



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS CARRERA DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ

TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ

TEMA:

**IMPLEMENTACIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO PARA VEHÍCULOS A
ESCALA 1:18**

AUTORES:

**OTAVALO CUAICAL JOSÉ GABRIEL
QUILCA YACELGA ESTEBAN RIGOBERTO**

DIRECTOR: ING. CARLOS NOLASCO MAFLA YÉPEZ, MSc.

IBARRA, JULIO 2022

CERTIFICADO

ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

En mi calidad de director del plan de trabajo de grado, previo a la obtención del título de Ingeniería en Mantenimiento Automotriz, nombrado por el Honorable Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas.

CERTIFICO:

Que una vez analizado el plan de grado cuyo título es: **“Implementación de un túnel de viento para vehículos a escala 1:18”** presentado por los señores: **Otavalo Cuaical José Gabriel** con número de cédula 040185529-1 y **Quilca Yacelga Esteban Rigoberto** con número de cédula 100402813-8, doy fe que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a presentación pública y evaluación por parte de los señores integrantes del jurado examinador que se designe.

En la ciudad de Ibarra, a los 30 días del mes de agosto del 2022.

Atentamente,



Ing. Carlos Nolasco Mafla Yépez MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	040185529-1		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Otavalo Cuaical José Gabriel		
DIRECCIÓN:	Priorato 4 esquinas antigua vía Aloburo		
EMAIL:	jgotavaloc@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0993598659
DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	100402813-8		
APELLIDOS Y NOMBRES	Quilca Yacelga Esteban Rigoberto		
DIRECCIÓN:	Urcuquí - Tumbabiro		
EMAIL:	erquilcay@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	062 934 229	TELÉFONO MÓVIL:	0980520679
DATOS DE LA OBRA			
TÍTULO:	IMPLEMENTACIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO PARA VEHÍCULOS A ESCALA 1:18		
AUTOR (ES):	Otavalo Cuaical José Gabriel Quilca Yacelga Esteban Rigoberto		
FECHA:	30 de agosto del 2022		
SÓLO PARA TRABAJOS DE GRADO			
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSTGRADO		
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ		
ASESOR / DIRECTOR:	Ing. Carlos Nolasco Mafla Yépez MSc.		

2. CONSTANCIAS

Los autores manifiestan que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos del autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que son los titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asumen la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrán en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 02 días del mes de septiembre del 2022

AUTORES:



Firma

Otavalo Cuaical José Gabriel

040185529-1



Firma

Quilca Yacelga Esteban Rigoberto

100402813-8

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico a mis padres, María Cuaical y José Otavalo, a mi mamá, por su apoyo constante durante toda la etapa de estudios con sus llamadas, regaños y consejos, a mi padre que a pesar de que ya no se encuentra en este mundo supo educar a un hijo con los mejores valores y sobre todo a ser humilde. Gracias papá, por tus consejos y anécdotas de experiencia.

A mi hermana por sus consejos y ánimos para alcanzar mis metas, gracias hermanita por tu apoyo incondicional

Gabriel Otavalo

Este trabajo de investigación lo dedico con mucho cariño a mis padres Fausto Quilca y Teresa Yacelga, quienes me brindaron su apoyo incondicional durante el transcurso de mi carrera universitaria, me motivaron a seguir adelante, a ser mejor cada día, a luchar por mis sueños, me enseñaron que con sacrificio y dedicación se logra alcanzar las metas que uno se propone.

A mis hermanos por estar presentes en los momentos difíciles, acompañándome a lo largo de este proceso para lograr culminar con éxito mis estudios. A mis sobrinos por ser fuentes de inspiración para superarme y no rendirme ante las adversidades.

Esteban Quilca

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios por ayudarme en cada momento donde más lo necesité y por ser la base de guía para llegar a culminar una etapa más de mi vida. A mi mamá María Cuaical por enseñarme a nunca darme por vencido aun sabiendo la dificultad que puede conllevar un problema. Gracias mami por tus regaños y tu insistencia, todo por mi bien como usted siempre me lo dijo.

A la Universidad Técnica del Norte por abrirme sus puertas para aprender y formarme como profesional. A mis maestros, gracias por impartir su conocimiento hacia mí, compartir experiencia que fue fundamental para formar a un buen profesional con valores éticos y profesionales.

Gabriel Otavalo

Agradezco a Dios por la salud, la vida, por ser mi guía en estos años, por haberme dado la fortaleza, la perseverancia para alcanzar mis objetivos. A mis padres, por inculcarme desde muy pequeño valores que me permitieron crecer como ser humano, por ese apoyo incondicional que me brindaron en cada una de las decisiones que tomaba, por creer y confiar siempre en mí. A mis hermanos y sobrinos por ayudarme y motivarme siempre. A la Universidad Técnica del Norte, por darme la dicha de convertirme en un profesional, a los docentes de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Automotriz, por los conocimientos transmitidos a lo largo de estos años.

