.1	<i>Datos obtenidos por el circuito electrónico.</i>	66
5.2.2	<i>Datos obtenidos por el anemómetro Krestel.</i>	68
5.3	Cálculos obtenidos con el programa Solidwork.	69
5.3.1	<i>Simulación del túnel de viento en el programa Solidwork.</i>	69
5.3.2	<i>Simulación de los vehículos en el programa Solidwork.</i>	69
5.4	Costos.....	75
5.4.1	<i>Costos directos</i>	76
5.4.2	<i>Costos indirectos</i>	76
5.4.3	<i>Costo total.</i>	76
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
6.1	Conclusiones.	77
6.2	Recomendaciones.....	78

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

PLANOS

LISTA DE TABLAS

	Pág.
1	Características técnicas 41
2	Características motor trifásico 52
3	Especificaciones del anemómetro..... 54
4	Características técnicas del variador de frecuencia 55
5	Datos obtenidos VWCombi 66
6	Datos obtenidos VW Escarabajo 66
7	Datos obtenidos Ford Focus Rally..... 67
8	Datos del anemómetro 68
9	Cálculos obtenidos VW Combi. 73
10	Datos obtenidos VW Escarabajo 74
11	Datos obtenidos Ford Focus Rally..... 75
12	Costos directos..... 76
13	Costos indirectos..... 76
14	Costo total..... 76

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1 Flujo laminar.....	4
2 Comparación entre flujo laminar y turbulento.....	4
3 Flujo turbulento	5
4 Capa límite.....	6
5 Teorema de Bernoulli	7
6 Flujo del viento	10
7 Gradientes de velocidad.....	12
8 Separación del flujo en un gradiente de presión adverso	13
9 Distribución de presiones	14
10 Sustentación y arrastre.....	15
11 Recirculación de aire en las ruedas.....	16
12 Patrón del flujo de aire en un compartimento de motor	17
13 Efecto Venturi.....	18
14 Túnel de viento	19
15 Túnel de viento de circuito abierto	20
16 Túnel de viento de circuito cerrado	20
17 Partes túnel de viento.....	20
18 Modelos de pruebas	23
19 Túnel.....	25
20 Cálculo de los perímetros de la zona de pruebas.....	28
21 Cálculo del perímetro total de la zona de pruebas.....	29
22 Dimensionamiento zona de prueba.....	32
23 Cálculo de los perímetros de la zona de contracción.....	33
24 Cálculo del perímetro total de la zona de contracción.....	33
25 Dimensionamiento zona de contracción	37
26 Cálculo del perímetro del difusor cónico.....	38
27 Plantillas de corte y bridas de unión	42
28 Molde de foam	43
29 Unión de secciones	44
30 Tallado de formas	44
31 Unión y corrección de forma	45
32 División de secciones	46
33 Construcción inicial de la zona de pruebas.....	46
34 Zona de pruebas terminada.....	47
35 Proceso de construcción del difusor cónico.....	47
36 Difusor cónico terminado	48
37 Proceso de construcción de la zona de contracción.....	48
38 Zona de contracción terminada.....	49
39 Proceso de construcción de la zona honeycombs.....	49
40 Zona honeycombs terminada.....	49
41 Zona impulsora terminada.....	50
42 Bancada.....	51
43 Motor trifásico	51
44 Cámara de humo	52
45 Sensor anemómetro (Krestel 4200)	53
46 Variador de frecuencia.....	54

47	Circuito electrónico cara frontal	56
48	Circuito electrónico cara posterior.....	57
49	Volkswagen Combi	73
50	Volkswagen Escarabajo.....	74
51	Ford Focus Rally.....	75

LISTA DE ANEXOS

- A** Viscosidad dinámica
- B** Características del ventilador
- C** Manual motor ABB
- D** Manual anemómetro Krestel
- E** Manual variador de frecuencia Siemens
- F** Programación circuito

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo conocer la interacción entre el vehículo y el flujo del aire, lo cual nos lleva a diseñar y construir un túnel de viento para pruebas aerodinámicas, por lo que la principal motivación fue crear el primer banco de pruebas en el área de aerodinámica, para una futura creación de un laboratorio del mismo en la Escuela de Ingeniería Automotriz de la ESPOCH.

La evolución tecnológica de los motores en los vehículos da como resultado altas velocidades produciendo inestabilidad al momento de la conducción, por ello la necesidad de emplear elementos aerodinámicos para producir mayor efecto suelo (sustentación negativa), y lograr que la conducción del automotor sea segura y estable. Para iniciar el desarrollo de la investigación se procede a realizar los cálculos pertinentes para el diseño, dimensionamiento, selección de materiales y construcción de cada una de las secciones que conforma el túnel de viento, una vez conseguido el diseño y la construcción del banco de pruebas se procede a realizar las pruebas necesarias para verificar que el funcionamiento sea correcto, además de obtener resultados de los diferentes modelos de prueba a distintas velocidades para que podamos conseguir las conclusiones definitivas.

El diseño y la construcción del túnel de viento permite tener una herramienta interactiva que facilita el estudio y la comprensión del comportamiento aerodinámico en el campo automotriz como también se pudo afianzar los conocimientos impartidos en las materias relacionadas al tema, recomendando que antes de realizar cualquiera de las pruebas en el banco aerodinámico se lea el manual para informarse de cómo es su funcionamiento para que su manejo sea el correcto para poder obtener los mejores resultados.

ABSTRACT

The present study aims to determine the interaction between the vehicle and the air flow, which leads us to design and build a wind tunnel for aerodynamic testing, so that the main motivation was to create the first test in the area aerodynamics, for future creation of a laboratory of the same at the School of Automotive Engineering ESPOCH.

The technological evolution of the engines in vehicles resulting in instability causing high speeds when driving, hence the need to employ to produce greater aerodynamic downforce (negative lift), and make driving the automobile is safe and stable.

To start the development of research proceeds to perform the calculations relevant to the design, sizing, material selection and construction of each of the sections that make up the wind tunnel once managed the design and construction of test we proceed to perform the necessary tests to verify proper operation, in addition to obtaining results of different test models at different speeds so we can get the conclusions.

The design and construction of the wind tunnel allows an interactive tool that facilitates the study and understanding of aerodynamics in the automotive field could also reinforce the knowledge imparted in matters relating to the issue, recommending that before any bench testing aerodynamic read the manual to find out how it works so that its management is correct in order to get the best results.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Los automóviles fueron uno de los grandes inventos de la humanidad que empezó su vida con el ingeniero mecánico alemán Karl Benz quien introdujo el primer automóvil de gasolina el cual fue un vehículo de tres ruedas que circuló por las calles de Munich.

En la actualidad la tecnología va implantando un innumerable número de posibilidades optimizando el nivel de vida, además que nos ayuda a movilizarnos de una manera más cómoda y sencilla; aunque no todo son beneficios, sino también existe una mayor cantidad de riesgos para los conductores ya que en nuestra época así como han evolucionado los vehículos también han mejorado las vías para transportarse, lo cual exige automotores de mayores prestaciones aerodinámicas para las exigencias actuales de movilización

Cada vez son más estudiados y elaborados los componentes vehiculares como son los alerones, spoilers, bumpers, faldones que ayudan a darle un mayor agarre al piso lo que conocemos comúnmente como efecto suelo, lo que nos beneficia con una mayor estabilidad, facilidad de conducción y sobretodo mayor seguridad para el conductor y sus pasajeros.

Todos estos fenómenos podrán ser estudiados con la ayuda de un túnel de viento o túnel aerodinámico ya que se podrá realizar prácticas en tiempo real de cómo interactúa el viento en contra de un vehículo en movimiento y como se puede corregir o implementar en los automotores nuevas partes para hacerlo más aerodinámico y por lo tanto más eficiente y más seguro.

1.2 Justificación

En nuestros tiempos la mayoría de personas por no decir en su totalidad realizan modificaciones estéticas a sus vehículos las que son realizadas principalmente en cambios exteriores de la carrocería con la única misión del disfrute visual.

Sin darse cuenta si lo que le colocan a su automotor tiene un propósito favorable para la conducción y sobre todo para la seguridad del conductor y de sus pasajeros, ya que estos cambios no influyen positivamente en la aerodinámica del vehículo por el contrario los hacen más inseguros y menos confiables al momento de la conducción, es por ello que en la actualidad se han inventado herramientas que nos ayudan a determinar si un componente aerodinámico es fiable o no para la carretera, por lo que nace la idea de un túnel de viento aerodinámico para la Escuela de Ingeniería Automotriz.

El túnel de viento nos ayudará a realizar pruebas prácticas de cómo es la interacción del automotor y la resistencia que ejerce el viento, con el objeto antes mencionado y será construido para proporcionar tanto al estudiante como al profesor una manera sencilla de entender los conocimientos impartidos en su materia y realizar un cambio de la parte teórica a la práctica en tiempo real, cargando diferentes opciones de velocidad en los que se encuentre el vehículo, además el estudiante podrá ver los resultados de las pruebas realizadas anteriormente.

La inversión en este proyecto será onerosa pero con beneficios innumerables, principalmente para la Escuela de Ingeniería Automotriz que tendrá un método más efectivo y sencillo para realizar prácticas con los estudiantes, además de poseer un elemento que va acorde con las exigencias tecnológicas de la actualidad y sobre todo un componente primordial en el aspecto social para disminuir en gran cantidad el número de accidentes, también otro punto a favor de nuestro proyecto es que será un elemento pionero para la creación a futuro de un laboratorio de aerodinámica en la ESPOCH.

Finalmente uno de los grandes problemas que existe en nuestra época es la contaminación ambiental por lo cual otro punto importante a favor del túnel de viento es que de una manera amigable al ambiente se puede realizar las pruebas de eficiencia de un vehículo a escala para luego llevarlo a la práctica en un vehículo real para estar acorde con las nuevas leyes que rigen en nuestro país con respecto a la contaminación vehicular.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general.* Diseño y construcción de un túnel de viento para pruebas aerodinámicas

1.3.2 *Objetivos específicos:*

Conocer los principios básicos que rigen el funcionamiento de un túnel de viento

Utilizar programas de diseño para la elaboración del túnel de viento

Construir los distintos componentes que constituyen el túnel aerodinámico

Realizar pruebas de funcionamiento

Elaborar un manual de operación y mantenimiento del túnel de viento para evitar daños futuros.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Flujo

2.1.1 Flujo laminar. Es un flujo en el cual el fluido que se mueve en capa uniforme denominada láminas.

El régimen laminar se caracteriza por un movimiento ordenado de las partículas de fluido, existiendo unas líneas de corriente y trayectorias bien definidas. (MOTT, 1996)

Figura 1. Flujo laminar



Fuente: <http://abcienciade.files.wordpress.com/2009/06/ala-avion.jpg>

El número de Reynolds delimita el flujo turbulento y laminar dependiendo de la geometría del sistema y además la transición de flujo laminar a turbulento es en general sensible a ruido e imperfecciones en el sistema.

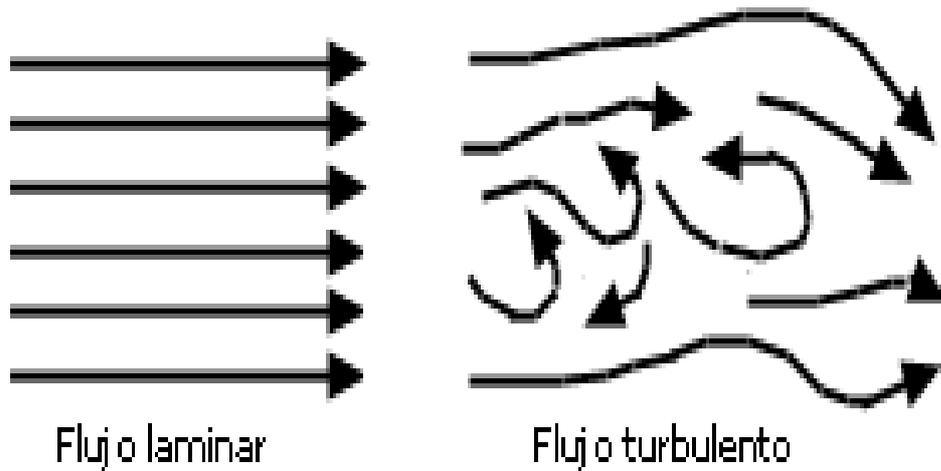
2.1.2 Flujo turbulento. En el régimen turbulento las partículas presentan un movimiento caótico sin que existan unas líneas de corriente ni trayectorias definidas.

En este tipo de flujo las láminas fluyen desorganizadas, tanto en su dirección como en su velocidad.

En el flujo turbulento las partículas se mueven en trayectorias irregulares, que no son suaves ni fijas.

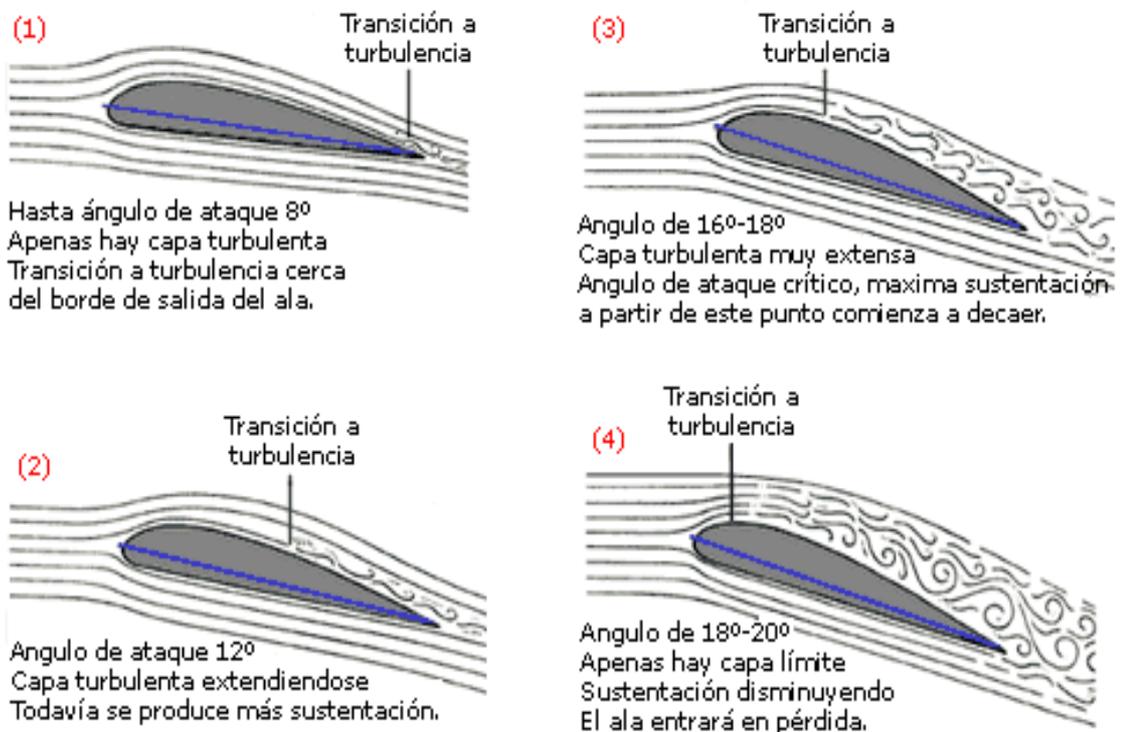
La turbulencia según la definición de Taylor y von Karman, puede producirse por el paso del fluido sobre superficies de frontera, o por el flujo de capas de fluido, a diferentes velocidades que se mueven una encima de la otra. (NEGRETE, 2005)

Figura 2. Comparación entre flujo laminar y turbulento



Fuente: http://www.google.com.ec/imgres?hl=es-419&biw=1366&bih=622&tbn=isch&tbnid=5CV0zIAw3ArN0M:&imgrefurl=http://www.manualvuelo.com/PBV/PBV18.html&docid=u_9bSdtfN6gNQM&imgurl=http://www.manualvuelo.com/GIFS/Fig_181.gif&w=294&h=126&ei=15peUqmjK4ykkQes1IHwDg&zoom=1

Figura 3. Flujo turbulento



Fuente: <http://www.manualvuelo.com/PBV/PBV18.html>

2.2 Capa límite

Al conjunto de capas que van desde la que tiene velocidad cero (la más cercana a la superficie de contacto) hasta la que tiene velocidad libre se le llama capa límite, y a la distancia entre la primera y la última espesor de la capa límite.

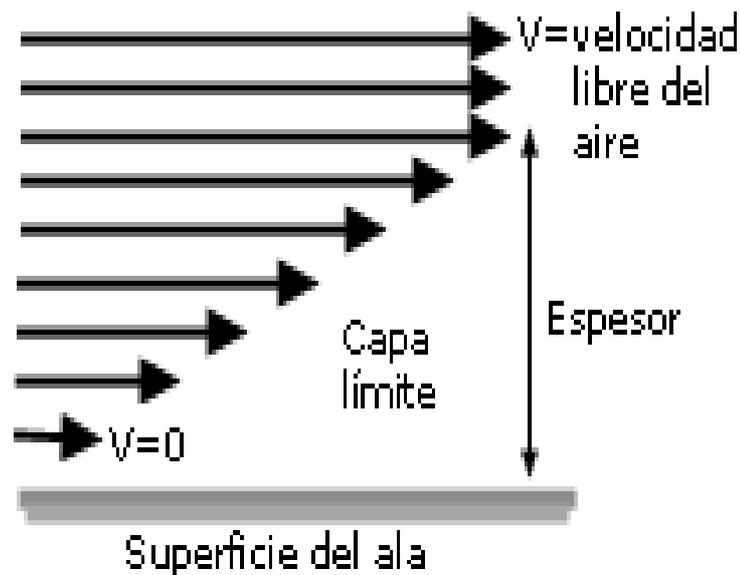
Cuando un fluido fluye sobre una superficie, debido a la fricción, la capa más cercana a la superficie se detiene completamente.

Encima de esta capa se forman otras, cada una de las cuales tiene menos fricción que la anterior y por tanto mayor velocidad. Así hasta que a partir de una capa concreta no hay fricción y las capas tienen la velocidad libre del fluido.

El espesor de la capa límite suele aumentar a medida que el fluido se mueve a lo largo de la superficie. La cantidad de este aumento depende de la viscosidad del fluido, la velocidad del flujo, la suavidad/rugosidad de la superficie, y la forma de ésta.

A la capa límite cuyo flujo es laminar se le suele llamar capa límite laminar que a veces se abrevia como capa laminar, mientras que si el flujo es turbulento la capa recibe el nombre de capa límite turbulenta, abreviada como capa turbulenta.(MORALES, 2004)

Figura 4. Capa límite



Fuente:<http://www.manualvuelo.com/PBV/PBV18.html>

2.3 Teorema de Bernoulli

Daniel Bernoulli comprobó experimentalmente que "la presión interna de un fluido (líquido o gas) decrece en la medida que la velocidad del fluido se incrementa", o dicho de otra forma "en un fluido en movimiento, la suma de la presión y la velocidad en un punto cualquiera permanece constante", es decir que:

$$p + v = k \quad (1)$$

Para que se mantenga esta constante **k**, si una partícula aumenta su velocidad **v** será a costa de disminuir su presión **p**, y a la inversa.

El teorema de Bernoulli se suele expresar en la forma $p + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{constante}$, denominándose al factor **p** presión estática y al factor $\frac{1}{2}\rho v^2$ presión dinámica(MENDOZA, 2008).

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 = k; \frac{1}{2}\rho v^2 = P_d \quad (2)$$

Dónde:

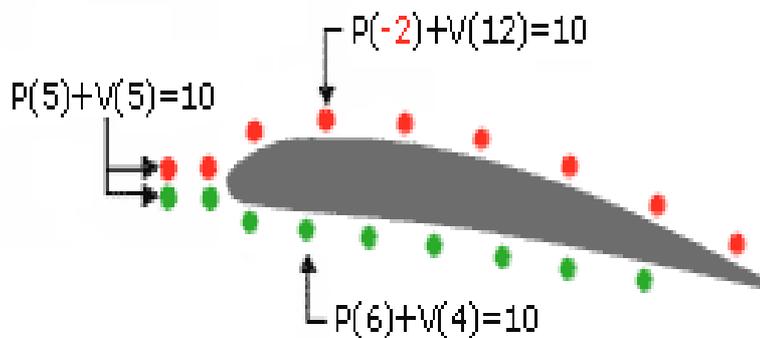
P: presión en un punto dado.