Esteban Quilca

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	xvi
ABSTRACT	xvii
INTRODUCCIÓN	xviii
CAPÍTULO I	1
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo general	2
1.3.2 Objetivos específicos	2
1.4 Alcance	3
1.5 Justificación	4
1.6 Túnel de viento	5
1.6.1 Funcionamiento	6
1.6.2 Clasificación	7
1.6.3 Componentes del túnel de viento	10
1.7 Aerodinámica vehicular	11
1.7.1 Tipos de flujo	12
1.8 Aerodinámica	13
1.8.1 Teorema de Bernoulli	14
1.8.2 Efecto Venturi	15
1.8.3 Fuerzas aerodinámicas	16
1.9 Coeficientes aerodinámicos	19
1.9.1 Coeficiente de sustentación (c_l o c_z)	19
1.9.2 Coeficiente de resistencia o arrastre (c_d o c_x)	20

CAPÍTULO II	21
2. MATERIALES Y MÉTODOS	21
2.1 Materiales	21
2.1.1 Tubos cuadrados	22
2.1.2 Vidrio	22
2.1.3 Madera flexible	23
2.2 Materiales eléctricos y electrónicos	24
2.2.1 Arduino mega	25
2.2.2 Módulo Relé	26
2.2.3 Sensor de presión diferencial MPX10DP	26
2.2.4 TriacQ4015	27
2.2.5 Sensor de temperatura y humedad DHT11	28
2.2.6 Anemómetro	29
2.2.7 Optoacoplador MOC3010	29
2.2.8 Máquina de humo	30
2.2.9 Ventilador	31
2.3 Método	31
2.3.1 Referencias bibliográficas	33
2.3.2 Tipo de túnel de viento a construir	33
2.3.3 Condiciones del túnel de viento	34
2.3.4 Condiciones de la dirección del viento en el interior del túnel	35
2.3.5 Secciones del túnel de viento	36
2.3.6 Velocidad del viento	36
2.4 Dimensiones del túnel de viento	37
2.5 Selección del ventilador	50
2.5.1 Caudal requerido por el ventilador	51
CAPÍTULO III	53
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
3.1 Comparación de simulación	53
3.2 Diseño de túnel de viento	54
3.3 Simulación	58

3.3.1 Etapas de simulación	58
3.4 Construcción del túnel de viento	63
3.4.1 Base del túnel de viento	63
3.4.2 Difusor de entrada de aire	64
3.4.3 Cámara de análisis	65
3.4.4 Difusor de salida de aire	66
3.4.5 Instalación eléctrica y electrónica	66
3.5 Validación de instrumentos de medición con la simulación	71
3.5.1 Instrucciones de funcionamiento del túnel de viento	75
3.5.2 Análisis de resistencia aerodinámica	77
3.5.3 Cálculos de coeficientes aerodinámicos	80
3.5.4 Análisis de potencia necesaria para vencer la resistencia aerodinámica	89
3.5.5 Análisis de pruebas en vehículos	93
3.5.6 Discusión de resultados	100
CAPÍTULO IV	103
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	103
4.1 Conclusiones	103
4.2 Recomendaciones	105
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
ANEXOS	111

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA NÚM.	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
2.1	Alternativas para la selección del túnel de viento	34
2.2	Alternativas en función de la complejidad de implementación	35
2.3	Dimensiones del diseño A	38
2.4	Dimensiones del diseño B	41
2.5	Dimensiones del diseño C	43
2.6	Dimensiones del diseño D	46
2.7	Dimensiones del diseño E	48
3.1	Cuadro de resultados de cada simulación	54
3.2	Parámetros de simulación	59
3.3	Resultados de la simulación	62
3.4	Funcionamiento de controles de operación	73
3.5	Velocidad del ventilador	73
3.6	Pasos para manipular el túnel de viento	75
3.7	Incidencia Cx según la forma trasera del vehículo	80
3.8	Coefficientes aerodinámicos	87
3.9	Resultados de potencia necesaria para vencer la resistencia	92
3.10	Resultados de pruebas al vehículo N° 1	95
3.11	Resultados de pruebas al vehículo N° 2	98
3.12	Resultados de pruebas al vehículo N° 3	100
3.13	Costos de material para la construcción del túnel de viento	102

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA NÚM.	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
1.1	Túnel de viento de un vehículo AUDI	6
1.2	Funcionamiento de un túnel de viento en un vehículo	7
1.3	Circulación abierta de un túnel de viento	7
1.4	Circulación cerrada de un túnel de viento	8
1.5	Túnel de viento vertical	9
1.6	Túnel de viento horizontal	10
1.7	Componentes de un túnel de viento	10
1.8	Flujos de aire alrededor de un vehículo	11
1.9	Flujo uniforme alrededor de un vehículo	12
1.10	Flujo turbulento alrededor de un vehículo	13
1.11	Efectos de la aerodinámica	13
1.12	Teorema de Bernoulli	14
1.13	Efecto Venturi	15
1.14	Fuerzas aerodinámicas	16
1.15	Fuerza de sustentación	17
1.16	Fuerza de resistencia o arrastre	18
2.1	Diagrama de los materiales	21
2.2	Tubos	22
2.3	Vidrio	23
2.4	Madera flexible	24
2.5	Diagrama elementos eléctricos y electrónicos	24
2.6	Arduino Mega	25
2.7	Módulo Relé	26
2.8	Sensor de presión diferencial MPX10DP	27
2.9	Triac Q4015	28
2.10	Sensor de temperatura y humedad DHT11	28
2.11	Anemómetro	29
2.12	Optoacoplador Moc 310	30
2.13	Cámara de humo	31
2.14	Flujograma de desarrollo	32
2.15	Secciones del túnel de viento	36
2.16	Dimensiones del túnel de viento A	38
2.17	Velocidad del túnel de viento diseño A	39
2.18	Presión del túnel de viento diseño A	39
2.19	Intensidad de turbulencia en túnel de viento diseño A	40
2.20	Dimensiones del túnel de viento B	41
2.21	Velocidad del túnel de viento diseño B	41
2.22	Presión del túnel de viento diseño B	42
2.23	Intensidad de turbulencia del túnel de viento diseño B	42

2.24	Dimensiones del túnel de viento diseño C	43
2.25	Velocidad del túnel de viento diseño C	44
2.26	Presión del túnel de viento diseño C	44
2.27	Intensidad de turbulencia del túnel de viento diseño C	45
2.28	Dimensiones del túnel de viento diseño D	46
2.29	Velocidad del túnel de viento diseño D	46
2.30	Presión del túnel de viento diseño D	47
2.31	Intensidad de turbulencia del túnel de viento diseño D	47
2.32	Dimensiones del túnel de viento diseño E	48
2.33	Velocidad del túnel de viento diseño E	49
2.34	Presión del túnel de viento diseño E	49
2.35	Intensidad de turbulencia del túnel de viento diseño E	50
2.36	Ventilador marca MAXX	51
3.1	Diseño a construir del túnel de viento	56
3.2	Distribución de peso	57
3.3	Prototipo del túnel de viento del diseño C	57
3.4	Cuadro de selección de sistema de unidades	59
3.5	Cuadro de selección de fluidos a intervenir	60
3.6	Cuadro de parámetros de presión y velocidad	60
3.7	Diseño del túnel de viento de ciclo abierto	61
3.8	Construcción del túnel de viento	63
3.9	Base del túnel de viento	64
3.10	Difusor entrada de aire	64
3.11	Cámara de análisis	65
3.12	Difusor salida de aire	66
3.13	Diagrama de instalación electrónica	67
3.14	Flujograma electrónico	68
3.15	Panel frontal de control	69
3.16	Panel de bloques	70
3.17	Simulación con velocidad a escala	71
3.18	Túnel de viento concluido	72
3.19	Formas traseras usuales de los vehículos	79
3.20	Influencia aerodinámica del C_x según su parte trasera	79
3.21	Propiedades del aire	81
3.22	Fuerza de arrastre – Vehículo N°1	82
3.23	Área del vehículo – Vehículo N°1	82
3.24	Fuerza de arrastre – Vehículo N°2	83
3.25	Área del vehículo – Vehículo N°2	84
3.26	Fuerza de arrastre – Vehículo N°3	85
3.27	Área del vehículo – Vehículo N°3	86
3.28	Prueba a 100 km/h – Vehículo N°1	94
3.29	Prueba a 150 km/h – Vehículo N°1	94
3.30	Prueba a 200 km/h – Vehículo N°1	95

3.31	Prueba a 100 km/h – Vehículo N°2	96
3.32	Prueba a 150 km/h – Vehículo N°2	96
3.33	Prueba a 200 km/h – Vehículo N°2	97
3.34	Prueba a 100 km/h – Vehículo N°3	98
3.35	Prueba a 150 km/h – Vehículo N°3	99
3.36	Prueba a 200 km/h – Vehículo N°3	99

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN NÚM.	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
1.1	Bernoulli	15
1.2	Fuerza de sustentación	17
1.3	Fuerza de resistencia o arrastre	18
1.4	Coeficiente de sustentación (c_l o c_z)	19
1.5	Coeficiente de resistencia o arrastre (c_d o c_x)	20
2.1	Velocidad del vehículo	37
2.2	Caudal del ventilador	51
3.1	Match	54
3.2	Cálculos de coeficientes aerodinámicos	80
3.3	Potencia para vencer la resistencia aerodinámica	90

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO NÚM.	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
1.	Planos del túnel de viento	112
2.	Elaboración del difusor de entrada del túnel de viento	113
3.	Elaboración del difusor de salida del túnel de viento	113
4.	Conexiones de sensores	114
5.	Conexiones eléctricas y electrónicas	114
6.	Esquema eléctrico de la placa	115
7.	Circuito realizado en baquelita	116
8.	Túnel de viento	116