ρ: Densidad del fluido.

V: Velocidad en dicho punto.

P_d: Presión dinámica.

Figura 5. Teorema de Bernoulli



Fuente: <http://www.manualvuelo.com/PBV/PBV12.html>

2.4 Número de Reynolds

Reynolds estudió las características de flujo de los fluidos inyectando un trazador dentro de un líquido que fluía por una tubería. A velocidades bajas del líquido, el trazador se mueve linealmente en la dirección axial. Sin embargo a mayores velocidades, las líneas del flujo del fluido se desorganizan y el trazador se dispersa rápidamente después de su inyección en el líquido. El flujo lineal se denomina Laminar y el flujo errático obtenido a mayores velocidades del líquido se denomina “turbulento”

Las características que condicionan el flujo laminar dependen de las propiedades del líquido y de las dimensiones del flujo. Conforme aumenta el flujo másico aumenta las fuerzas del momento o inercia, las cuales son contrarrestadas por la fricción o fuerzas viscosas dentro del líquido que fluye.

Cuando estas fuerzas opuestas alcanzan un cierto equilibrio se producen cambios en las características del flujo.

En base a los experimentos realizados por Reynolds en 1874 se concluyó que las fuerzas del momento son función de la densidad, del diámetro de la tubería y de la velocidad media. Además, la fricción o fuerza viscosa depende de la viscosidad del líquido. Según dicho análisis, el número de Reynolds se definió como la relación existente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas (o de rozamiento).

$$N_{Re} = \frac{\text{Fuerzas-- Inerciales}}{\text{Fuerzas-- viscosas}}$$

— (3)

Dónde:

N: Número de Reynolds

ρ : Densidad

V: Velocidad en la zona de pruebas

D: Diámetro hidráulico de la zona de pruebas

μ : Viscosidad dinámica

Este número es adimensional y puede utilizarse para definir las características del flujo dentro de una tubería.

El número de Reynolds proporciona una indicación de la pérdida de energía causada por efectos viscosos. Observando la ecuación anterior, cuando las fuerzas viscosas tienen un efecto dominante en la pérdida de energía, el número de Reynolds es pequeño y el flujo se encuentra en el régimen laminar. Si el número de Reynolds es 2100 o menor el flujo será laminar. Un número de Reynolds mayor de 10 000 indican que las fuerzas viscosas influyen poco en la pérdida de energía y el flujo es turbulento.(GARCÍA, 2006)

2.5 Principios y leyes de la aerodinámica de los vehículos

La importancia de la aerodinámica ha sido reconocida a través de gran parte de la historia de las competencias de autos de carrera. Desde los comienzos de la carrera Indianápolis 500, los carros ya eran construidos con los cuerpos aerodinámicos. Sin embargo, la tecnología del motor, la suspensión, y los neumáticos era más importante en aquella época. La aerodinámica del automóvil no fue estudiada detenidamente sino hasta principios de la década de 1960. La reducción de la resistencia del aire sigue siendo importante, pero un nuevo concepto ha tomado prioridad: la producción de una fuerza aerodinámica dirigida hacia abajo (sustentación negativa), que es considerada más importante que la reducción de la resistencia.

Para contrarrestar el problema de la sustentación, los autos de carreras modernos están diseñados para producir sustentación negativa. Esto significa que al auto se le agregan algunos dispositivos que causan que el auto presione contra el suelo y se mantenga más cerca de él. Estos dispositivos neutralizan la sustentación producida por el vehículo o crean de hecho sustentación negativa.

Se denomina aerodinámica a la ciencia del manejo de las corrientes de viento, aplicada a los autos de carreras para añadir adherencia o agarre a los mismos, con el objeto de lograr mayor velocidad y seguridad al piloto. Hay varios métodos que se utilizan para reducir la sustentación o para crear fuerza hacia abajo. Estos métodos incluyen interceptores aerodinámicos (spoilers) y efectos de tierra. El tipo de dispositivo utilizado depende de la clase de competencia y de las restricciones que hayan sido impuestas.

Los alerones delanteros y posteriores aumentan el apoyo aerodinámico y, por lo tanto, la velocidad en las curvas. Los mismos se ajustan a las características de cada circuito. En los circuitos rápidos, con largas rectas y pocas curvas, las alas son casi horizontales para reducir el apoyo aerodinámico y la resistencia al avance en las rectas. En circuitos lentos, con pocas rectas y muchas curvas, las alas tienen mucha más inclinación, pues se sacrifica la velocidad máxima en función del agarre en las curvas, debido al aumento del apoyo aerodinámico (ver Figura 6).

La fuerza hacia abajo tiene que estar bien distribuida entre la parte delantera y la parte posterior del coche.

Figura 6. Flujo del viento



Fuente:<http://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/ncruesp/2012/11/26/ejemplo-tunel-de-viento/>

Si el carro tuviera una carga más grande en la parte de enfrente que en la parte de atrás, no será estable. Cuando la parte posterior tiene una carga más grande, el coche se estabiliza. El balance no deja de ser importante, porque si el auto es demasiado estable, resulta difícil dar vuelta.

Las llantas también crean resistencia aerodinámica en los coches que tienen las ruedas descubiertas. Esto se debe a la separación del flujo de aire detrás de los neumáticos.

Debido a la fuerza aerodinámica que se genera hacia abajo, la velocidad que alcanzan los autos de carreras ha seguido elevándose. Constantemente se realizan cambios en las reglas que rigen el uso de dispositivos en el vehículo, así como en los esfuerzos que realizan los diseñadores para desarrollar nuevos dispositivos que aumenten la velocidad.

La aerodinámica tiene su mayor impacto en los carros y camiones modernos a través de su contribución a las cargas sobre el carro.

Las fuerzas aerodinámicas interactúan con el vehículo causando arrastre, sustentación, fuerzas laterales, momentos y ruidos. Todo ello trae como consecuencia alteraciones en el consumo de combustible, el manejo y la estética de un vehículo. (Caranddriverthef1, 1999)

A finales del siglo 19 y principios del siglo 20 la preocupación de los fabricantes de automóviles estaba centrada en el desarrollo y optimización de los componentes mecánicos de un automóvil.

Por supuesto la estética jugaba un papel fundamental, pero básicamente los coches consistían en un bastidor precario sobre el cual se montaba el motor, la transmisión y las tres o cuatro ruedas con su respectivo sistema de dirección.

En la década de 1930 los fabricantes de automóviles en los Estados Unidos de América y en otros países se preocuparon por reducir el arrastre en la producción de modelos de automóviles y en esta forma introdujeron la configuración aerodinámica. La mayor parte de este trabajo era intuitivo por parte del diseñador, solamente desde 1945 los ensayos en túneles de viento se utilizaron en forma extensa para el diseño de automóviles, llegando a formas convencionales.

Los dos primeros automóviles producidos masivamente y con forma aerodinámica fueron estadounidenses, el Chrysler Airflow (1934) con $C_d = 0.50$ y el Lincoln Zephyr (1936) con $C_d = 0.45$. Estos coeficientes de arrastre fueron considerablemente menores que los de otros automóviles pero tuvieron un éxito comercial limitado. (ALFARO, 2010)

El flujo sobre el cuerpo de un vehículo está gobernado por la relación entre velocidad y presión expresada en la ecuación de Bernoulli:

$$P \text{ estática} + P \text{ dinámica} = P \text{ total} \quad (4)$$

Antes de aproximarse al vehículo la presión estática es simplemente la ambiental. La presión dinámica es producida por la velocidad relativa, que es constante para todas las líneas de corriente aproximándose al vehículo. Por lo tanto la presión total es la misma

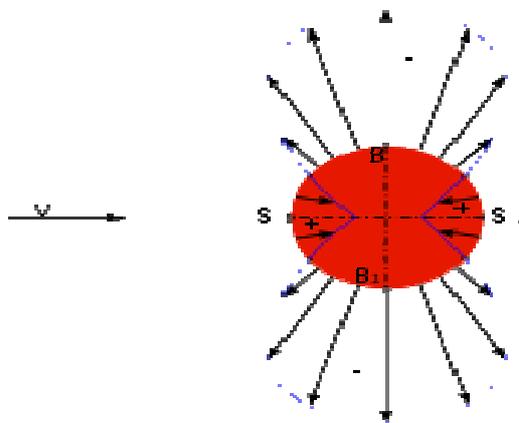
para todas las líneas de corriente. Al aproximarse el fluido al vehículo, las líneas de corriente se "parten", algunas van a la parte de arriba y otras a la parte de abajo del vehículo.

Por interferencia, una línea de corriente debe ir derecho al cuerpo y estancarse (generalmente en el parachoques del vehículo), con lo cual la velocidad relativa se va a cero y la presión dinámica observada en ese punto debe ser cero.

La situación de las líneas de corriente al aproximarse al capó, es similar a lo que sucede con un fluido que pasa a través de un cilindro (ver Figura 7).

La capa límite en el frontal de un vehículo empieza en el punto de estancamiento. En ésta parte de la dirección del flujo se produce el llamado "Gradiente de Presión Favorable", es decir, debido a que la presión va disminuyendo desde éste punto, el gradiente de presión empuja el aire a lo largo de la capa límite impidiendo su crecimiento.

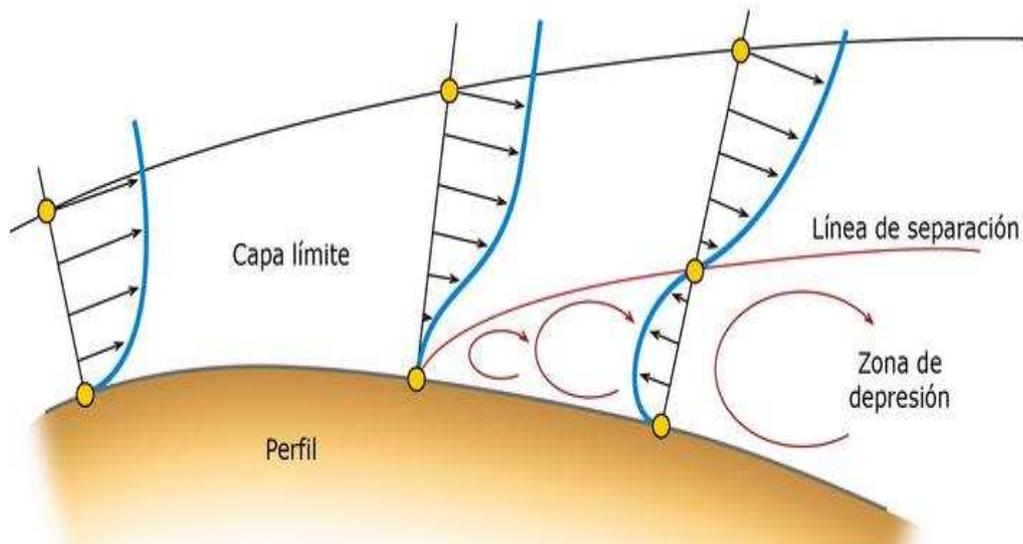
Figura 7. Gradientes de velocidad



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Presi%C3%B3n>

Desafortunadamente, cuando el fluido se voltea nuevamente, la presión se incrementa nuevamente, desacelerando el flujo de la capa límite y haciéndola crecer "Gradiente de Presión Adverso". Existe un "Punto de Separación" Dónde el flujo cerca de la superficie es reversado debido a la presión (ver Figura 8). (POTTER, 2002)

Figura 8. Separación del flujo en un gradiente de presión adverso



Fuente:<http://forum.lawebdefisica.com/threads/24058-Teor%C3%ADa-relaci%C3%B3n-entre-la-conservaci%C3%B3n-del-momento-angular-y-el-empuje-en-una-estructura-alar>

En este punto el flujo principal ya no está adherido al cuerpo y ahora es capaz de romperse e irse en línea casi recta. Debido a que trata de ingresar aire desde la región detrás del cuerpo, la presión en esta parte cae a menos de la ambiente. Se forman vórtices y el fluido es muy irregular en esta región.

La presión en la región de separación es menor que la de la parte frontal del vehículo, la diferencia de estas fuerzas totales de presión es la responsable del "Arrastre de Forma".

La fuerza de arrastre resultado de la acción de la fricción viscosa en la capa límite de la superficie del vehículo es la llamada "Arrastre de Fricción".

En la figura 9 se ve la distribución de la presión estática para un sedán estándar. Una presión negativa se desarrolla en la punta frontal del capó cuando el flujo que sube de la parte frontal intenta seguir la forma horizontal del capó. El gradiente de presión adverso en este punto tiene el potencial de atascar el flujo de capa límite creando arrastre en esta área.

Figura 9. Distribución de presiones



Fuente:https://www5.uva.es/guia_docente/uploads/2012/389/51453/1/Documento5.pdf

Cerca de la base del parabrisas el flujo debe ser doblado hacia arriba por lo cual se experimenta una alta presión. Esta región de alta presión es el sitio ideal para colocar entradas de aire. La baja velocidad de esta región hace adecuada la colocación de limpiaparabrisas.

La presión se hace nuevamente negativa sobre el techo cuando el flujo intenta seguir el contorno de éste. La presión sobre el vidrio posterior y sobre el baúl continúa baja debido a la curvatura continua. Es en ésta región dónde sucede con más frecuencia la separación. El diseño de los ángulos y los detalles del contorno del vehículo requieren una especial atención desde el punto de vista aerodinámico.

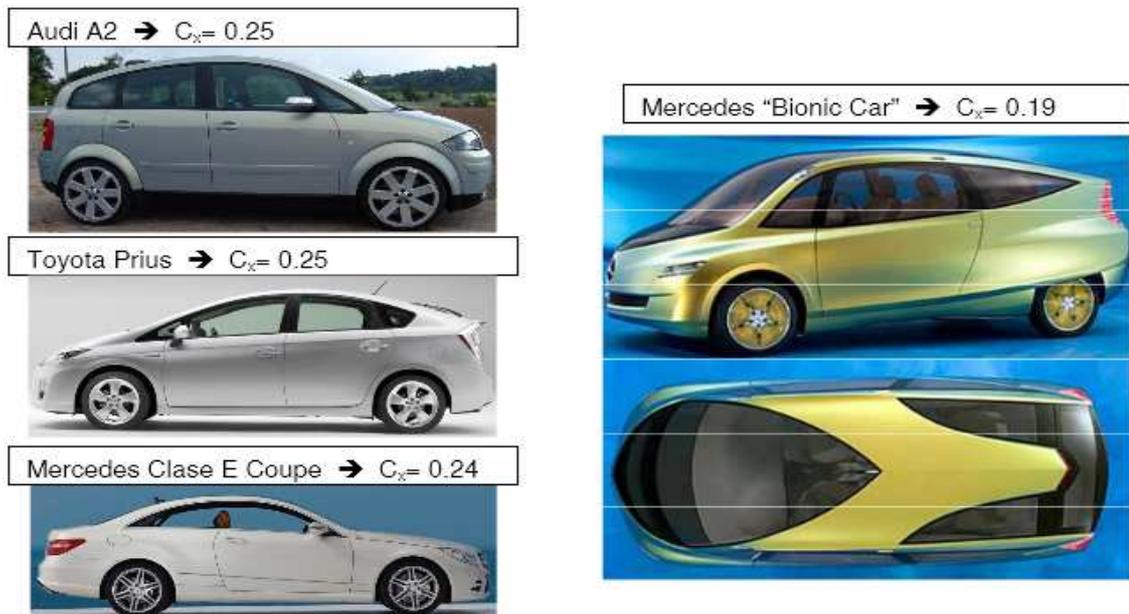
Debido a la baja presión en el techo, el flujo sobre los lados del vehículo intentará alimentar de aire esta región y dará pie a una potencial separación. Este flujo, combinado con el del techo, formará vórtices que se desprenden desde atrás del vehículo.

El escogimiento de los ángulos del vidrio posterior y de la longitud del baúl tendrá un impacto directo sobre el control del punto de separación y las fuerzas aerodinámicas.

A menor área del punto de separación, menor el arrastre. Teóricamente, la forma aerodinámica ideal es una parte trasera en forma de gota con una forma cónica afilada en un ángulo de 15° o menor.

Desde 1930 ya se reconocía que, debido a que el área hacia la punta del cono es muy pequeña, la punta de un vehículo ideal puede ser cortada sin una penalización muy grande del área de separación, permitiendo de esta forma más espacio para las plazas traseras (ver Figura 10).

Figura 10. Sustentación y arrastre



Fuente: https://www5.uva.es/guia_docente/uploads/2012/389/51453/1/Documento5.pdf

El arrastre es la mayor y más importante fuerza aerodinámica encontrada en autos de pasajeros a velocidades normales de autopista. El arrastre total en los vehículos se deriva de varias fuentes. Existe un gran potencial de reducción de arrastre en esas áreas. Para un vehículo normal, aproximadamente un 65% del arrastre proviene de la carrocería.

$$F_D = C_D \left(\frac{\rho V^2}{2} \right) A \quad (5)$$

Dónde:

F_D : Coeficiente de arrastre

C_D : Fuerza de arrastre (N)

ρ : Densidad (Kg/m^3)

V : Velocidad del aire (m/s)

A : Área de la superficie alar (m^2)

La Sustentación es una fuerza ocasionada por el fluido en dirección perpendicular a la dirección del movimiento del cuerpo.

Su aplicación más impórtate está en el diseño y análisis de las alas de aeronaves llamadas aeroplanos. La geometría de un aeroplano es tal que se produce una fuerza de sustentación cuando el aire pasa sobre y debajo de él.(F1 ruedas sobre el asfalto, 2012)

$$F_L = C_L \left(\frac{\rho V^2}{2} \right) A \quad (6)$$

Dónde:

F_L: Coeficiente de sustentación

C_L: Fuerza de sustentación (N)

ρ: Densidad (Kg/m³)

V: Velocidad del aire (m/s)

A: Área de la superficie alar (m²)

Parte posterior: La mayor contribución de arrastre proviene de la parte posterior debido a la zona de separación. Aquí es dónde existe el mayor potencial de reducción.

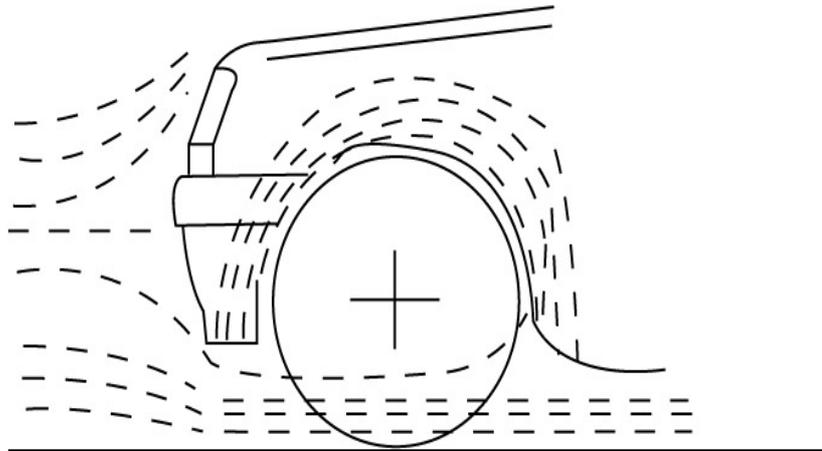
Parte delantera: El arrastre delantero es influenciado por el diseño del frontal y del ángulo del parabrisas. La localización de la altura de la punta frontal del vehículo establece el punto de estancamiento y la separación del flujo hacia arriba y abajo del auto. El menor arrastre se obtiene con una altura baja de este punto y con una forma bien redondeada.