RESUMEN

El presente estudio muestra la implementación de un túnel de viento para vehículos a escala 1:18 del tipo circuito abierto empleando la técnica de aspirado. La elección de este tipo de túnel se efectuó debido a los bajos costos que conllevó a su construcción. El objetivo principal de su fabricación radicó en la necesidad de estudiar la aerodinámica de los automóviles, de conocer los principios físicos, el comportamiento del flujo del aire al circular sobre cuerpos sólidos, donde influye mucho la velocidad y la forma de cada uno de ellos. Por otra parte, la construcción de este prototipo se encontró sustentado en planos que se obtuvieron previo a un diseño y simulaciones realizadas en el programa asistido por computadora SolidWorks. La programación electrónica se realizó mediante el Software computacional LabVIEW y Arduino respectivamente. Ambos software fueron los encargados de monitorear y controlar todo el sistema electrónico de la maqueta a través del computador. Otro de los aspectos importantes en el presente estudio fue la selección del ventilador, pues cumple con la función de generar y hacer circular el fluido (aire) por el interior del túnel, pasando por la sección de la cámara de análisis velocidades de 1 a 5 m/s, siendo estas las velocidades mínimas y máximas que proporcionó el ventilador. Las pruebas realizadas con el túnel de viento permitieron validar los resultados obtenidos en las simulaciones y de igual manera facilitaron los datos necesarios para realizar el cálculo del coeficiente aerodinámico (C_x) de cada uno de los modelos escala, obteniendo como resultado un mayor C_x para el vehículo N°1 y un menor C_x para el vehículo N°3. Además, se realizó un análisis para determinar si el flujo de aire que se generó alrededor de las carrocerías de los automóviles a escala es del tipo laminar, semi laminar o turbulento y a través de esos ensayos se estableció el diseño con una mejor aerodinámica, una mayor estabilidad y eficiencia, logrando comprender que la optimización en el diseño de los vehículos es uno de los puntos claves de la industria automotriz.

ABSTRACT

The present study shows the implementation of a wind tunnel for vehicles at a scale of 1:18 in an open circuit type using the vacuum technique. The choice of this type of tunnel was made due to the low costs involved in its construction. The main objective of its manufacture was based on the need to study the aerodynamics of automobiles, to know the physical principles, the behavior of the air flow when circulating over solid bodies, where the speed and shape of each one of them greatly influences. On the other hand, this prototype was supported by plans that were obtained prior to a design and simulations carried out in the SolidWorks computer-assisted program. The electronic programming was carried out using the LabVIEW and Arduino computer software, respectively. Both of these software was in charge of monitoring and controlling the entire electronic system of the model through the computer. Other important aspect in this current study was the selection of the fan, owing to it fulfills the function of generating and circulating the fluid (air) inside the tunnel, through the section of the analysis chamber with minimum and maximum speeds of 1 to 5 m/s, indicated by the fan. The tests carried out with the wind tunnel allowed to validate the results obtained in the simulations and they provided the necessary data in the same way to calculate the aerodynamic coefficient (C_x) of each one of the scale models, obtaining as a result a greater C_x for vehicle No. 1 and a lower C_x for vehicle No. 3. In addition, an analysis was carried out to determine if the air flow that was generated around the car at a scale is laminar, semi-laminar or turbulent type and through these tests the design was established with better aerodynamics, greater stability and efficiency achieving the understanding of optimization of vehicle design as one of the key terms at automotive industry.

INTRODUCCIÓN

A través del tiempo en varias universidades y fabricantes de automóviles se han llevado a cabo distintas investigaciones y diferentes construcciones de túneles de viento para la ejecución de pruebas preliminares de nuevos modelos. Para el caso en específico del Ecuador existen túneles de viento realizados a escala que se encuentran instalados en los laboratorios de estudios de fluidos tanto de la Escuela Politécnica Nacional y la Escuela Politécnica del Ejército, donde se puede visualizar de una mejor manera el comportamiento del aire sobre elementos aerodinámicos (Morquecho, 2017, pág. 23).

Al trabajar con un software de elementos finitos que permita realizar la simulación para la validación del túnel se puede obtener datos muy relevantes como son las líneas de flujo, coeficiente de arrastre, sustentación y contornos de presión, siendo así que un vehículo que tiene un coeficiente aerodinámico pequeño conserva un flujo laminar de aire, lo que genera menor resistencia al avance (Martínez, 2018, pág. 2).

Los parámetros más relevantes para la construcción de un túnel de viento son la velocidad del viento y complejidad de diseño, siendo un ciclo cerrado la mejor opción para utilizar, además es importante realizar una simulación en un software que cumpla con las características suficientes de una adecuada simulación (Bermeo, Siguencia, & Serpa, 2012, pág. 1). Al realizar simulaciones numéricas de las propiedades aerodinámicas de los vehículos, el dominio de simulación utilizado es a menudo, una caja grande con una relación de bloqueo muy baja y un plano de tierra totalmente móvil, que replica las condiciones de la carretera abierta (Orozco, 2006, pág. 26).

Los elementos principales para el diseño y simulación del túnel de viento están divididos en diferentes secciones tales como: una sección de contracción, la cual se encarga de direccionar el movimiento del aire, así como una sección de ensayos que cuenta con sensores y por último una sección de filtración (Bustillos & Zambrano, 2018, pág. 21).

CAPÍTULO I

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 ANTECEDENTES

Se le denomina de esta forma al Túnel de viento, el cual permite realizar pruebas con las cuales se ha ido revolucionando los diseños de los vehículos basándose principalmente en la propiedad aerodinámica de estos. Permitiendo estudiar varios comportamientos que se relacionan con la aerodinámica, como suelen ser por ejemplo; flujos de aire que afectan al vehículo, fuerzas que se generan al ir en contracorriente, que al momento de poder analizarlos de manera conveniente o correcta se puede lograr generar datos que permitan verificar qué tan eficiente es el vehículo motor en ese momento y cómo se puede llegar a mejorar su eficiencia mediante estas pruebas que se realizan dentro del túnel de viento.

Principalmente, la función de este túnel es forzar el paso de aire por encima del vehículo que se encuentra estático, es así como se verifica qué tan resistente al paso de aire puede ser y también beneficia para el conocimiento de elementos adicionales que se suele implantar a los vehículos como pueden llegar a ser los faldones, alerones que cumplen la función de dar mejor sujeción hacia el piso. Uno de los postulados más interesantes fue expuesto en 1738 por el matemático y físico holandés Daniel Bernoulli y enuncia que se produce una disminución de la presión de un fluido (líquido o gas) en movimiento cuando aumenta su velocidad (Padilla, 2015, pág. 3).

Lo que principalmente se explica con este teorema es que no hay un intercambio de energía con el entorno o en otras palabras con el exterior sin que haya un elemento que permita realizar este intercambio como puede ser por ejemplo: un motor. Por lo que este fluido ya sea líquido o gas tienden a permanecer constante a lo largo de una línea de avance, dando así un aumento en la velocidad y al mismo tiempo una disminución de presión.

Esto se refleja en las pruebas que se realizan en un túnel de viento, al aumentar la velocidad del líquido o gas hacia el vehículo que permanece prácticamente estático hace que el fluido lo rodee permitiendo que se produzca un movimiento de los gases y de los efectos que se producen sobre el cuerpo con el que trabajan.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El diseño complejo de vehículos modernos, el desarrollo de nuevos productos es un proceso laborioso (Orozco, 2006, pág. 30). Conforme siga creciendo la demanda de vehículos modernos se tendrá que estudiar más profundamente el diseño, lo que viene siendo muy problemático debido a la gran cantidad de variables que se aplican para el proceso de recopilación de datos en la aerodinámica de un vehículo. Los diseñadores tienen un trabajo mucho más difícil al tratar de comprender y establecer respuestas para los problemas y al mismo tiempo la demanda para las grandes empresas puede llevar a conflictos principalmente económicos.

Los vehículos tienden a generar problemas cuando se desplazan por vías que permiten alcanzar grandes velocidades en donde entra en juego todos los aspectos mencionados anteriormente como son: estabilidad, confort, seguridad, diseño, y demás. Se debe a que al desplazarse los vehículos tienen una interacción directa con el aire que permite que se llegue a generar flujos que producen inconvenientes. En el proceso se produce el flujo externo e interno en el cual, el externo se da por el paso de aire en la superficie exterior del vehículo que genera una fricción con el aire a grandes velocidades, y la interna como resultado del trabajo que se realiza por el aire que pasa por el motor.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

- Implementar mediante simulaciones y métodos matemáticos un túnel de viento para vehículos a escala 1:18 en base a los ensayos que se realizarán en los tipos de software.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Adquirir un ventilador con un preciso caudal de trabajo para realizar las pruebas correspondientes a los vehículos a escala.

- Validar los instrumentos de medición del túnel de viento por medio de los resultados obtenidos en simulación computacional.
- Calcular el coeficiente aerodinámico de los vehículos más comercializados en la ciudad de Ibarra.

1.4 ALCANCE

El túnel de viento diseñado y posteriormente construido será un banco de ensayos aerodinámicos para vehículos livianos a escala 1:18 el mismo estará compuesto por difusores, cámara de aire, generador de humo, ventilador, instrumentos de medición, estructura y cableado eléctrico, que son las partes principales de este sistema.

El diseño del túnel de viento y los modelados 3D de los automóviles se realizan utilizando el programa asistido por computadora CAD SOLIDWORKS, se utilizará la licencia de este software adquirido por la universidad.

Los modelos de los autos virtuales representarán únicamente la carrocería externa del auto que estarán realizados con el objetivo de ser impresos en 3D, para ensayos aerodinámicos implementando el túnel de viento y para la simulación por medio dinámico computacional. Por esto es importante resaltar que estos modelos no se podrán utilizar para otro tipo de aplicaciones por ejemplo renderizados, visualización de componentes internos, moldes, simulación de estructurales, simulación de mecanismos automotrices, planimetrías entre otras.

El diseño virtual final del túnel de viento debe ser de bajo costo, de fácil construcción y ensamblaje, lo más liviano posible, compacto, resistente y durable el mismo que debe ser revisado y aprobado por el tutor del proyecto antes de su fabricación. Para la construcción se solicitará el uso de los laboratorios o talleres necesarios de la universidad para poder tener acceso y usar las máquinas para su producción. En el caso de no tener acceso a los laboratorios o que no dispongan de equipos, herramientas, software, impresoras 3D o cualquier suministro necesario para realizar el proyecto se buscará proveedores externos fuera de la universidad. Todo el proceso de construcción del túnel de viento será realizado y costado por los autores o tesisistas de esta investigación.