Parabrisas: Ángulos bajos reducen el arrastre pero complican el diseño del vehículo pues inducen un mayor calentamiento del interior e incrementan la distorsión óptica.

Parte inferior: Las suspensiones y otros elementos protuberantes en la parte inferior de la carrocería son responsables de arrastre.

Protuberancias: Una segunda área de reducción de arrastre son las protuberancias de la carrocería. Por ejemplo, las ruedas producen un flujo turbulento en las cavidades, aumentando el arrastre (verFigura 11).

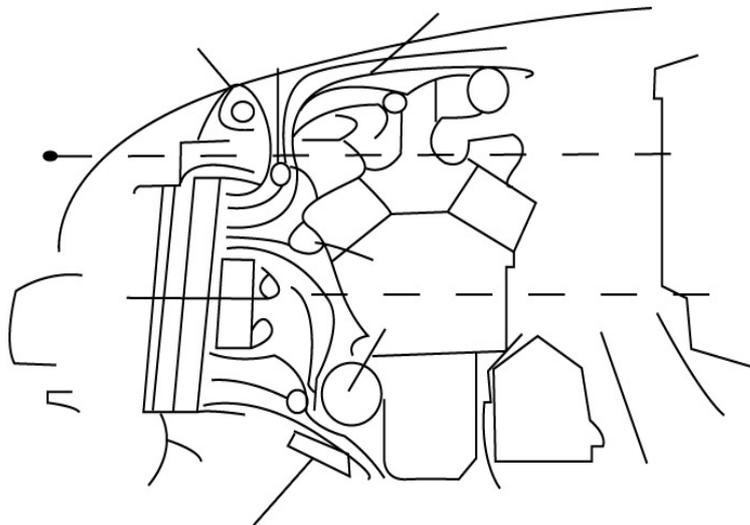
Figura 11. Recirculación de aire en las ruedas



Fuente: Autores

Flujo interno: El sistema de refrigeración, con el aire pasando a través del radiador, impactando el motor y frente de la cabina produce presión dinámica que actúa como arrastre en esa zona (ver Figura 12). Un diseño cuidadoso puede dirigir el flujo de tal forma que mantenga su velocidad.

Figura 12. Patrón del flujo de aire en un compartimento de motor

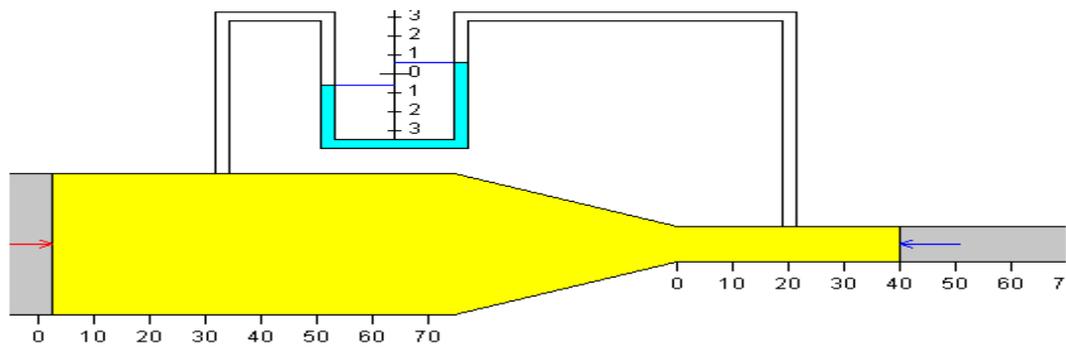


Fuente: Autores

2.6 Efecto Venturi

Este efecto demuestra que al pasar por un estrechamiento, las partículas de un fluido aumentan su velocidad.

Figura 13. Efecto Venturi



Fuente:<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/fluidos/dinamica/bernoulli/bernouilli.htm>

$$V_1 S_1 = V_2 S_2 (7)$$

Dónde:

V_1 : Velocidad del fluido en el punto 1

V_2 : Velocidad del fluido en el punto 2

S_1 : Sección área 1

S_2 : Sección área 2

Cuando el desnivel es cero, la tubería es horizontal. Tenemos entonces, el denominado tubo de Venturi, cuya aplicación práctica es la medida de la velocidad del fluido en una tubería. El manómetro mide la diferencia de presión entre las dos ramas de la tubería. (KRAUSHAAR, 1972)

2.7 Túnel de viento

Después de que el hombre se da cuenta de que para volar necesita más que imitaciones rudimentarias del aleteo de las aves y comprende que debe aumentar su conocimiento en lo que hoy en día llamamos aerodinámica, crea aparatos e instrumentos que le permitan medir las fuerzas que experimentan los instrumentos dentro de fluidos en movimiento.

Por ello se diseñaron brazos mecánicos que se desplazaban sobre rieles sosteniendo distintos prototipos; el problema de este sistema era que el modelo se movía a través de un flujo turbulento, desordenado por el movimiento del brazo.

Para obviar este obstáculo, se decidió dejar el modelo quieto y hacer que circule el aire alrededor de él; y si a esta idea la colocamos dentro de un ducto obtenemos lo que conocemos como “túnel de viento”(verFigura 14).(MARÍN, 2013)

2.7.1Principios de funcionamiento.El aire entra en la sección de prueba através deuna contracción cuidadosamente diseñada, seguida de un enderezador de flujo tipo panel (Honeycombs) diseñado para asegurar que el flujo sea constante tanto en magnitud como en dirección.

Figura 14. Túnel de viento



Fuente: <http://actualidad.hiper-blog.com/?p=76>

En la sección de prueba circula el aire sobre el modelo a estudiar y en esta sección se encuentra un generador de humo mediante el cual se hace más fácil la visualización del flujo sobre el modelo de pruebas. Un ventilador axial está ubicado en la salida de la sección difusora. El ventilador es impulsado por un motor.

2.7.2Tipos de túnel de viento.Dentro de las variaciones en los túneles de viento, la principal diferencia es la posibilidad de la recirculación de aire. Pueden ser de circuito abierto, Dónde el aire que entra vuelve a salir, o de circuito cerrado, dónde el aire realiza siempre el mismo recorrido.

En este caso, el túnel a estudiar es el de circuito abierto ya que tiene la ventaja de ser relativamente más barato en su construcción, por otro lado el tamaño de este túnel es

menor que el de circuito cerrado por lo que facilita su construcción así como su transporte (verFigura 15).

2.7.3Partes del túnel de viento.El túnel de viento consta de cinco partesprincipales que son:

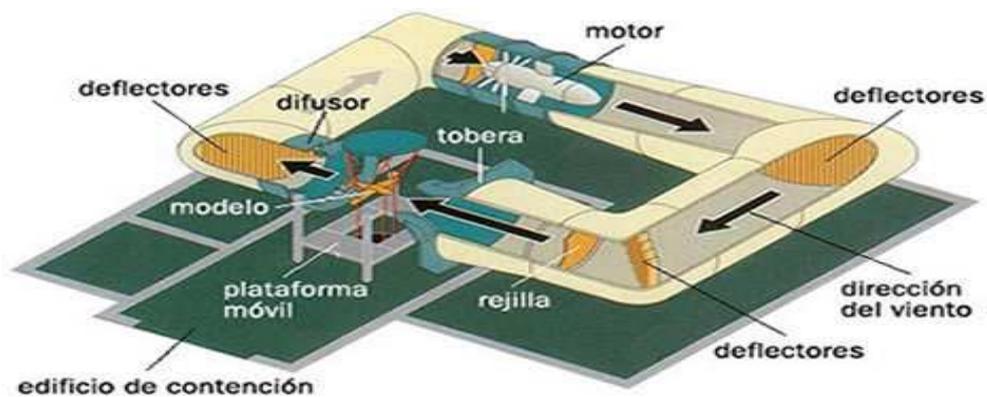
1. Sección de pruebas
2. Difusor cónico
3. Cono de contracción
4. Honeycombs
5. Zona impulsora

Figura 15.Túnel de viento de circuito abierto



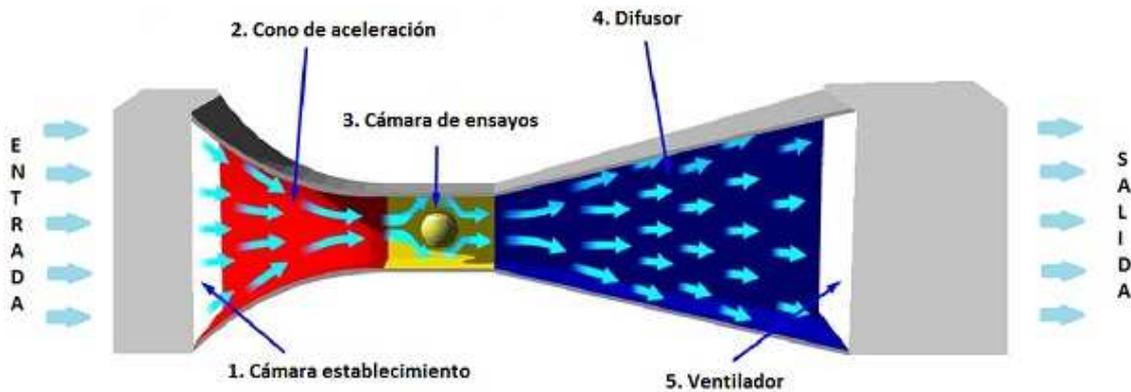
Fuente:<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/es/flujodegases/tuneldeviento/tuneldeviento.html>

Figura 16.Túnel de viento de circuito cerrado



Fuente:<http://www.inta.es/descubreAprende/htm/hechos5.htm>

Figura 17. Partes túnel de viento



Fuente: <http://www.flaldia.com/10650/tuneles-de-viento-i/>

2.8 Teoría de los modelos

Las variables que pueden intervenir en un problema cualquiera de mecánica de fluidos se pueden reducir a ocho: la fuerza F , la longitud L , la velocidad t , la densidad p , la viscosidad dinámica n , la aceleración de la gravedad g , la velocidad del sonido c y la tensión superficial o . Para ello se podría proceder así:

- a) Construir un prototipo del mismo tamaño
- b) Considerar una de las variables, por ejemplo el rendimiento como variable dependiente, función de las restantes variables que intervienen en el fenómeno.

En cuanto a la condición a): sería antieconómico y muchas veces irrealizable construir un prototipo a escala 1/1, realizar las modificaciones requeridas por la experimentación, etc.; a causa de los gastos de energía, personal, instalaciones, etc.

En cuanto a la condición b): El coste de la obtención de un solo punto experimental puede muchas veces ser muy elevado. Si las variables independientes son más de 3, el problema se complica en progresión geométrica.

Por lo anterior, a) se sustituye por la siguiente:

- 1.No se ensaya un prototipo a escala 1/1, sino un modelo reducido a escala 1/10 o 1/100.
- 2.Se reduce el número de variables. Se puede reducir el número de variables en la mayor parte de los casos a una variable dependiente y a otra independiente.

La nueva condición a) plantea el siguiente problema: ¿Cómo predecir el comportamiento del prototipo a partir de los resultados obtenidos experimentalmente en un modelo a escala?

Variables o números adimensionales:

$$\text{El número de Euler:} \quad Eu = \frac{V}{\sqrt{2A\rho/p}} \quad (8)$$

$$\text{Variante del número de Reynolds:} \quad Re = \frac{V.L\rho}{n} \quad (9)$$

$$\text{El número de Froude:} \quad Fr = \frac{V}{\sqrt{Lg}} \quad (10)$$

$$\text{El número de Mach:} \quad Ma = \frac{V}{c} \quad (11)$$

$$\text{El número de Weber:} \quad We = \frac{V}{\sqrt{\sigma/\rho L}} \quad (12)$$

De esta manera, en el caso general el estudio de un fenómeno consistiría en la investigación experimental de la función.

$$Eu = f (Fr, Re, Ma, We)$$

Antes de abordar experimentalmente un problema mediante ensayos con un modelo reducido, se hace un estudio previo para determinar de las cinco fuerzas debidas al gradiente de presiones, a la gravedad, a la viscosidad, a la elasticidad y a la sección superficial, cuál es aquella de la que fundamentalmente depende el problema concreto:

- a) Para el caso de los túneles de viento para probar automóviles, la fuerza debida al gradiente de presiones interviene solo la viscosidad, por lo que:

$$Eu = f (Re)$$

Y se harán los ensayos de manera que los números de Reynolds, Re, sean iguales en el modelo y en el prototipo.(TARIFA, 2013)

2.8.1 Semejanza de modelos. En la sección de pruebas de un túnel de viento, se somete un modelo a escala, ejemplo; un perfil alar, avión, auto completo que quiere estudiar, a una corriente de aire producida por un ventilador o un compresor, estando el vehículo fijo y el aire en movimiento; pero el movimiento relativo es el mismo que en la realidad.

Las fuerzas de empuje ascensional y arrastre o más exactamente las tres fuerzas y tres momentos según los tres ejes que actúan sobre el modelo con balanzas especiales.

2.8.2 Teoría de modelos. El problema formulado anteriormente se resuelve de la siguiente manera:

a. El modelo ha de ser geoméricamente semejante al prototipo

Es evidente que si no se cumple esta condición la comparación de resultados entre el modelo y el prototipo es imposible.

Por tanto las longitudes L, superficies A, y volúmenes t homólogos del prototipo y del modelo han de verificar las siguientes relaciones:

$$\frac{L_p}{L_m} = n \quad ; \quad \frac{A_p}{A_m} = n^2 \quad ; \quad \frac{t_p}{t_m} = n^3$$

Dónde n – escala del prototipo con relación al modelo.

b. El modelo ha de ser dinámicamente semejante al prototipo

Para que los fenómenos en el prototipo sean comparables, los flujos, o sea las líneas de corriente, han de ser semejantes. Para ello es necesario que las velocidades, aceleraciones, fuerzas, etc., se hallen también en relaciones bien determinadas, para el caso de los túneles de viento para probar vehículos, estas relaciones se deducen de la igualdad de la fórmula de Reynolds.

Figura 18. Modelos de pruebas



Fuente: Autores

2.8.3 *Semejanza dinámica con predominio de la viscosidad.* En los ensayos aerodinámicos realizados en los túneles de viento y en otra multitud de problemas la fuerza predominante, además de la debida al gradiente de presiones, es la fuerza debida a la viscosidad.

Para que en este caso los ensayos del modelo y del prototipo sean dinámicamente semejantes es menester que el número de Reynolds sea idéntico en ambos.

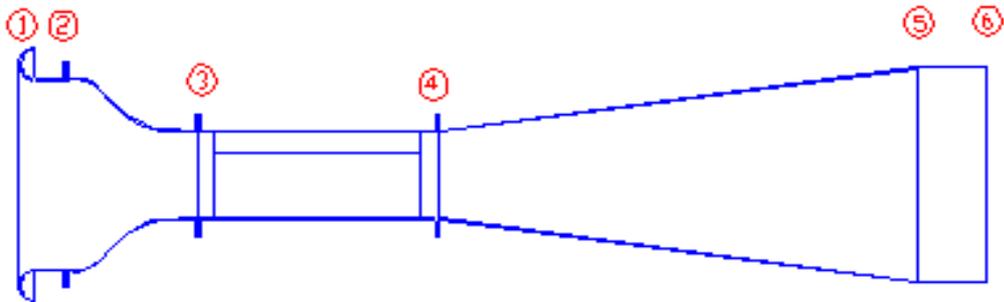
Cuanto mayor es el número de Reynolds menos importancia tiene la fuerza de viscosidad en el fenómeno y viceversa. No es la viscosidad dinámica n el parámetro decisivo. (DULHOSTE, 2013)

CAPÍTULO III

3. DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DEL TÚNEL DE VIENTO

3.1 Parámetros de diseño

Figura 19. Túnel



Fuente: Autores

Sabiendo que el túnel de viento se utiliza la Ingeniería Automotriz como instrumento para el estudio de la aerodinámica de los vehículos. Los parámetros fundamentales que se utiliza para el diseño del túnel de viento son los siguientes:

- **Velocidad en la zona de pruebas:** $v = 15 \text{ m/s}$
- **Temperatura ambiente:** $T = 14 \text{ °C}$ $287,15 \text{ °K}$
- **Altitud:** 2754 (msnm)
- **Presión atmosférica:** $P_{\text{atm.}} = 556 \text{ mm Hg}$ $74109,24 \text{ Pa (N/ m}^2\text{)}$
- **R:** Constante universal de los gases. En nuestro caso R es la constante del aire que es igual a $287 \text{ Nm/Kg}^\circ\text{K}$

De acuerdo a los parámetros establecidos y los fundamentos teóricos, se procesa a realizar los cálculos correspondientes para la construcción del túnel de viento.

3.2 Cálculo del caudal (Q)

Para el cálculo del caudal que debe entregar el ventilador debemos primero calcular la densidad del aire y seguido el flujo másico.

Densidad:
$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (13)$$

Dónde:

ρ : Densidad del aire.

P: Presión atmosférica Riobamba.

R: Constante universal de gases.

T: Temperatura ambiente.

Remplazamos datos en la fórmula de la densidad:

$$\rho = \frac{(74109.29) \text{ N/m}^2}{(287) \text{ Nm/Kg}^\circ\text{K} (287.15)^\circ\text{K}}$$
$$\rho = 0,8992 \text{ Kg/m}^3$$

3.3 Cálculo del flujo másico

$$\dot{m} = \rho \cdot \bar{V} \cdot S \quad (14)$$

Dónde:

\dot{m} : Flujo másico

ρ : Densidad del aire

\bar{V} : Velocidad del área de pruebas

S: Sección de la zona de pruebas

Reemplazamos datos en la fórmula establecida sabiendo que la sección de la zona de pruebas es 0.0775 m^2 y la velocidad de 15 m/s

$$\dot{m} = 0.8992 \text{ Kg/m}^3 * 15 \text{ m/s} * 0.0775 \text{ m}^2$$
$$\dot{m} = 1.05 \text{ Kg/s}$$

Finalmente calculamos el caudal que debe entregar el ventilador

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (15)$$

Q: Caudal

\dot{m} : Flujo másico

ρ : Densidad del aire

Reemplazamos los valores calculados del flujo másico y la densidad.

$$Q = \frac{1.05 \text{ Kg/s}}{0.8993 \text{ Kg/m}^3}$$

$$Q = 1.16 \text{ m}^3/\text{s}$$

3.4 Diseño y dimensionamiento de las principales secciones del túnel

3.4.1 Zona de pruebas

3.4.1.1 Consideraciones para el diseño. La sección puede tener muchas formas; circular, elíptica, rectangular, cuadrada. Como las pérdidas debidas a su forma son mínimas, la elección de su geometría obedece principalmente a la utilidad marginal que represente. El techo y piso plano hacen muy fácil la instalación de modelos. Balanzas aerodinámicas y su calibración.

En especial una sección que tenga un alto igual a dos tercios de su ancho, es aún más ventajosa pues requiere de menos correcciones.

Se recomienda que las paredes tengan un ángulo de divergencia alrededor de medio grado.

La longitud usual de una sección de pruebas, varía entre una y dos veces la dimensión mayor de la sección.

La zona de pruebas corresponde a la sección 3-4.

Área (A): Para efecto de facilidad de cálculo se ha establecido que $A3 = A4$ tomando en cuenta que la diferencia entre estas dos zonas es despreciable

Este dato se ha obtenido mediante el programa Solidwork, que es de 775 cm^2

Perímetro(P): Se obtiene empleando la fórmula siguiente:

$$P = r * \alpha * \pi \text{rad} \quad (16)$$

Dónde:

r: Radio

α : Ángulo expresado en grados

Remplazamos datos en la fórmula para hallar P_a , P_b y P_c .

$$P_a = 18.75 \text{ cm} * 95 * \frac{\pi \text{rad.}}{180}$$

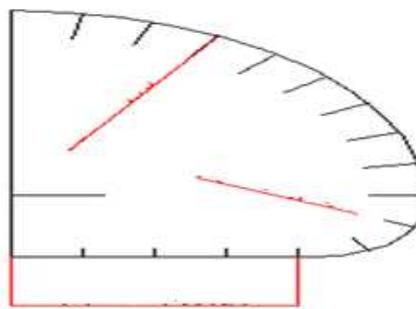
$$P_a = 31.09 \text{ cm}$$

$$P_b = 5 \text{ cm} * 85 * \frac{\pi \text{rad.}}{180}$$

$$P_b = 7.42 \text{ cm}$$

$$P_c = 13.69 \text{ cm}$$

Figura 20. Cálculo de los perímetros de la zona de pruebas



Fuente: Autores

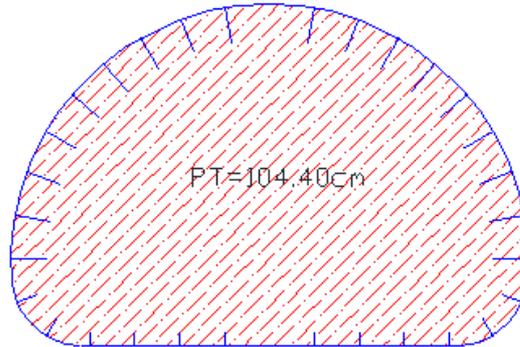
Una vez encontrado los valores de P_a , P_b y P_c y hallamos el perímetro total (PT)

$$PT = 2(P_a + P_b + P_c)$$

$$PT = 2(31.09 + 7.42 + 13.69)$$

$$PT = 104.40 \text{ cm} \approx 1.044 \text{ m}$$

Figura 21. Cálculo del perímetro total de la zona de pruebas



Fuente: Autores

Diámetro hidráulico(Dh): Se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$Dh = 4 * A/p \tag{17}$$

Dónde:

A: Área de la sección 3 de la zona de pruebas

P: Perímetro de la zona de pruebas

$$Dh3 = 4 * 0.0775 \text{ m}^2 / 1.044 \text{ m}$$

$$Dh3 = 0.2996 \text{ m}$$

Sabiendo que el área 3 y 4 de la sección de pruebas son iguales, por lo tanto se deduce que:

$$Dh3 = Dh4$$

Velocidad(V): Para la sección de pruebas, se asume que la velocidad ideal para este punto es de 15 m/s. a partir de este valor procedemos a realizar otros cálculos

Número de Reynolds(R): Para obtener el valor del número de Reynolds en la zona de pruebas partimos de la siguiente fórmula.

$$N_{Re\ 3-4} = \frac{\rho * V_3 D_{h3}}{\mu}$$

Dónde:

Nre: Número de Reynolds

ρ : Densidad

V_3 : Velocidad en la zona de pruebas

D_{h3} : Diámetro Hidráulico de la zona de pruebas

μ : Viscosidad dinámica $1.83E^{-5} \text{ Kg/m * s}$. (ver Anexo A)

Reemplazamos los datos en la fórmula

$$N_{Re3-4} = \frac{\rho * V_3 D_{h3}}{\mu}$$

$$N_{Re3-4} = \frac{0.8992 * 15 * 0.2996}{1.83E^{-5}}$$

$$N_{Re3-4} = 220819.93$$

De acuerdo al resultado obtenido del número de Reynolds el flujo es turbulento.

Pérdidas de carga primaria (H_{1p}): Para encontrar las pérdidas de carga primaria, utilizamos la ecuación de Darcy - Weisbach.

$$H_p = \frac{\lambda L V^2}{D_H 2g} \quad (18)$$

Dónde:

H_p: Pérdida de carga primaria

λ: Coeficiente de pérdida de carga primaria

L: Longitud de tubería = 0.75 m

D_H: Diámetro hidráulico = 0.297 m

V: Velocidad media del fluido = 15 m / s

g: Gravedad

Para calcular λ de la zona de prueba, utilizamos la ecuación de Jain

$$\lambda = (1,8 \log N_{Re} - 1,5146)^{-2} \quad (19)$$

$$\lambda = (1,8 \log 220819.93 - 1,5146)^{-2}$$

$$\lambda = 0,0152$$

Con el valor calculado reemplazamos en la formula

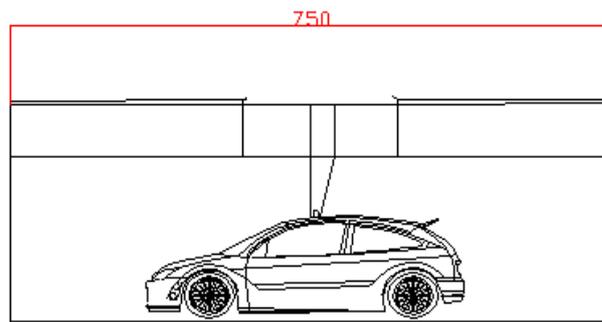
$$H_p = \frac{\lambda L V^2}{D_H 2g}$$
$$H_p = \frac{0,0152 * 0,75 \text{ m} * (15 \text{ m/s})^2}{0,2996 \text{ m} * 2 * 9,8 \text{ m/s}^2}$$

$$H_p = 0,436 \text{ m}$$

3.4.1.2 Selección de materiales. Tomando en cuenta los requerimientos de la zona de pruebas del túnel de viento se ha decidido trabajar con una base de formica color negro para lograr un buen contraste con el humo reforzada con tela ligera de fibra de vidrio, la ventana es de acrílico por su característica de transparencia y moldeabilidad, bridas de sujeción en MDF de 6 mm por ser un material muy fácil de trabajar.

3.4.1.3 Dimensionamiento. La zona de pruebas tiene la siguiente forma:

Figura 22. Dimensionamiento zona de prueba



Fuente: Autores

Esta es la zona en dónde se introducen los diferentes modelos para realizar todas las pruebas.

3.4.2 Zona de Contracción

3.4.2.1 Consideraciones para el diseño. El aire que ingresa a la zona de contracción es comprimido al disminuir la sección hasta hacerse cuatro veces menor. Esta zona cambia su sección de una manera no lineal. Es así como el aire se acelera para llegar a la zona de pruebas.

La zona de contracción, corresponde a la sección 2-3.

Área(A): Este dato se ha obtenido mediante el programa Solidwork. $A_2 = A_1$ que es de 3730 cm^2 .

Perímetro (P): Se obtiene empleando la fórmula siguiente

$$P = r * \alpha * \pi \text{rad}$$

Dónde:

r: Radio

α : Ángulo expresado en grados.

Remplazamos datos en la fórmula para hallar P_d , P_e y P_f

$$P_d = 41,13 \text{ cm} * 95 * \frac{\pi \text{rad.}}{180}$$

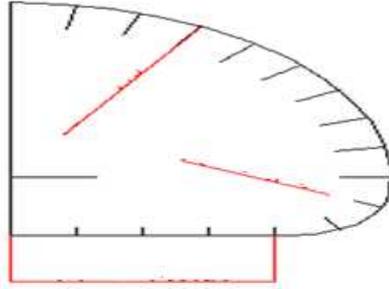
$$P_d = 68.19 \text{ cm}$$

$$Pe = 10.97 \text{ cm} * 85 * \frac{\pi \text{rad.}}{180}$$

$$Pe = 16,27 \text{ cm}$$

$$Pf = 28.65 \text{ cm}$$

Figura 23. Cálculo de los perímetros de la zona de contracción



Fuente: Autores

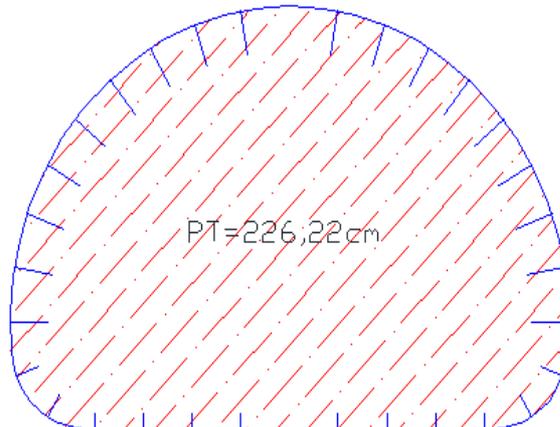
Una vez encontrado los valores de Pd, Pe y Pf y hallamos el perímetro total (PT)

$$PT = 2(Pd + Pe + Pf)$$

$$PT = 2(68.19 + 16.27 + 28.65)$$

$$PT = 226,22 \text{ cm} \approx 2,2622 \text{ m}$$

Figura 24. Cálculo del perímetro total de la zona de contracción



Fuente: Autores

Diámetro hidráulico(Dh): Se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$Dh = 4 * A/p$$

Dónde:

A: = Área

P: Perímetro

$$Dh = 4 * 0.372m^2 / 2.2622m$$

$$Dh = 0.66 \text{ m}$$

Por lo tanto puedes decir que:

$$Dh2 = Dh1$$

Velocidad(V): Para calcular la velocidad en esa zona, utilizamos la siguiente fórmula:

$$V_2 A_2 = V_3 A_3 \quad (20)$$

$$V_2 = \frac{15 \text{ m/s} * 0,775m^2}{0,373m^2}$$

$$V_2 = 31,17 \text{ m/s}$$

Por tanto las velocidades en la sección 1 y 2 van a ser iguales

$$V1=V2$$

Reynolds(R): La manera más lógica de aproximarnos al cálculo de las pérdidas en un túnel de viento se deriva de seccionarlo en partes correspondientes a las diferentes secciones, en este caso vamos a determinar el número de Reynolds en las esquinas de la zona de contracción.

$$N_{Re2} = \frac{\rho * V_2 D_{H2}}{\mu}$$

$$N_{Re2} = \frac{0,8992 * 31,17 * 0,66}{1.83E^{-5}}$$

$$N_{Re2} = 1010848,21$$

$$N_{Re3} = \frac{\rho * V_3 D_{h3}}{\mu}$$

$$N_{Re_3} = \frac{0.8992 * 15 * 0.2996}{1.83E^{-5}}$$

$$N_{Re_3} = 220819,93$$

Después calculamos el coeficiente λ :

$$\lambda_2 = (1,8\log Re - 1,5146)^{-2}$$

$$\lambda_2 = (1,8\log 1010848,21 - 1,5146)^{-2}$$

$$\lambda_2 = 0,0115$$

$$\lambda = (1,8\log Re - 1,5146)^{-2}$$

$$\lambda = (1,8\log 220819,93 - 1,5146)^{-2}$$

$$\lambda_3 = 0,0152$$

Entonces el coeficiente λ en la sección de 2 a 3 es:

$$\lambda_{2-3} = \frac{\lambda_2 + \lambda_3}{2}$$

$$\lambda_{2-3} = \frac{0,0115 + 0,0152}{2}$$

$$\lambda_{2-3} = 0,01335$$

Pérdidas de carga secundaria(H_s): Para encontrar las pérdidas de carga secundaria, utilizamos la ecuación de Darcy - Weisbach.

$$H_s = \frac{\zeta V^2}{2g} \quad (21)$$

Dónde:

H_s : Pérdida de carga secundaria

ζ : Coeficiente adimensional de pérdida de carga secundaria

V : Velocidad

Para calcular ζ , utilizamos una ecuación empírica basada en una caída de presión de 0.15 para un Reynolds de 50.

$$\zeta = \frac{0,32 * \lambda_{2-3} * L_{2-3}}{DH_3} \quad (22)$$

Dónde:

L_{2-3} : Longitud 0.412m

DH_3 : Diámetro hidráulico

$$\zeta = \frac{0,32 * 0,01335 * 0,412}{0,2996}$$

$$\zeta = 0,0059$$

Con valor hallado reemplazamos en la fórmula de pérdidas secundarias.

$$H_s = \frac{\zeta V^2}{2g}$$

$$H_s = \frac{0,0059 * 15^2}{2 * 9.8}$$

$$H_s = 0,068 \text{ m de aire}$$

$$D/d = D_{H2} / D_{H3} = 2.2 \wedge; = 45^\circ \Rightarrow \zeta = 0.2$$

$$H_s = \frac{\zeta V^2}{2g}$$

$$H_s = \frac{0,2 * 15^2}{2 * 9,8}$$

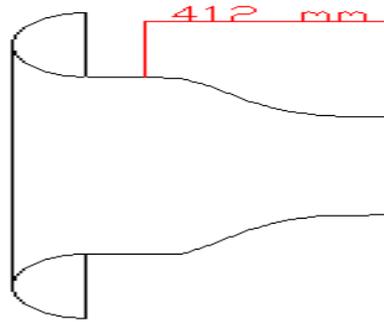
$$H_s = 2,29 \text{ m de aire}$$

3.4.2.2 Selección de materiales. Para esta sección se han utilizado los siguientes materiales:

- Fibra de vidrio, por la facilidad en la manipulación y moldeabilidad.
- MDF, para obtener la forma de la sección.

3.4.2.3 Dimensionamiento. La zona de contracción tiene la siguiente forma:

Figura 25. Dimensionamiento zona de contracción



Fuente:Autores

3.4.3 Difusor cónico

3.4.3.1 Consideraciones para el diseño. El objetivo del difusor cónico, es reducir la velocidad expandiendo el fluido y recuperando la presión estática.

Los difusores son muy susceptibles a errores de diseño, pueden crear separación de la capa límite de manera intermitente o estable, que es difícil de detectar y puede causar vibraciones en el túnel.

El difusor está dividido en dos áreas, una de entrada y una de salida. La relación de aire recomendada debe ser de cinco o seis a uno y el ángulo debe ser de siete grados o menos.

La zona del difusor cónico, corresponde a la sección 4-5.

Área(A): Este dato se ha obtenido mediante el programa Solidwork. $A_3 = A_4$ que es de 775 cm^2 .

Perímetro (P): Se obtiene de la fórmula.

$$P = \pi * d \quad (23)$$

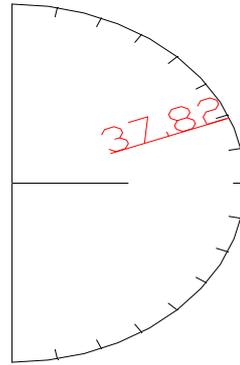
Dónde:

d: Diámetro 0,7564 m

$$P = \pi * 0,7564\text{m}$$

$$P = 2,376\text{m}$$

Figura 26. Cálculo del perímetro del difusor cónico



Fuente:Autores

Diámetro hidráulico(Dh): Se obtiene de la siguiente ecuación:

$$DH_5 = \frac{4 * (\pi * r^2)}{P}$$

$$DH_5 = \frac{4 * (\pi * 0,3782^2)}{2.376}$$

$$DH_5 = 0,756 \text{ m}$$

Por lo tanto se puede decir que el diámetro hidráulico es:

$$DH_4 \neq DH_5$$

Velocidad(V): Para calcular la velocidad 5, utilizamos la siguiente fórmula:

$$V_5 = \frac{V_3 * A_3}{A_5}$$

$$V_5 = \frac{15 * 0.775}{0,449}$$

$$V_5 = 25,89 \text{ m/s}$$

Pérdidas de carga secundaria. Para calcular el coeficiente adimensional de cargas secundarias en un difusor cónico utilizamos la siguiente ecuación:

$$\zeta = m[1 - DH_5^2]^2 \tag{24}$$

Dónde m es un valor de m es universal = 0,27

$$\zeta = 0,27[1 - 0,756^2]^2$$

$$\zeta = 0,049$$

Con este coeficiente podemos calcular las pérdidas de cargas secundarias:

$$H_{S\ 4-5} = \frac{\zeta V_4^2}{2g}$$

$$H_{S\ 4-5} = \frac{0,049 * 15^2}{2 * 9,8}$$

$$H_{S\ 4-5} = 0,56 \text{ m de aire}$$

3.4.3.2 Selección de materiales. Para ésta sección, se ha utilizado fórmica con la finalidad de que el acabado interior sea lo más liso posible.

Para la parte exterior de la sección, se ha usado tela ligera de fibra de vidrio con un preparado de resina y cobalto.

3.4.4 Honeycombs

3.4.4.1 Consideraciones para el diseño. La turbulencia en la sección de pruebas, se reduce instalando honeycombs antes de la zona de contracción.

Estos honeycombs, hacen que la presión caiga de forma moderada. La longitud mínima de un honeycomb debe ser de seis a ocho veces el tamaño de la celda.

El honeycomb se está ubicado entre las zonas 1 – 2.

Para esta zona se asume 1m de pérdidas.

3.4.4.2 Selección de materiales. Esta zona está hecha de fibra de vidrio para soportar altas presiones.

3.5 Cálculo de las pérdidas en el túnel de viento

$$H_I = \sum \text{de todas las pérdidas en el túnel de viento}$$

El volumen de control para la aplicación de la ecuación de Bernoulli se toma alrededor del túnel de viento de tal manera que tanto en la entrada como en la salida del aire se

encuentra a la presión atmosférica ($P_1=P_2=P_{atm}$), y como la sección de entrada se encuentra lejos del ventilador, de modo que la velocidad de flujo en esta sección es despreciable ($V_1 = 0$).

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + H_{vent} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + H_l \quad (25)$$

Dónde $Z_1=Z_2$

$$H_{vent} = \frac{V_2^2}{2g} + H_l \quad (26)$$

$$H_{vent} = \frac{25,89^2}{2(9,81)} + 4,354$$

$$H_{vent} = 38,55 \text{ m}$$

3.6 Potencia del ventilador

$$\rho = 0,8992 \text{ Kg/m}^3$$

$$Q = 1,16 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Pot = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_{vent} \quad (27)$$

$$Pot = 0,8992 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1,16 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 38,46 \text{ m}$$

$$Pot = 393,14 \text{ W} = 0,52 \text{ Hp}$$

El caballaje del motor se toma con un 20% mayor que las del ventilador por seguridad.

Potencia del motor = 0.62 hp = 1 hp

3.7 Selección del ventilador

El ventilador de tipo tubular portátil, ha sido especialmente diseñado para proyectar un amplio caudal de aire direccionándolo sobre operarios, máquinas, etc., en zonas dónde la existencia de fuentes directas de calor, inexistencia de aireación y otros factores hacen necesaria una ventilación.

Características principales del ventilador

Aplicaciones

Construcción compacta y robusta, facilidad de desplazamiento(ver Anexo B).

Tabla1. Características técnicas

MODELO	VELOCIDAD R.P.M	POTENCIA	INTENSIDAD MÁXIMA A	CAUDAL DESCARGA LIBRE m³/hr	NIVEL SONORO dB	PESO APROX Kg
PBB-400	1725	1/3	-	2.9	5300	25
PBT-400	1725	1/4	0.5	-	5300	25
PBB-500	1725	1/2	-	5.7	11156	31
PBT-500	1725	1/2	1	-	11156	31
PBT-630	1725	1	1.9	-	18284	42
PBT-800	1725	2	3.5	-	31998	56

Nivel sonoro de acuerdo a norma 300/96 Y 301/96 AMCA

Fuente: Manual del ventilador

CAPÍTULO IV

4 CONSTRUCCIÓN

Basándonos en los requerimientos detallados en los capítulos anteriores y establecida ya la forma final, se determinaron los materiales tanto del molde como para la construcción del túnel.

4.1 Construcción del molde

4.1.1 Plantillas de corte y bridas de unión. Dado que el molde sería realizado en espuma Flex (foam) se requiere de moldes para el corte por lo que lo más adecuado es imprimir las secciones transversales y las bridas del túnel para posteriormente pegarlos en madera MDF de 6mm, recortarlos a la medida.

En las planillas de corte se identifican los segmentos numerados para lograr un corte uniforme.

Para la construcción del túnel se necesitan dos juegos de bridas.

Figura 27. Plantillas de corte y bridas de unión



Fuente: Autores

4.1.2 Corte de molde. Obteniendo un bloque de espuma de 2 x 1 x 0.50 m. Se procede a filetear el bloque con el objeto de obtener aristas rectas, posteriormente se corta el bloque en secciones de 75cm. a lo ancho del bloque inicial.

Una vez que las secciones se encuentran listas, se aseguran las plantillas de corte.

Con la ayuda de una niquelina, se procede a cortar el molde y siguiendo la numeración de los segmentos se obtiene el corte uniforme deseado.