Para la simulación se utilizarán los tipos de software SOLIDWORKS, FLOW SIMULATION y ANSYS FLUENT utilizando licencias adquiridas fuera de la universidad. Una vez realizado los ensayos en el túnel de viento se deberá validar los resultados obtenidos con simulación computacional de los modelos de autos analizados. Se contrastarán los resultados por medio de modelos estadísticos para verificar el porcentaje de error que existe. Para que la investigación sea verídica el error deberá ser menor del 30%, en el caso de que el error sea mayor al 30% se realizará un análisis de los factores que pudieran afectar la precisión de los resultados como puede ser la calibración e instalación de los equipos de medición, el correcto funcionamiento de los equipos de medición, el buen funcionamiento del software de simulación, entre otros factores, para corregir el error estimado.

1.5 JUSTIFICACIÓN

Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021-Toda una Vida el cual en el objetivo 5 menciona: Impulsar la productividad y competitividad para el crecimiento económico sustentable de manera redistributiva y solidaria y mediante la política 5.3 argumenta lo siguiente: Promover la investigación, la formación, la capacitación, el desarrollo y la transferencia tecnológica, la innovación y el emprendimiento, en articulación con las necesidades sociales, para impulsar el cambio de la matriz productiva (Senplades, 2017, pág. 80).

En la actualidad la mejora en el aspecto del diseño automotriz ha ido evolucionando, por tal razón el estudio de la aerodinámica dentro de este campo es de suma importancia principalmente en aspectos como son la seguridad y el confort para los ocupantes del vehículo. Cada año las empresas que llevan la posta dentro del comercio de vehículos mejoran estos aspectos técnicos en los productos que desarrollan, pero hay también otras empresas que están por detrás de las demás y que no se enfocan en lo que es el desarrollo del diseño, es por este motivo que en nuestro medio nos hemos orientado a la construcción de un túnel de viento que ayude a probar que tan eficientes son este tipo de vehículos motorizados y que tan seguros llegan a ser para las personas.

Las marcas que se comercializan dentro del país no cuentan con todo lo requerido para un uso eficiente, estudiar la aerodinámica de algunas de ellas en escala 1:18 ayuda a obtener información relevante de cómo se podría llegar a mejorar dentro del aspecto de diseño y

también ayudar a mantener un índice adecuado para evitar accidentes y daños por elevadas velocidades que es el término principal para investigar dentro de las pruebas que se van a realizar.

Dentro del desarrollo del túnel de viento se llegará a verificar como el viento afecta a la estabilidad del vehículo automotor y de igual forma cual es la resistencia que ejerce al ir a cierta velocidad de prueba, recalando que todos los análisis a los vehículos van a ser de forma estática. Esto debido a que va enfocado para ayudar a generar conocimientos hacia los estudiantes de manera más práctica llegando a ser entendible y también como recurso para próximos proyectos dentro de la Institución.

Siendo un punto beneficioso el llegar a obtener una fuente tecnológica que ayude ampliar la rama de la Ingeniería Automotriz con una posible implementación de laboratorios de acuerdo al tema realizado y las investigaciones obtenidas con las pruebas hacia los vehículos a escala que lleguen a generar Ingenieros con mayor capacidad de desarrollo en el aspecto laboral y puntos fuertes en el diseño de los vehículos con respecto a la aerodinámica.

A lo que se desea llegar con esta investigación es a poder implantar todo lo obtenido en los vehículos a escala y pueda ser llevado a vehículos reales, generando también una ayuda hacia el medio ambiente al realizar todas las prácticas de forma estática, sin contaminar el ambiente y evitando riesgo o accidentes al realizarlos de forma dinámica o en movimiento que en nuestro medio es muy difícil ya que no se cuenta con la tecnología adecuada para implementar en un vehículo este tipo de pruebas en movimiento, siendo así un punto a favor para la construcción de un túnel de viento a escala para la Institución.

1.6 TÚNEL DE VIENTO

El túnel de viento es una herramienta de investigación experimental desarrollada para simular los efectos del movimiento de un fluido (aire) alrededor de cuerpos sólidos en una situación real (Andrade & Gómez, 2017, pág. 18). En la automoción, el desempeño aerodinámico se encuentra estrechamente relacionado con el rendimiento y estabilidad, siendo fundamental para la reducción del consumo de combustible. Por lo tanto, las diferentes investigaciones realizadas en túneles de viento han concluido que son el método

más eficiente para el desarrollo de estudios aerodinámicos en vehículos (Blanco, 2011, pág. 42).



Figura 1.1 Túnel de viento de un vehículo AUDI
(García, 2015)

En la Figura 1.1 se observa un túnel de viento de un vehículo en el cual se puede observar el comportamiento y las reacciones de un cuerpo, con el fin de obtener resultados más reales. Estos cuerpos pueden ser modelados a una escala reducida o pueden mantener su escala real (Morquecho, 2017, pág. 17).

1.6.1 FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento de un túnel de viento consiste en impulsar o succionar aire del ambiente a través de un ducto, alrededor de un modelo estacionario de distinta geometría, con el fin de alcanzar una velocidad específica y un patrón de flujo predeterminado en un instante dado. Este flujo de aire debe mantenerse constante tanto en magnitud como en dirección (Ruiz & Curicama, 2013, pág. 19). Bustillos y Zambrano (2018), mencionan que existen diferentes maneras de analizar el aire que se mueve sobre el modelo inmóvil. Tal es el caso del humo o el tinte, donde se pueden colocar aditivos de diferentes colores con el fin de mejorar la observación de los efectos que causan, o unir hilos al modelo para mostrar cómo se mueve el aire.