Este proceso se repite para todas las medias secciones.

Figura 28. Molde de foam



Fuente:Autores

4.1.3 Unión de medias secciones. Una vez que las secciones se encuentran listas, se verifica que las mismas coincidan para posteriormente esparcir pega blanca en una de las caras de unión de las secciones, dichas secciones se unen y aseguran durante al menos 3 días para que la unión sea permanente.

Este proceso se repite para todas las secciones (ver Figura 29).

4.1.4 Tallado de formas. Las zonas del túnel de viento merecen un trato especial, el mismo que se lo denomina como tallado de formas, debido a que en éstas zonas se debe lograr una forma compleja realizando un tallado del material en ciertas partes y rellenado en otras.

Figura 29. Unión de secciones



Fuente:Autores

Mediante la guía de una plantilla prediseñada en Solidwork, se obtiene una forma preliminar del perfil de las zonas el mismo que ayudará a tallar el material para llegar a la forma requerida.

Figura 30. Tallado de formas



Fuente:Autores

4.1.5 Unión de secciones y corrección de formas.Una vez que cada sección se ha construido y ha obtenido la forma final de acuerdo a los planos preliminares, se comprueba que las uniones de cada una de las secciones coincidan de modo que se

proceda a unir las utilizando pega blanca y asegurando las uniones durante varios días, para obtener una unión segura.

Inclusive una vez unidas las secciones, se debe verificar ciertos excesos de materiales que por efectos de la unión con la pega utilizada quedan en las secciones pudiendo provocar imperfecciones en el acabado final. Esta verificación ayuda a que las uniones queden de acuerdo a lo planificado.

Figura 31. Unión y corrección de forma



Fuente: Autores

4.1.6 División de secciones. Una vez que se obtuvo la forma ideal de las secciones, se procede a dividir cada una de ellas para trabajarlas independientemente. Esta nueva división se la realiza debido a que el molde final completo es inmanejable por su medida y se debe trabajar por partes para facilitar su manipulación. (ver Figura 32).

4.2 Construcción zona de pruebas

Una vez definidos los materiales que se utilizarán para la construcción de la zona de pruebas, se corta una pieza de fórmica que cubra la superficie del molde, después mediante pega epoxi se unen las bridas a la fórmica.

Posteriormente se colocan los refuerzos que se requieran a la sección y los elementos adicionales que se necesitarán para los accesorios.

Con los refuerzos listos, se coloca la tela ligera de fibra de vidrio sobre toda la zona y se la impregna con un preparado que contiene resina, cobalto y meck. Se espera a que la

mezcla se haya secado adecuadamente y se procede a cortar el exceso de tela de fibra de vidrio y eliminar las zonas en dónde irán las ventanas y demás accesorios.

Para lograr un mejor acabado por fuera se procede a pintar la zona con laca automotriz exteriormente (verFigura 33-34).

Figura 32. División de secciones



Fuente:Autores

Figura 33. Construcción inicial de la zona de pruebas



Fuente:Autores

Figura 34. Zona de pruebas terminada



Fuente:Autores

4.3 Construcción de difusor cónico

Para la construcción del difusor cónico, se corta una pieza de fórmica que cubra la cuarta parte de la superficie del molde, después mediante pega epoxi se unen las bridas a la fórmica y se colocan los refuerzos que requiera la sección.

Con los refuerzos listos, se coloca la tela ligera de fibra de vidrio sobre esta sección y se la impregna con la resina preparada. Una vez que la mezcla se haya secado, se procede a cortar el exceso de tela de fibra de vidrio y fórmica.

Mediante el mismo proceso, se trabaja la otra cuarta parte de la sección.

El proceso indicado en los párrafos anteriores, se repite nuevamente para las dos cuartas partes siguientes.

Del mismo modo que en la zona de pruebas, en esta zona de difusor cónico se procede a pintar el exterior con laca automotriz.

Figura 35. Proceso de construcción del difusor cónico



Fuente:Autores

La zona del difusor cónico se encuentra elaborada en dos partes para facilitar la movilidad de dicho elemento (verFigura 36).

4.4 Construcción zona de contracción

En esta zona, se procede a forrar el molde ya listo de las secciones anteriores, con papel contact para lograr un aislamiento entre el foam y la resina.

Luego de realizar este proceso, se coloca cera desmoldante y se pule. Una vez pulida la superficie se colocan las bridas, las mismas que se forran con tela de fibra y se impregna de resina. Se espera el tiempo adecuado para que los materiales sequen y nuevamente se procede a colocar otra capa de tela de fibra, retirando los excesos existentes, se rellenan interiormente los orificios con macilla acrílica se pule a conformidad(verFigura 37-38).

Figura 36. Difusor cónico terminado



Fuente:Autores

Figura 37. Proceso de construcción de la zona de contracción



Fuente:Autores

Después se realiza un proceso completo de pintura.

Figura 38. Zona de contracción terminada



Fuente:Autores

4.5 Construcción honeycombs

En la zona de Honeycombs se sigue el mismo proceso que para la construcción de la zona de contracción y además se debe realizar una rejilla la misma que se construye de acrílico de 4mm de espesor, haciendo pequeñas incisiones de la mitad de la profundidad para realizar un trabado de las piezas.

La rejilla construida es armada y se la coloca acertadamente en el interior de la pieza de fibra de vidrio. La rejilla se asegura con ángulos de aluminio y pernos.

Figura 39. Proceso de construcción de la zona honeycombs.



Fuente:Autores

Figura 40. Zona honeycombs terminada



Fuente:Autores

4.6 Construcción de la zona impulsora

Esta es una de las zonas más importantes del túnel de viento ya que es el sector dónde va a ir instalado el motor y el ventilador y va a soportar la fuerza de impulso.

Se encontrara construido de acero para soportar el peso del motor y que no sufra ninguna deformación

Figura 41. Zona impulsora terminada.



Fuente: Autores

4.7 Construcción de la bancada

La función de esta bancada es la de mantener estable el túnel de viento ya que al momento de realizar las pruebas existe mucho movimiento.

Figura 42. Bancada



Fuente: Autores

4.8 Selección de los dispositivos eléctricos

El principal dispositivo eléctrico es el motor que dará un buen rendimiento del ventilador

Con los cálculos obtenidos en el capítulo anterior podemos concluir que el motor adecuado es de la marca ABB Motors de 1 hp de potencia que se encontrara montado en la zona impulsora (ver Anexo C).

Figura 43. Motor trifásico



Fuente:Manual de uso motor ABB

Tabla2. Características motor trifásico

Potencia	1 Hp
Voltaje	110V-220 V
Tipo	Trifásico
Rpm	1750 rpm

Fuente: Manual motor ABB

Otro elemento eléctrico importante es la cámara de humo de la marca Italy audio modelo Z 600 que nos ayudara a mostrar como fluyen las líneas de humo sobre los diferentes modelos a escala y como es su comportamiento frente a las diferentes vehículos.

Figura 44. Cámara de humo



Fuente: Autores

Características:

- Capacidad del tanque del líquido de burbujas: 0.9 litros.
- Distancia de disparo: 5 metros.
- Consumo de líquido: 99 m3 / min.
- Tiempo de Calentamiento de la máquina: 5 minutos.
- Controlador de disparo mediante cable de 5 metros de longitud.
- Voltaje de funcionamiento: 110 V / 50 Hz.
- Potencia de consumo: 900 W.
- Peso de la máquina: 5.5 Kg.
- Dimensiones de la máquina: 39 x 26 x 20 cm.

4.9 Dispositivos electrónicos

Otro elemento fundamental en el túnel de viento son los sensores que son los encargados de medir y procesar las señales tomadas.

Las variables a ser medidas son la velocidad del viento, la carga y la sustentación ya que son datos imprescindibles en la aerodinámica del automóvil.

Actualmente la presión sobre el vehículo es fundamental ya que produce diferentes fenómenos como son estabilidad, adherencia al suelo y es primordial en lo referente al consumo de combustible.

El sensor a ser utilizado es un anemómetro de la marca Kestrel que será el encargado de medir la velocidad del viento, presión barométrica, altitud, humedad, etc. Y por medio de una señal vía bluetooth a través de un software del mismo elemento se pueden enviar los datos a un programa instalado previamente en la computadora (ver Anexo D).

Figura 45. Sensor anemómetro (Kestrel 4200)



Fuente: Manual de uso anemómetro Kestrel

Tabla 3. Especificaciones del anemómetro

Altura	28mm
Anchura	45mm
Dimensiones	127 x 45 x 28mm
Duración de batería	400 h
Longitud	127mm
Número de modelo p	Kestrel 4200
Parámetros de medición	Flujo de aire, velocidad de aire, altitud, densidad, punto de rocío, temperatura de bochorno, relación de humedad, presión, humedad relativa, temperatura, temperatura de condensación, temperatura de sensación
Peso	102 g
Potencia de la fuente	Batería
Precisión máxima de la velocidad del aire	±3 %
Precisión máxima de medición de temperatura	±1 °C
Resolución de la velocidad del aire	1mph
Resolución de medición de temperatura	0.1°C
Temperatura máxima	+125°C
Temperatura máxima de funcionamiento	+55°C
Temperatura mínima de funcionamiento	-10°C
Tipo de sonda	Paleta giratoria
Velocidad máxima del aire	135mph

Fuente: Manual anemómetro Krestel

Otro elemento electrónico a ser utilizado es el variador de frecuencia de la marca Siemens que será el encargado de regular y variar la velocidad de funcionamiento del motor ABB Motors (ver Anexo E).

Figura 46. Variador de frecuencia



Fuente: Autores

Tabla4. Características técnicas del variador de frecuencia

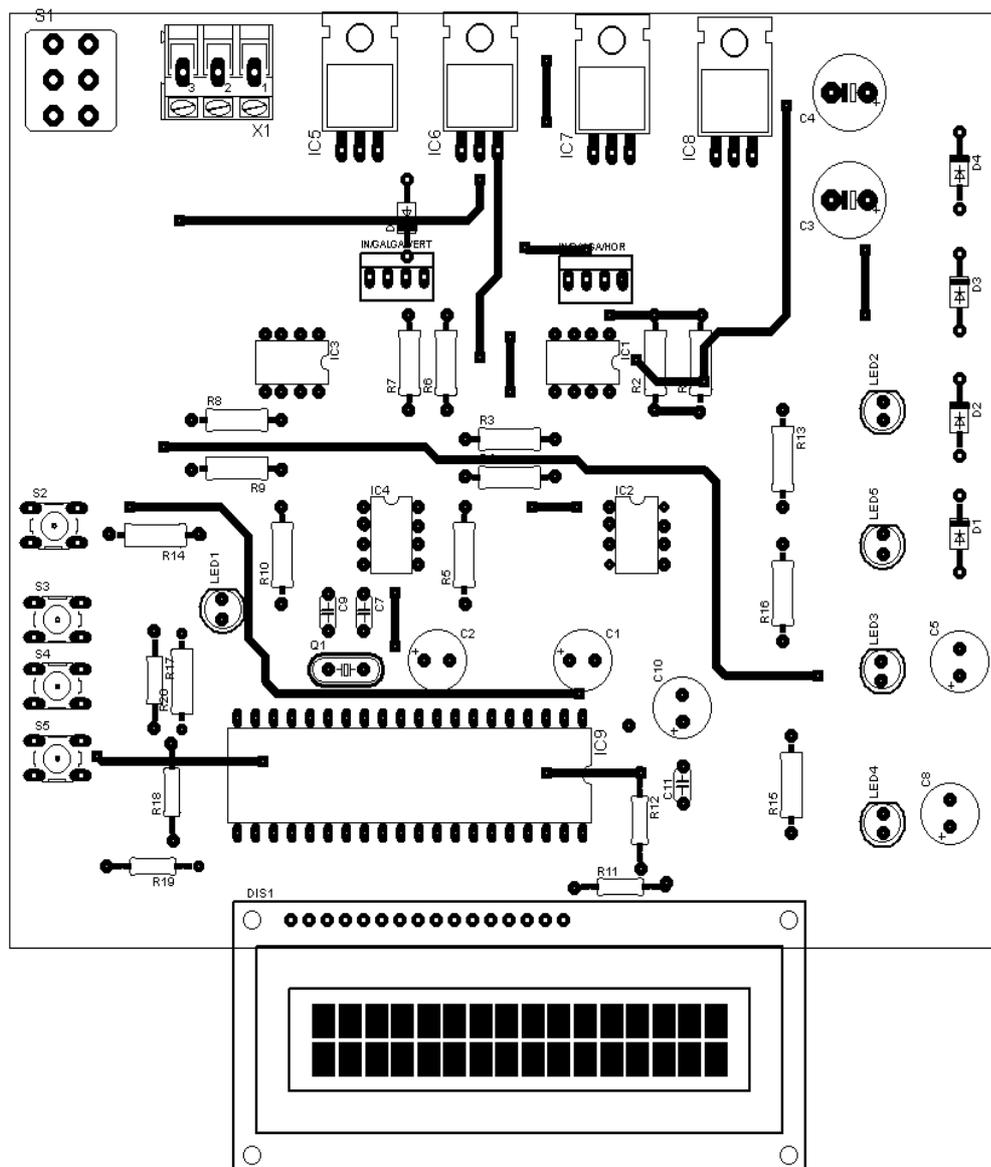
Tamaño constructivo	A		A con disipador plano	B	C
Potencia	0,12...0,37 kW	0,5...0,75 kW	0,12...0,75kW	1,1....1,5 Kw	2,2.....3kW
Intensidad asignada de entrada (a 230 V)	2,3.....6,2 A	7,7.....10 A	2,3.....10 A	14,7.....19,7 A	27,2.....35,6A
Intensidad asignada de salida (a 40°C)	0,9.....2,3 A	3,2.....3,9 A	0,9.....3,9 A	6.....7,8 A	11.....13,6 A
Datos mecánicos					
Grado de protección	IP20				
Temperatura de servicio	40°C, hasta + 50°C con derating				
ancho * alto * profundidad *(mm)	90 * 150 * 116	90 * 150 * 131	90 * 150 * 101	140 * 160 * 142	184 * 181 * 152
Datos electrónicos					
Tensión de red	1 AC 200.....240 V ± 10%				
Frecuencia de red	4763 Hz				
Capacidad de sobrecarga	Corriente de sobrecarga 1,5 * corriente asignada a la salda (es decir, 150% sobrecarga) durante 60 s, a continuación 0,85 * corriente asignada de salida durante 240 s tiempo de ciclo 300 s.				
Frecuencia de salida	0.....650 Hz				
Frecuencia de Pulsación	8 kHz (estándar), 2.... 16 kHz (en escalones de 2 kHz)				
Rango de frecuencia inhibibles	1, parametrizable				
Rendimiento del convertidor	En equipos < 0,75 kW: 90.....94% en equipos ≥ 0,75 kW: 95%				
Filtro CEM	Variante con filtro CEM integrado de clase A/B				
Entradas digitales	Hasta 4				
Salidas digitales	1 salida poroptoacoplador con aislamiento galvánico (24 V DC, 50 mA, óhm..., tipo NPN				
Entrada analógica	Variante con una entrada analógica (también utilizable con entrada digital				
Interfaces de comunicación	Variante con interfaz serie RS485 para funcionar con protocolo USS				
Funciones					
Métodos de control/regulación	Característica U/F lineal (con elevación de tensión parametrizable) Característica U/F cuadrática Característica multipunto (característica U/F Parametrizable)				
Funciones operativas	Modo manual a impulsos Rearranque automático tras un paro provocado por un corte de red Conexión suave del convertidor al motor girando (rearranque al vuelo)				
Frecuencias fijas	3, parametrizables				
funciones de freno	Frenado por inyección de corriente continua, frenado combinado				
Funciones de protección	Subtensión, sobretensión, defecto de tierra, cortocircuito, vuelco del motor, protección térmica del motor, sobre temperatura en convertidor, sobrettemperatura en motor.				
Motores aptos para conectar	Motor asíncronos de baja tensión				
Longitud máx. del cable al motor	25 m (apantallado) 50 m (no apantallado)				
Normas					
Conformidad con normas	UL, cUL, CE, c-tick,				
Mercado CE	Según directiva de baja tensión 73/23/CEE				

Fuente: Manual variador de frecuencia Siemens

Finalmente el último elemento es el circuito electrónico que será el encargado de controlar el correcto funcionamiento de los sensores de carga/sustentación y resistencia que cumplen la función de medir la carga y la resistencia de los distintos modelos de pruebas que funcionan a diferentes velocidades (ver Anexo F).

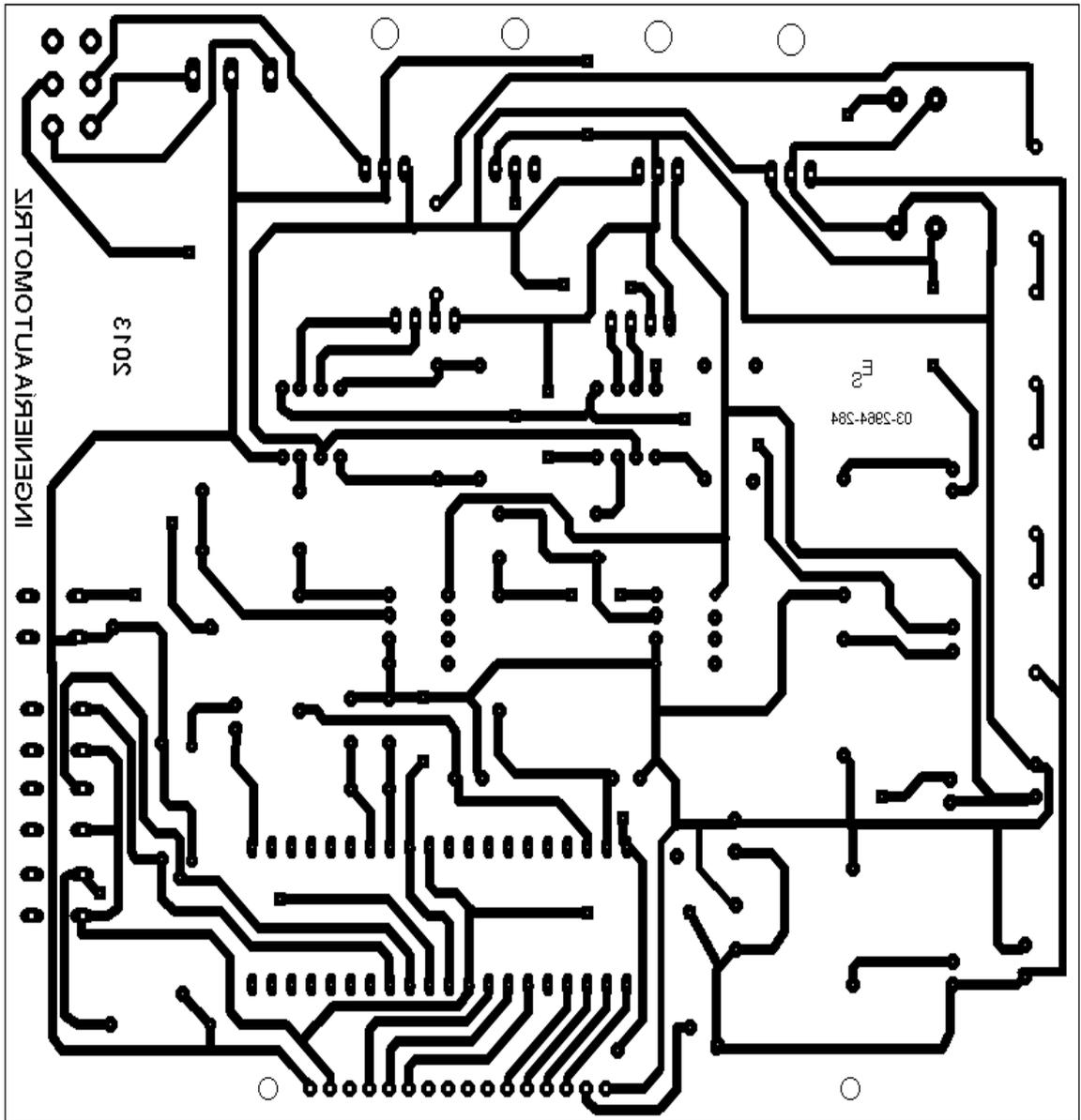
Nota: Los sensores de carga/sustentación y resistencia fueron calibrados con la ayuda de un dinamómetro para que los valores que midan sean exactos.