En la automoción, el túnel de viento es un instrumento que estudia las líneas de flujo que se produce cuando el aire incide sobre un modelo vehicular, y de esta manera poder analizar la formación de flujos turbulentos en las zonas donde la aerodinámica de este modelo sea menos favorable (Padilla, 2015, pág.25).



Figura 1.2 Funcionamiento de un túnel de viento en un vehículo
(Alamy, 2020)

En la Figura 1.2 se aprecia de una manera más clara la manera como es el funcionamiento del túnel de viento, el cual se basa en el “Efecto Venturi”, donde la velocidad de flujo aumentará y la presión disminuirá cuando pase por una sección más pequeña que la sección anterior (Andrade & Gómez, 2017, pág. 5).

1.6.2 CLASIFICACIÓN

Los túneles de viento se clasifican según sus diferentes características, entre las más comunes se encuentran la circulación, velocidad y dirección de flujo.

1.6.2.1 Circulación de flujo

- **Circulación abierta**

En la circulación abierta, el flujo (aire) es soplado o aspirado directamente del ambiente, en una dirección esencialmente recta, para luego salir del túnel hacia la atmósfera (Arroyo, 2016, pág 4).

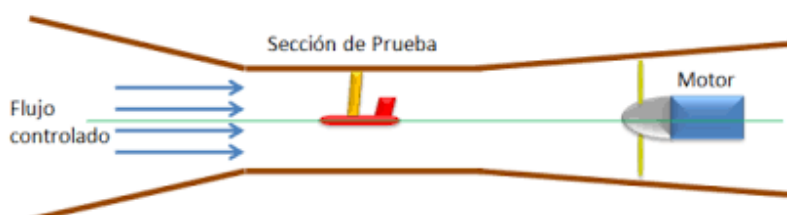


Figura 1.3 Circulación abierta de un túnel de viento
(Landázuri, 2016, pág. 26)

En la Figura 1.3 se observa la circulación abierta del túnel de viento, el cual puede tener dos tipos de circulación abierta: la aspirada y soplada y se diferencian por la ubicación de ventilador, ya que el uno se encuentra en la entrada y el otro en la salida (Landázuri, 2016, pág. 25).

- **Circulación cerrada**

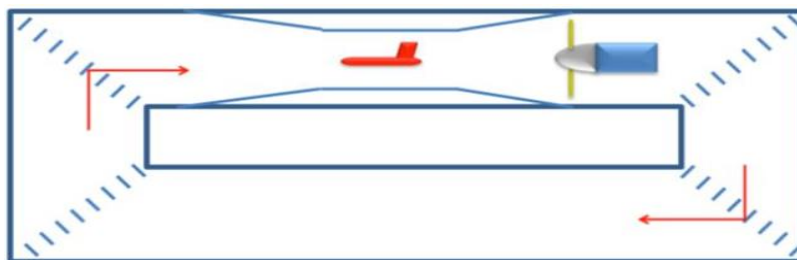


Figura 1.4 Circulación cerrada de un túnel de viento
(Landázuri, 2016, pág. 26)

La Figura 1.4 muestra la circulación cerrada, donde el flujo (aire) es obligado a circular en forma indefinida al interior del túnel, es decir que recircula continuamente con poco o ningún intercambio de aire con el exterior (Morquecho, 2017, pág.44).

1.6.2.2 Velocidad de flujo en su interior

- **Túnel subsónico**

Los túneles de viento subsónicos son túneles de baja velocidad, donde el aire puede ser considerado como incompresible. Son utilizados para operaciones en bajo número Mach (parámetro adimensional que relaciona la velocidad del flujo con la velocidad del sonido local en fluidos en el mismo estado), es decir con velocidades de hasta 400km/h ($M \leq 0.3$). Por lo general, este túnel en la sección de prueba permite simular algunos de los fenómenos que suceden en la tierra (Arango & Yepes, 2014, pág. 39).

- **Túnel transónico**

Los túneles transónicos tienen los mismos principios que los túneles subsónicos con la diferencia de que estos alcanzan grandes velocidades, llegando en la sección de prueba muy

cerca a la velocidad del sonido (Landázuri, 2016, pág. 25). El flujo transónico tiene una medida de $(0.75 < M < 1.2)$.

1.6.2.3 Dirección de flujo

- **Túnel de viento vertical**

El túnel de viento vertical es el que tiene un movimiento hacia arriba, en donde la gravedad será recompensada con la velocidad del flujo de aire en la cámara superior.



Figura 1.5 Túnel de viento vertical
(Landázuri, 2016, pág. 27)

La Figura 1.5 representa la estructura de un túnel de viento vertical al cual generalmente, se lo conoce como cámara de vuelo, ya que el cuerpo se queda suspendido y simula una caída libre a una velocidad superior a 195 km/h (Landázuri, 2016, pág. 27).