Figura 47. Circuito electrónico cara frontal



Fuente: Autores

Figura 48. Circuito electrónico cara posterior



Fuente: Autores

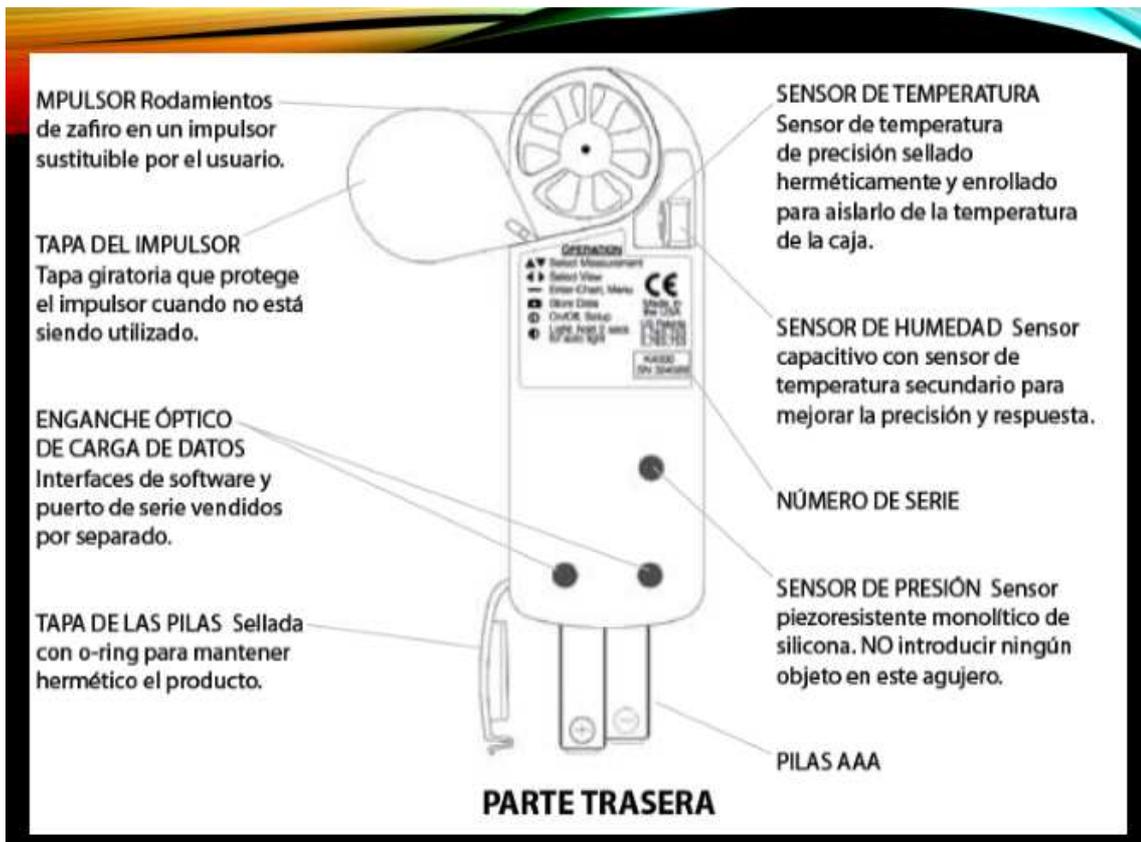
CAPÍTULO V

5 PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1 Instructivo de operación



ANEMOMETRO



MENÚ DE INSTALACIÓN PRINCIPAL

Puede personalizar su Kestrel Meter de muchas formas. Pulse el botón  para acceder al Menú de instalación principal. Pulse el botón  para seleccionar la opción destacada. El Menú de instalación principal contiene: Apagar, Opciones de memoria, Mediciones, Escala de los gráficos, Unidades, Pantallas de usuario, Sistema, Fecha y hora, Idioma y Restaurar.

Apagar (Off)

Pulse  o el botón  para apagar la pantalla. Incluso cuando la pantalla del Kestrel Meter está apagada, la unidad continuará almacenando datos de forma automática al ritmo de almacenamiento definido. La vida de la pila disminuirá si se almacenan datos con frecuencia. El único modo de apagar por completo la unidad es quitarle las pilas. Se almacenarán opciones y datos personalizados cuando se quiten las pilas.

Opciones de memoria (Memory Options)

Estas opciones controlan las propiedades de almacenamiento de datos.

Opción	Descripción	Funcionamiento
Borrar registro (Aceptar/Hecho)	Se borran todos los datos almacenados. Esto también eliminará los datos Min/Máx/Med.	Pulse  o  para borrar el registro.
Restablecer MMM (Aceptar/Hecho)	Se borran todos los datos Min/Máx/Med. Los datos de los gráficos seguirán intactos.	Pulse  o  para borrar el MMM.

Almacenamiento automático (Activado/ Desactivado)	Cuando está Activado, los datos se almacenan automáticamente en el ritmo de almacenamiento seleccionado. Cuando está desactivado, sólo se almacenan datos cuando se captan de forma manual con el botón  .	Pulse  o  para cambiar entre Activado y Desactivado.
Ritmo de almacenamiento* (2 seg – 12 h)	La frecuencia a la cual se almacenan de forma automática los conjuntos de datos. (La vida de la pila puede reducirse si se almacenan datos con frecuencia.)	Pulse  o  para aumentar o disminuir la frecuencia del Ritmo de almacenamiento.
Sobrescribir (Activado/ Desactivado)	Esta opción sólo es aplicable cuando el registro de datos está lleno. Cuando está Activado, los datos de referencia más antiguos se eliminan y liberan espacio para nuevos datos de referencia. Cuando está Desactivado, no se guardan nuevos datos de referencia.	Pulse  o  para cambiar entre Activado y Desactivado.
Almacenamiento manual (Activado/ Desactivado)	Cuando está Activado, los datos se almacenan cuando el botón  está oprimido. Cuando está Desactivado, el botón  está inutilizado.	Pulse  o  para cambiar entre Activado y Desactivado.

Unidades (Units)

Las unidades de medida pueden ajustarse para adaptarse de un modo óptimo a su aplicación. Están disponibles las siguientes unidades:

Velocidad del viento	Corriente de aire	Dimensiones	
m/s metros por segundo	Cfm pies cúbicos por minuto	Ft pies	
km/h kilómetros por hora	M ³ /h metros cúbicos por hora	Cm centímetros	
kt nudos	M ³ /m metros cúbicos por minuto	M metros	
mph millas por hora	M ³ /s metros cúbicos por segundo	In pulgadas	
ft/m pies por minuto	L/s litros por segundo		
Bft Beaufort			

Proporción de humedad	Temperatura, Punto de rocío, Temperatura del bulbo húmedo, Sensación térmica e Índice de calor	Presión	Altitud, Altitud de densidad
Gpp granos por libra	°C Celsius	InHg pulgadas de mercurio	m metros
G/kg gramos por libra	°F Fahrenheit	HPa hectopascales	ft pies
		psi libras por pulgada cuadrada	
		mb milibares	

Resalte la medición seleccionada pulsando el botón ▲ o ▼. Pulse el botón ◀ o ▶ para desplazarse por las unidades disponibles. Pulse el botón Ⓞ para volver al Menú de instalación principal.

Variador de Frecuencia

Este botón sirve para visualizar información adicional.

Este botón sirve para cambiar el sentido de giro del motor.

Al pulsar este botón arranca el convertidor.

Pulsando este botón se para el motor siguiendo la rampa de Deceleración.

Pulsando este botón en estado "listo" el motor arranca y gira a la frecuencia preseleccionada.

La pantalla de cristal líquido muestra los ajustes actuales del convertidor

Pulsando este botón se sube el valor visualizado.

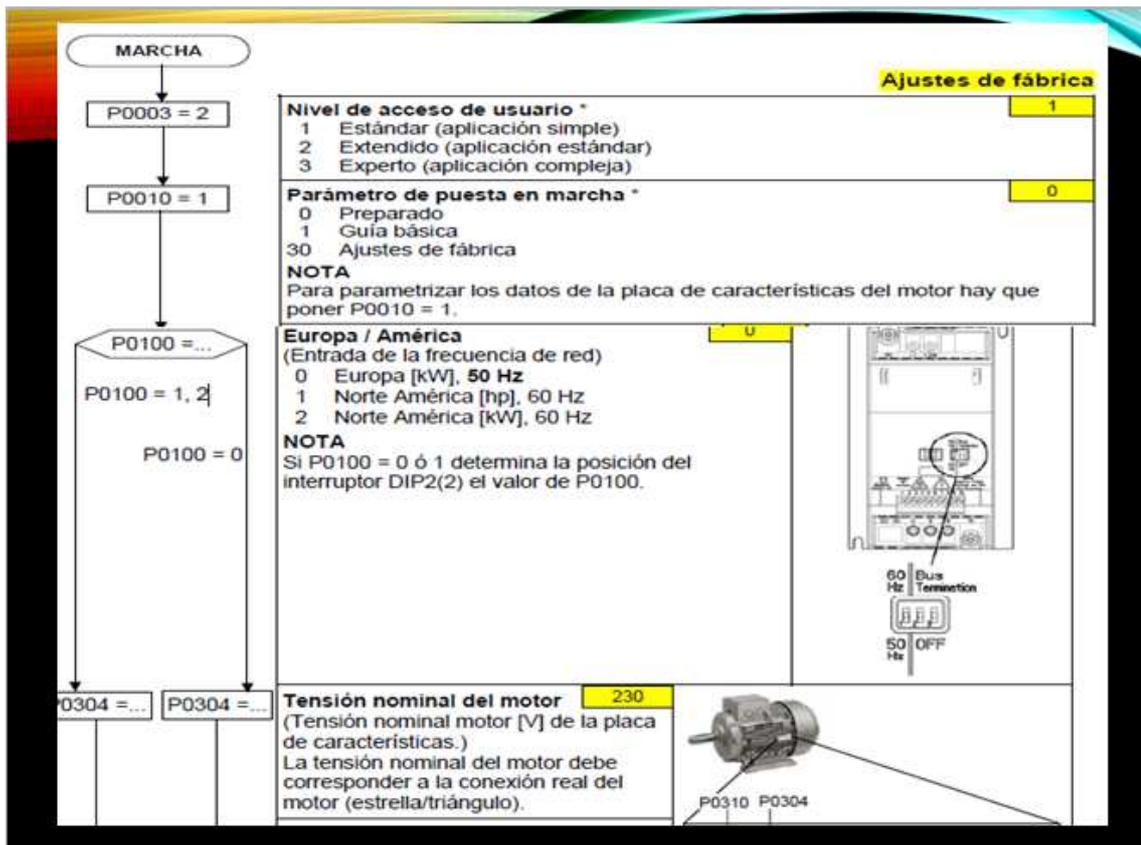
Pulsando este botón se baja el valor visualizado.

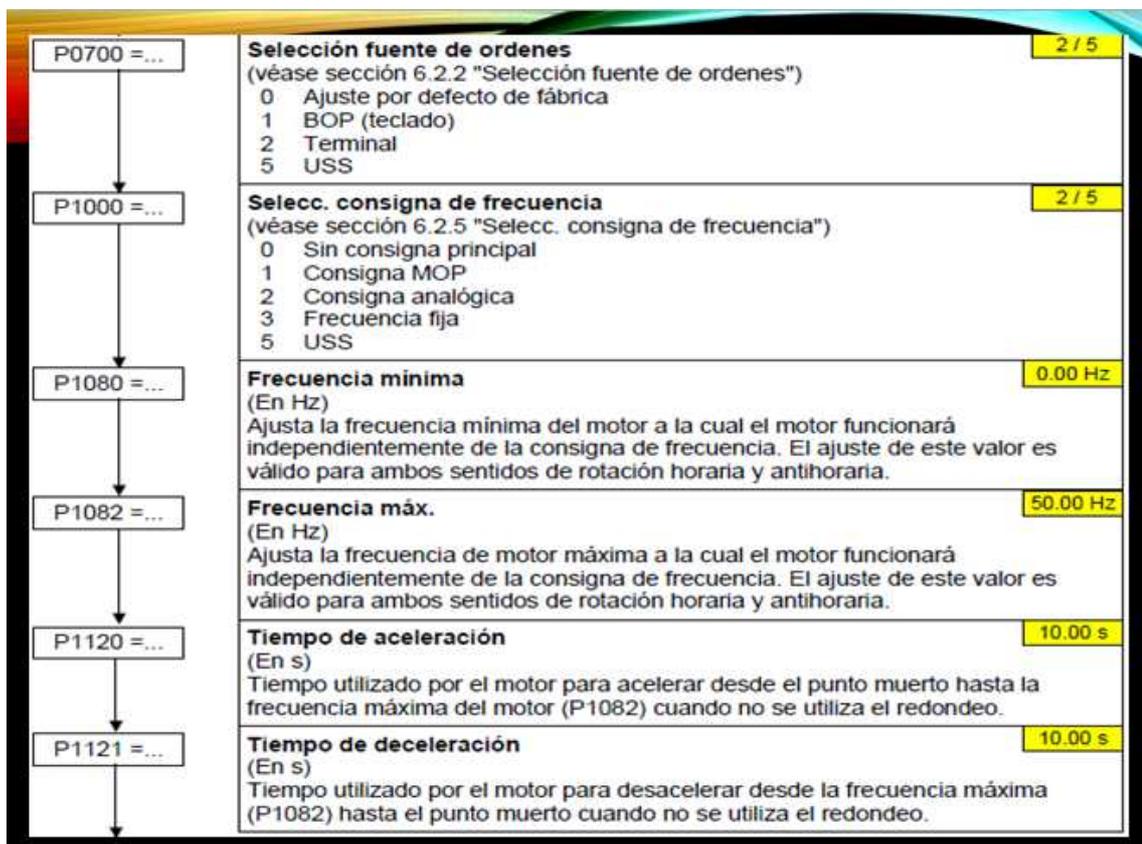
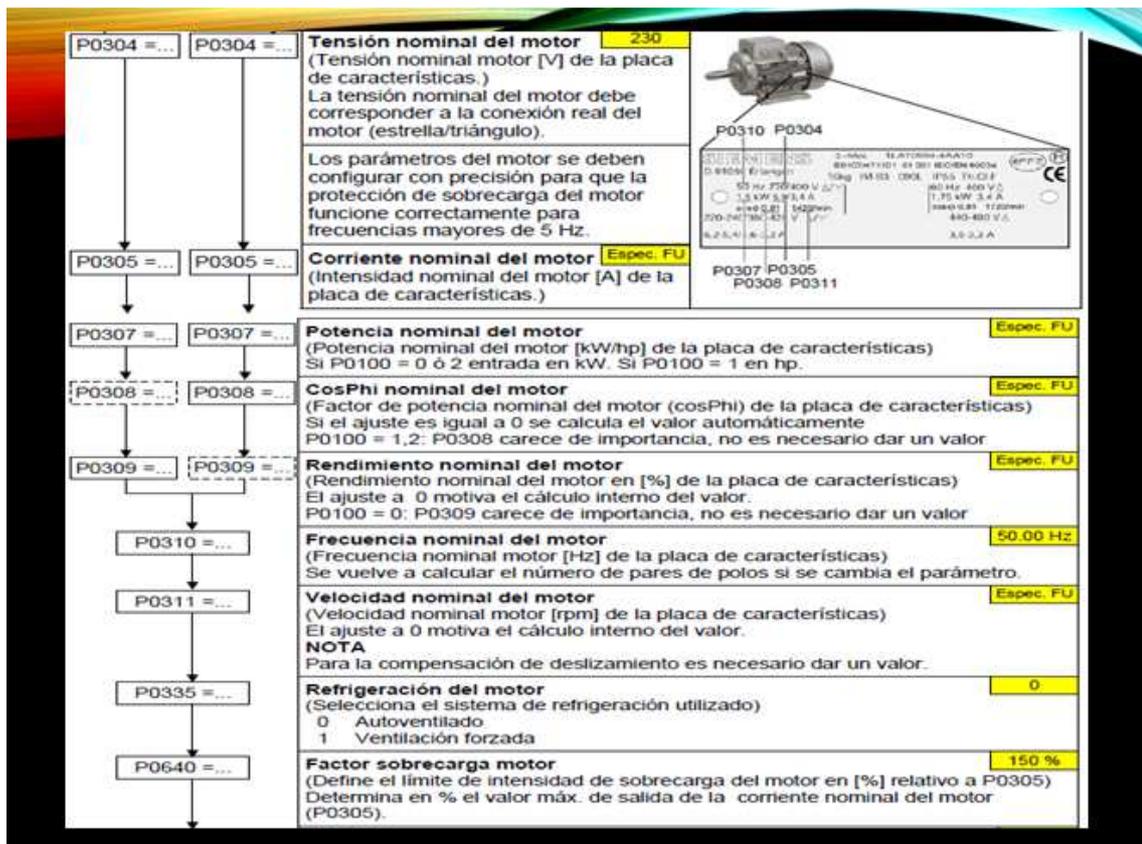
Pulsando este botón es posible acceder a los parámetros del variador.

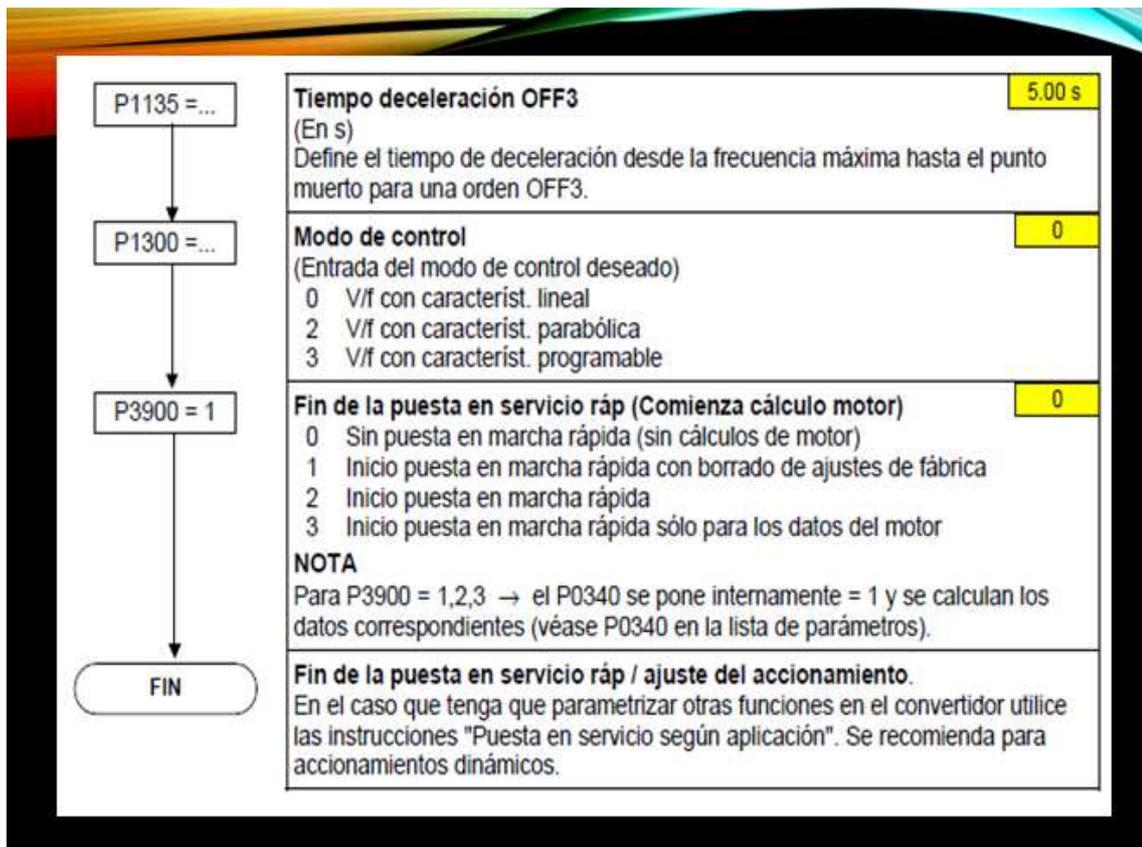
Puesta en servicio

Puesta en servicio rápida

Con la puesta en servicio rápida se adapta el convertidor al motor y se ajustan parámetros importantes para las exigencias tecnológicas. La puesta en servicio rápida no es obligatoria si los datos del motor almacenados en el convertidor (motor de Siemens de 4 polos 1LA, conexión en estrella Spec. FU) coinciden con los de la placa de características. Los parámetros marcados con * ofrecen más posibilidades de ajuste de las que se mencionan aquí. Para más detalles consulte la lista de parámetros.







CIRCUITO ELECTRÓNICO

- El túnel de viento cumple con la función de sensar los valores de la carga y la resistencia que se provoca en los modelos de prueba con la ayuda de los sensores de carga/sustentación y resistencia.



MÁQUINA DE HUMO

- La máquina de humo debe ser la primera en ser conectada ya que tiene un tiempo de calentamiento de 5 minutos.
- Antes de conectarla hay que fijarse que en el contenedor del líquido de humo haya suficiente para que esta máquina trabaje.
- Cuando la máquina de humo este lista para funcionar se encenderá las luces del control de mando.

5.2 Ensayos y pruebas

5.2.1 Datos obtenidos por el circuito electrónico

Tabla 5. Datos obtenidos VW Combi

 VOLKSWAGEN COMBI				
FRECUENCIA	RESISTENCIA	CARGA Y SUSTENTACIÓN	VELOCIDAD	TEMPERATURA
(Hz)	(N)	(N)	(m/s)	(° C)
30	0.200	0.150	10.9	18.5
45	0.640	0.350	16.2	18.5
60	0.880	0.400	18.9	18.5

Fuente: Circuito electrónico

Tabla 6. Datos obtenidos VW Escarabajo

 VW ESCARABAJO				
FRECUENCIA	RESISTENCIA	CARGA Y SUSTENTACIÓN	VELOCIDAD	TEMPERATURA
(Hz)	(N)	(N)	(m/s)	(° C)
30	0.040	0.200	12.6	18.5
45	0.440	0.250	16.6	18.5
60	0.640	0.400	17.8	18.5

Fuente: Circuito electrónico

Tabla7. Datos obtenidos FordFocus Rally

FORD FOCUS RALLY				
FRECUENCIA (Hz)	RESISTENCIA (N)	CARGA Y SUSTENTACIÓN (N)	VELOCIDAD (m/s)	TEMPERATURA (° C)
30	0.160	0.50	11.8	18.5
45	0.479	0.150	17.9	18.5
60	0.680	0.100	19.2	18.5

Fuente: Circuito electrónico

5.2.2 Datos obtenidos por el anemómetro Krestel

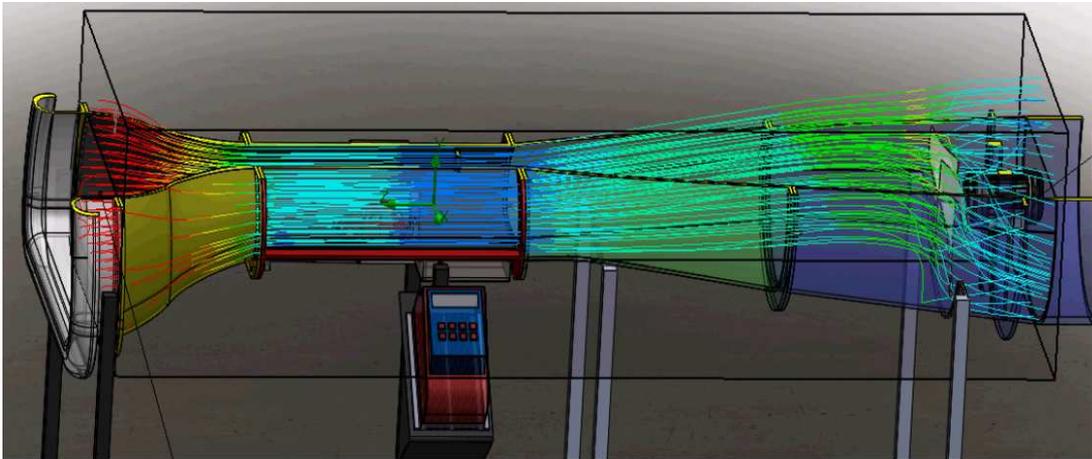
Tabla8. Datos del anemómetro

VELOCIDAD (m/s)	FLUJO (m ³ /h)	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)	HUMEDAD ESPECIFICA (g/Kg)	IND. CALOR (°C)	PRESIÓN BAROMETRICA (hPa)	ALTITUD (m)
5,0	178,0	14,5	75,9	9,9	14,1	800,90	2754
5,5	198,0	14,4	74,5	9,7	14,0	801,00	2754
3,4	122,0	17,9	83,8	13,7	17,9	800,70	2754
1,6	56,0	15,5	78,6	10,9	15,2	800,70	2754
7,8	282,0	14,2	78,4	10,1	13,9	800,90	2754
11,0	396,0	14,5	78,9	10,3	14,3	800,90	2754
13,7	492,0	14,4	79,0	10,2	14,2	801,00	2754
14,3	532,0	14,4	69,0	9,2	15,2	800,70	2754
3,3	119,0	15,1	69,7	9,5	14,5	800,00	2754
6,2	223,0	15,7	74,5	10,5	15,2	800,20	2754
0,4	15,0	17,7	76,6	12,3	17,3	800,70	2754
7,5	270,0	15,5	71,8	10,0	14,9	801,40	2754
9,4	338,0	15,8	71,2	10,1	15,1	801,30	2754
9,4	338,0	15,8	71,2	10,1	15,1	801,30	2754
12,1	435,0	15,9	69,6	9,9	15,2	801,60	2754
0,8	29,0	16,9	72,9	11,1	16,3	802,20	2754
11,8	424,0	15,4	71,4	9,8	14,8	802,70	2754
9,0	323,0	15,8	70,1	9,9	15,1	802,10	2754
7,9	283,0	13,8	70,1	10,0	15,2	802,20	2754
7,6	273,0	17,6	63,7	10,8	17,7	803,20	2754

Fuente: Software Krestel

5.3 Cálculos obtenidos con el programa Solidwork

5.3.1 Simulación del túnel de viento en el programa Solidwork

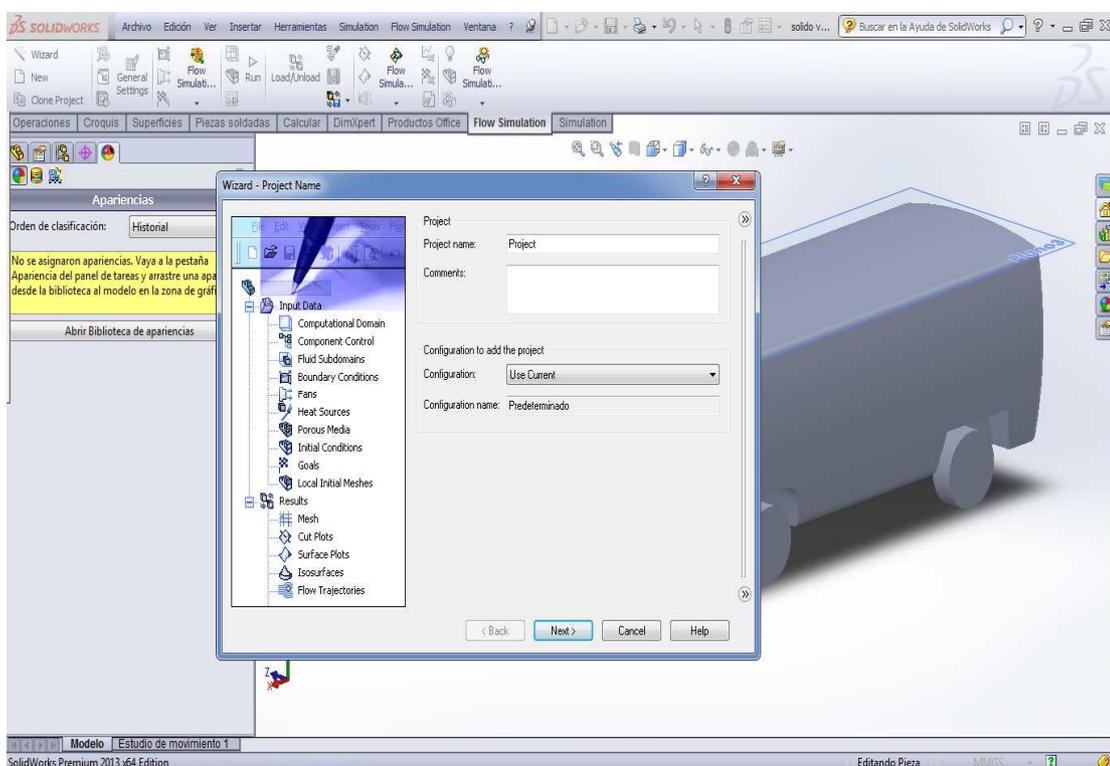


En esta captura de Solidwork se puede visualizar diversos colores Dónde se determina los puntos donde existe mayor presión en el túnel de viento

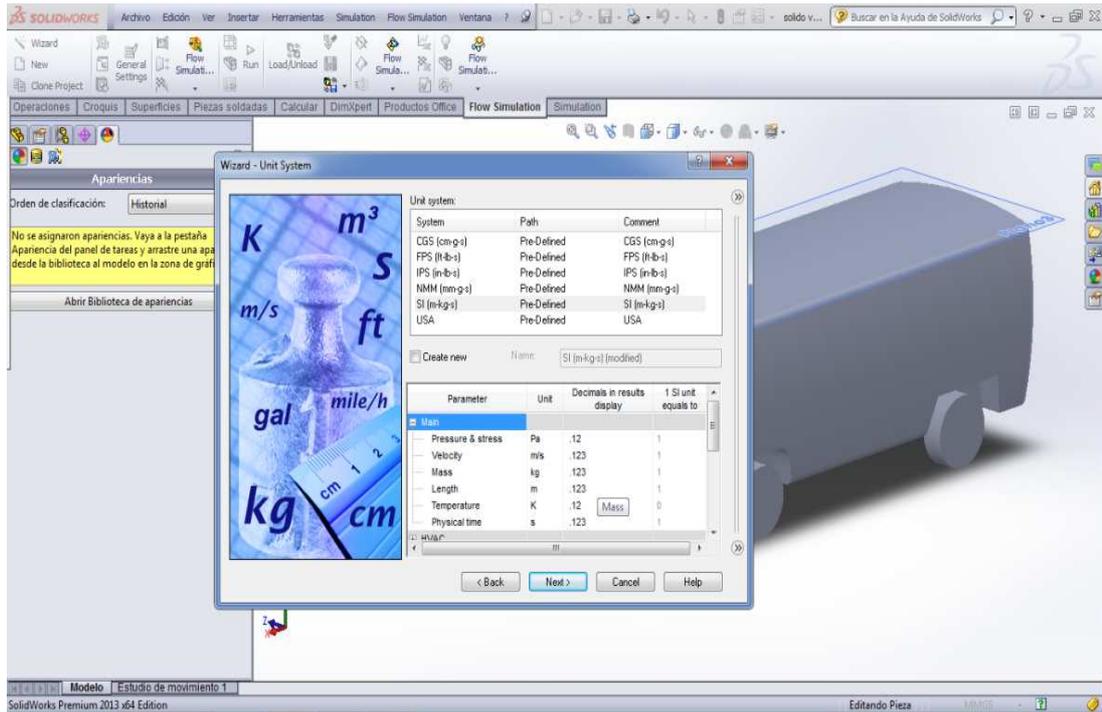
5.3.2 Simulación de los vehículos en el programa Solidwork

Procedimiento utilizado para realizar la simulación

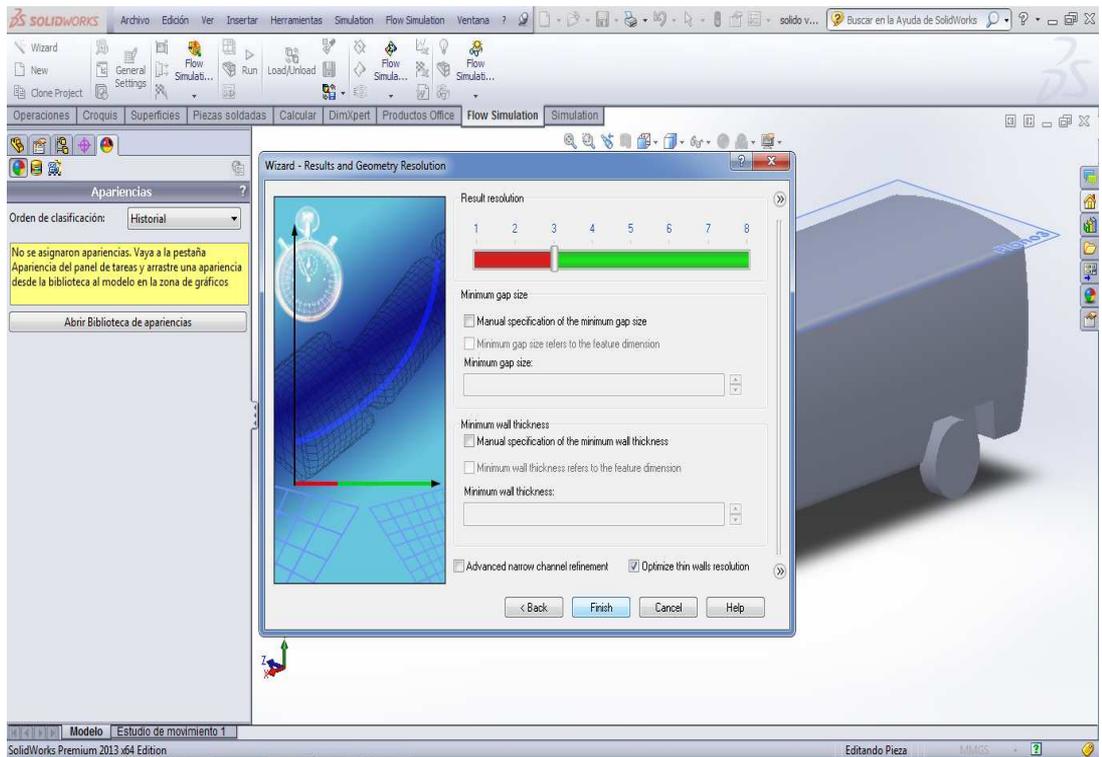
Paso 1



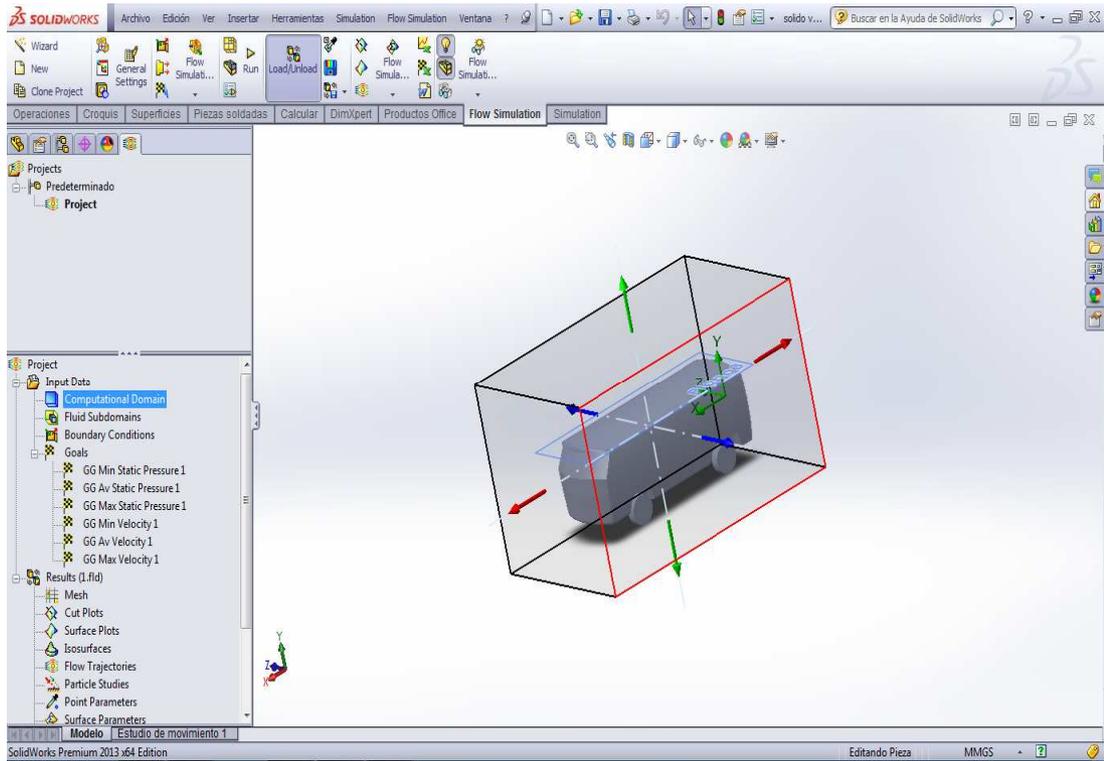
Paso 2



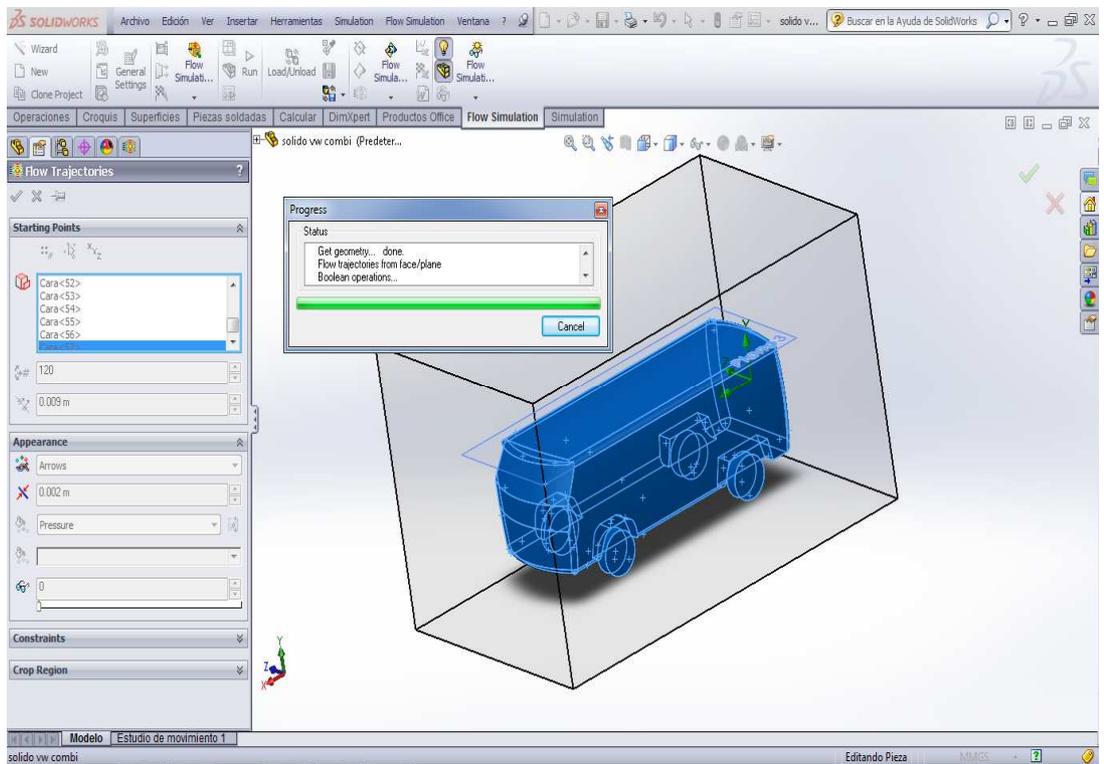
Paso 3



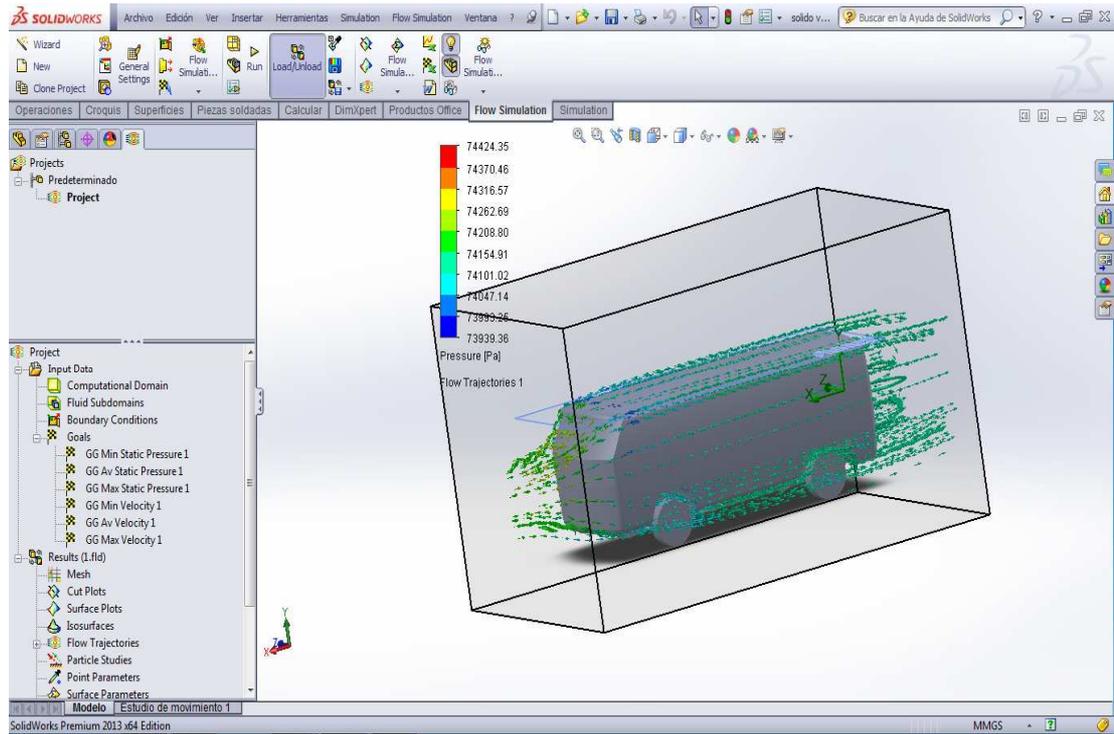
Paso 4



Paso 5



Paso 6



Paso 7

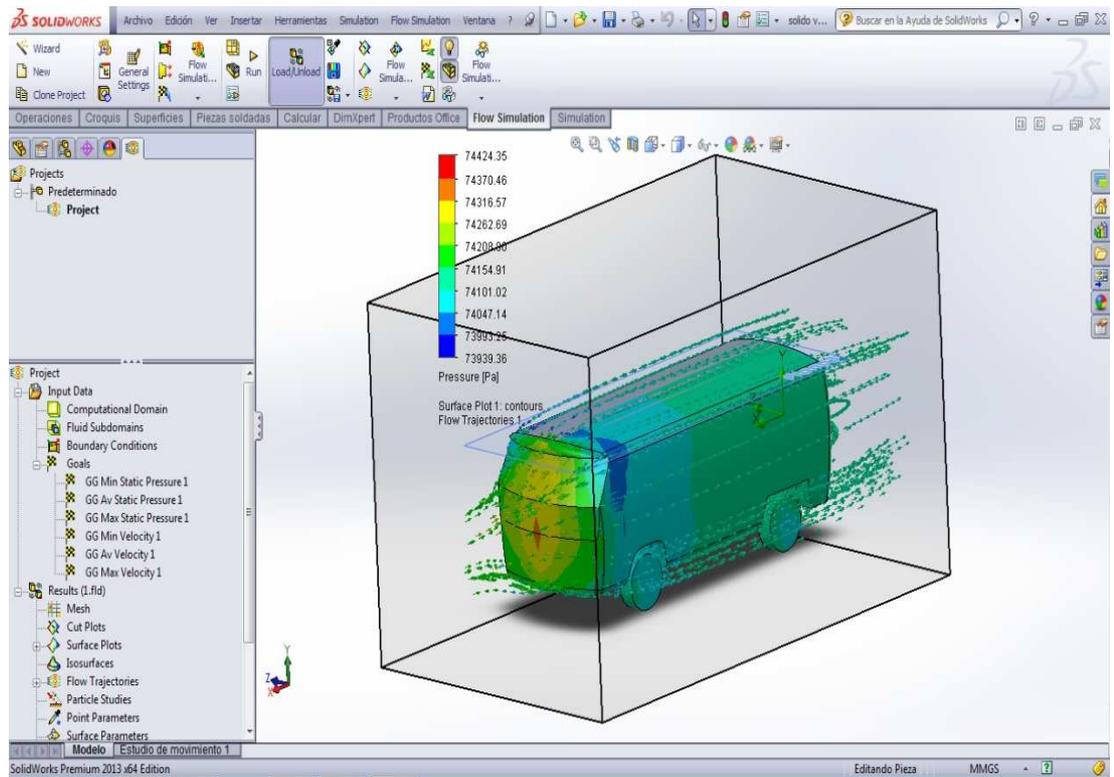
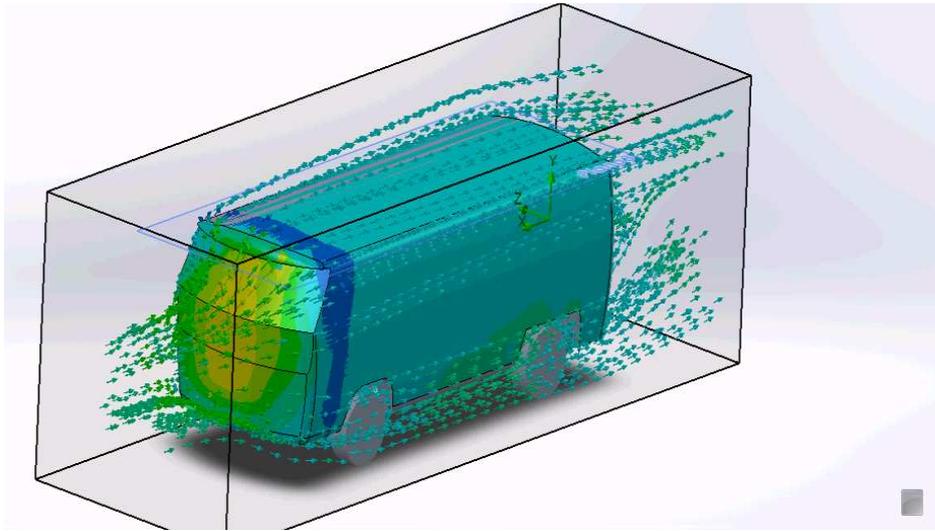


Figura 49. Volkswagen Combi



Fuente: Software Solidwork

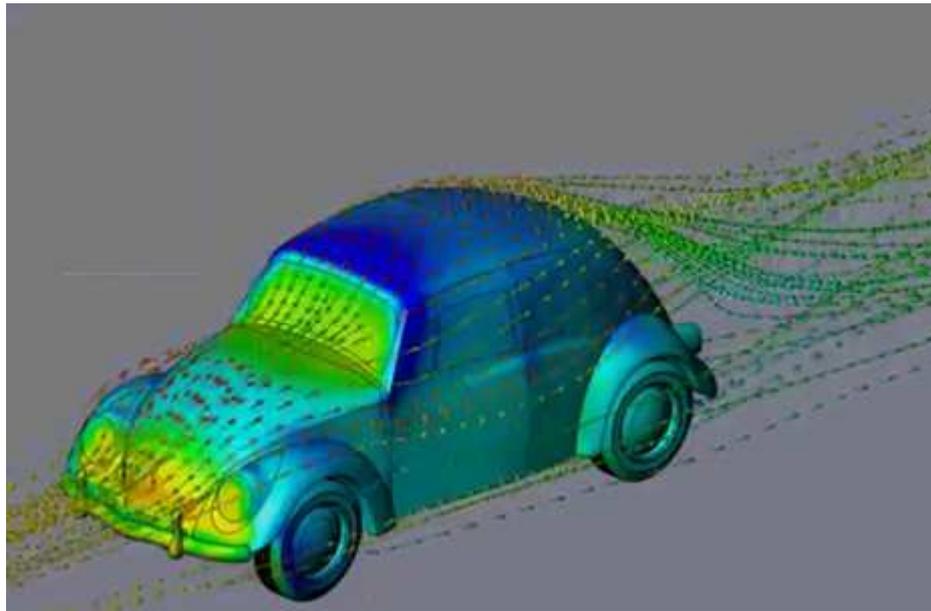
Datos Obtenidos:

Tabla 9. Cálculos obtenidos VW Combi.

Name	Minimum	Maximum
Pressure [Pa]	74012.24	74302.92
Temperature [K]	297.95	298.11
Density [kg/m³]	0.86	0.87
Velocity [m/s]	0	18.556
Velocity (X) [m/s]	-16.178	4.302
Velocity (Y) [m/s]	-9.949	10.259
Velocity (Z) [m/s]	-13.134	13.462
Temperature (Fluid) [K]	297.95	298.11
Mach Number	0	0.05
Vorticity [1/s]	6.490	2835.320
Shear Stress [Pa]	0	1.74
Relative Pressure [Pa]	-97.04	193.64

Fuente: Software Solidwork

Figura 50. Volkswagen Escarabajo



Fuente: Software Solidwork

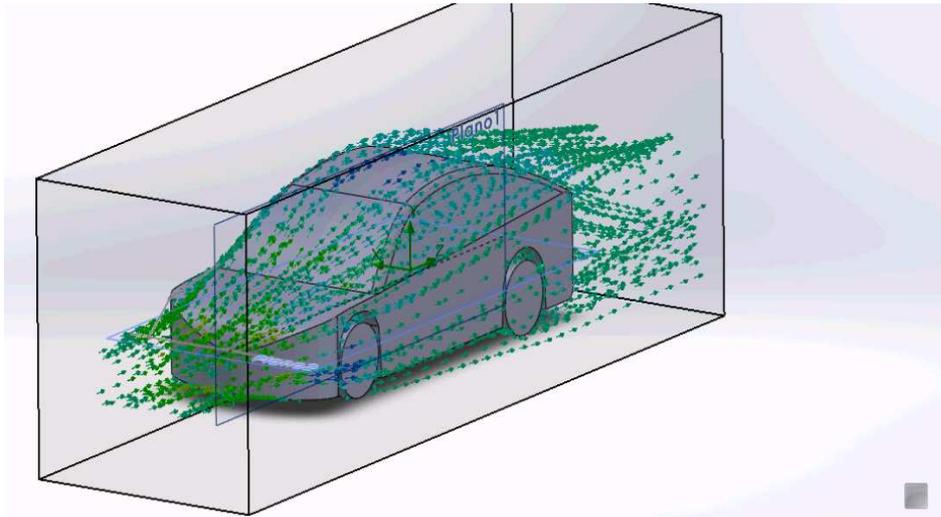
DatosObtenidos:

Tabla 10. Datos obtenidos VW Escarabajo

Name	Minimum	Maximum
Pressure [Pa]	74040.35	74271.03
Temperature [K]	286.89	287.11
Density [kg/m³]	0.89	0.89
Velocity [m/s]	0	17.970
Velocity (X) [m/s]	-17.793	4.645
Velocity (Y) [m/s]	-9.523	11.781
Velocity (Z) [m/s]	-14.542	13.445
Temperature (Fluid) [K]	286.89	287.11
Mach Number []	0	0.06
Vorticity [1/s]	2.815	1534.213
Shear Stress [Pa]	4.59e-005	0.30
Relative Pressure [Pa]	-2.89	4.14

Fuente: Software Solidwork

Figura 51. Ford Focus Rally



Fuente: Software Solidwork

Datos Obtenidos:

Tabla 11. Datos obtenidos Ford Focus Rally

Name	Minimum	Maximum
Pressure [Pa]	74052.44	74211.13
Temperature [K]	286.98	287.11
Density [kg/m³]	0.90	0.90
Velocity [m/s]	0	16.945
Velocity (X) [m/s]	-10.035	9.713
Velocity (Y) [m/s]	-6.082	7.847
Velocity (Z) [m/s]	-3.275	16.187
Temperature (Fluid) [K]	286.98	287.11
Mach Number []	0	0.05
Vorticity [1/s]	3.565	3978.005
Shear Stress [Pa]	0	1.04
Relative Pressure [Pa]	-56.84	101.85

Fuente: Software Solidwork

5.4 Costos

A continuación vamos a indicar los gastos surgidos durante la elaboración de la tesis haciendo constar los gastos directos, indirectos y el gasto total de todo el diseño y construcción del túnel de viento.

5.4.1 Costos directos

Tabla 12. Costos directos

Cant	Descripción	p.unit	p.total
1	Anemómetro	750	750
1	Estructura ventilador	150	150
2	Sensores carga/sustentación y resistencia	150	300
1	Generador de humo	70	70
1	Motor eléctrico trifásico 1HP	120	120
45	Pernos	0,60	27
2	Acrílico	60	120
2	Resina	10	20
2	Bancadas	100	200
1	Circuito electrónico	600	600
30	Tela fibra de vidrio	5	150
1	Variador de frecuencia	300	300
1	Ventilador	120	120
		Total	2927

5.4.2 Costos indirectos

Tabla 13. Costos indirectos

Descripción	p.unit	p.total
Gastos varios (pegas, pintura, transporte, etc.)	300	300
Internet	50	50
Copias	100	100
	TOTAL	450

5.4.3 Costo total

Tabla 14. Costo total

Costos directos	Costos indirectos	Total
2927	450	3377

CAPÍTULO VI

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Mediante el análisis del Túnel de Viento y los datos obtenidos de los diferentes modelos en estudio se ha determinado las siguientes conclusiones:

Se consiguió diseñar y construir un Túnel de Viento para el estudio de la aerodinámica en el área de automotriz.

Se puede determinar que con el diseño y construcción del Túnel de Viento se consiguió una herramienta interactiva que facilita el estudio y la comprensión del comportamiento aerodinámico en el campo automotriz

Se observó que los tres modelos de vehículos a escala (Ford Focus Rally, Volkswagen Escarabajo y Volkswagen Combi), fueron de gran ayuda para el estudio aerodinámico en el campo automotriz.

Se determinó que en el modelo Ford Focus Rally en estudio, a altas velocidades consigue un mayor agarre a la calzada lo cual se conoce como efecto suelo, ya que es un modelo que se encuentra diseñado con elementos aerodinámicos (alergones, bumpers, entradas de aire, faldones y spoilers, etc.).

En el modelo Volkswagen Combi se determina que a mayor velocidad este tiende a levantarse lo cual pierde el denominado efecto suelo, por lo que es un modelo que no posee elementos aerodinámicos.

Se pudo observar que la trayectoria del viento es distinta en los modelos de prueba por las formas aerodinámicas que poseen cada uno de ellos.

Por el punto antes mencionado se pudo observar que en el Volkswagen Combi, al momento de entrar en contacto con la línea de flujo de viento se dispersan a los lados lo cual hace que el flujo sea turbulento y que el vehículo tenga mayor resistencia al avance.

Por otra parte el modelo Ford Focus Rally al momento de entrar en contacto con el flujo de viento se observa que tiene un flujo continuo por lo que este modelo tiene menor resistencia al avance.

El comportamiento aerodinámico en los vehículos está directamente relacionado con su rendimiento, estabilidad, adherencia a la calzada y con el consumo de combustible.

Se puede determinar que a medida que el modelo de prueba sea más aerodinámico las fuerzas que actúan en él disminuyen.

6.2 Recomendaciones

Leer el manual de usuario antes de iniciar con el funcionamiento del túnel de viento para que no exista ningún inconveniente y sea un éxito las prácticas a realizar.

Revisar que las instalaciones eléctricas estén correctas antes de encender el túnel de viento.

Observar que no exista ningún artículo en el interior del túnel de viento.

Ubicar el túnel de viento de tal manera que no tenga obstrucción de viento por la entrada y salida del mismo.

Resetear el circuito para cada una de la toma nueva de datos para que no existan datos erróneos.

Esperar un tiempo prudente hasta que los datos se estabilicen y no tomar en cuenta los primeros datos que nos da el circuito.

Aplicar el túnel de viento para complementar los conocimientos impartidos en el área de aerodinámica, mecánica de fluidos, soldadura, electrónica y diseño de elementos en la Escuela de Ingeniería Automotriz de la ESPOCH.

BIBLIOGRAFÍA

- ALFARO, Heraclio. 2010.** idr. [En línea] 26 de 11 de 2010.
http://www.idr.upm.es/aerodinamica/pdf/X%20Conf%20H%20Alfaro_%20J%20Meseguer.pdf.
- Caranddriverthef1. 1999.**caranddriverthef1. [En línea] 1999.
<http://www.caranddriverthef1.com/formula1/articulos/2007/06/01/principios-y-propiedades-basicas..>
- DULHOSTE, Jean-Francois. 2013.** webdelprofesor. [En línea] 2013
http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/cramirez/documentos/MF_Tema_5_Analisis_dimensional_y_semejanza.pdf.
- F1 ruedas sobre el asfalto. 2012.** f1ruedassobreelasfalto. [En línea] 2012.
<http://314jyj.foroactivo.com/t41-tecnica-en-formula-1-la-aerodinamica-objetivos..>
- GARCÍA, Alberto. 2006.** Numero de reynolds. *Hidráulica: prácticas de laboratorio*. Valencia : Ed. Univ. Politéc, 2006, págs. 71-73.
- KRAUSHAAR, William. 1972.** Efecto venturi. *Introducción al estudio de la mecánica, materia y ondas*. Esoaña : Reverte, 1972, pág. 606.
- MARÍN, Víctor. 2013.** eia. [En línea] 2013.
<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/flujodegases/tuneldeviento/tuneldeviento.html..>
- MENDOZA, Juan José. 2008.** monografias. [En línea] 2008.
<http://www.monografias.com/trabajos66/teoremas-bernoulli-torricelli/teoremas-bernoulli-torricelli.shtml> .
- MORALES, Armando. 2004.** Capa limite. *Mecánica de Fluidos: Antecedentes Y Actualidad*. Merida : UADY, 2004, pág. 39.
- MOTT, Robert. 1996.** Flujo laminar. *Mecánica de fluidos aplicada*. Mexico : Pretice Hall hispanoamericana S.A., 1996, pág. 219.
- NEGRETE, Valera. 2005.** Flujo turbulento. *Apuntes de Fisica General*. Mexico : UNAM, 2005, pág. 233.
- POTTER, David. 2002.** books.google. [En línea] 2002.
http://books.google.com.ec/books?id=ZZvumhtvdcoC&pg=PA311&lpg=PA311&dq=gradientes+de+presion+adverso&source=bl&ots=YIQS2NaZfS&sig=gLl8Y0IOp5EzDTUMukinjXOpX4w&hl=es&sa=X&ei=gaheUoiAE4rLkQe_v4HYDg&ved=0CD0Q6AEwAw#v=onepage&q=gradientes%20de%20presion%20adve.
- TARIFA, Enrique Eduardo.2013.** econ.unicen. [En línea] 2013.
http://www.econ.unicen.edu.ar/attachments/1051_TecnicasIISimulacion.pdf.