- **Túnel de viento horizontal**

El túnel de viento horizontal es donde el flujo de aire se efectúa horizontalmente, siendo el más usado en el campo de la automoción. Este tipo de túneles puede alcanzar distintas velocidades desde subsónicas a hipersónicas (Bermeo et al., 2012, pág. 10).

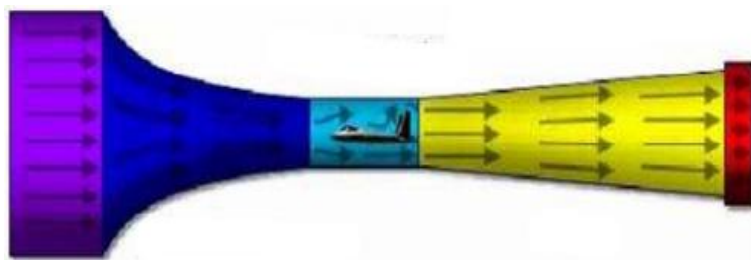


Figura 1.6 Túnel de viento horizontal
(AERODINÁMICA, 2010)

En la Figura 1.6 se aprecia la estructura de un túnel de viento horizontal, donde el flujo de aire es horizontalmente en el túnel.

1.6.3 COMPONENTES DEL TÚNEL DE VIENTO

El túnel de viento del tipo circuito abierto se encuentra estructurado por cinco componentes esenciales que facilitan el estudio de los efectos del aire.

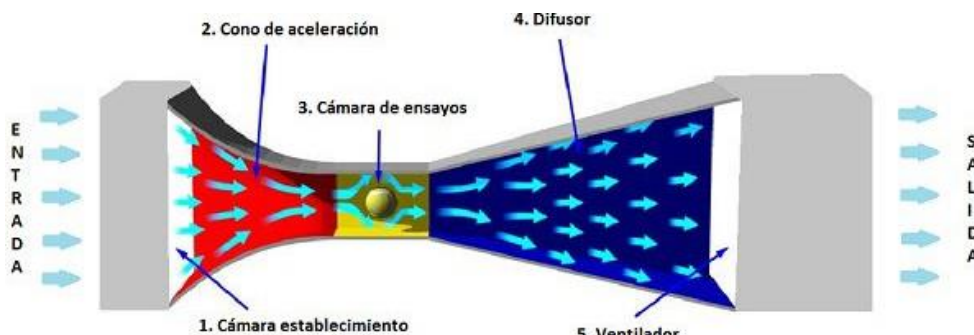


Figura 1.7 Componentes de un túnel de viento
(Landázuri, 2016, pág. 31)

En la Figura 1.7 se visualiza los principales componentes de un túnel de viento, mismos que se detallan a continuación.

- **Cámara de establecimiento:** Se encarga de enderezar y uniformizar el flujo de aire para que este entre de forma laminar y pueda permitir el estudio del aire.
- **Cono de aceleración:** En ella se acelera la velocidad del flujo de aire por medio de una reducción de área, e intenta mantenerlo ordenado y uniforme para su llegada a la cámara de ensayos.

- **Cámara de ensayos:** Es el lugar donde se coloca el modelo a estudiar, de igual manera, allí se realizarán las mediciones. Así mismo, el flujo que la atraviese debe ser lo más uniforme posible.
- **Difusor:** Es el encargado de reducir la velocidad del flujo mediante su perfil divergente.
- **Ventilador:** Su función es crear un flujo de aire a una velocidad determinada.

1.7 AERODINÁMICA VEHICULAR

Según Blanco (2011), la aerodinámica vehicular estudia los efectos que influye el aire sobre un vehículo en movimiento. La finalidad de la dinámica vehicular es que dichos efectos sean lo más favorables posible.

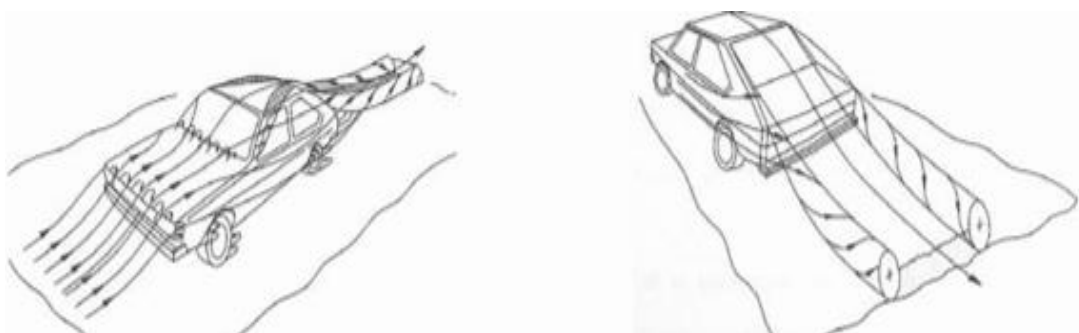


Figura 1.8 Flujos de aire alrededor de un vehículo
(Mora, 2016, pág. 13)

En la Figura 1.8 se visualiza los dos grupos de efectos asociados a dos flujos diferentes de aire: flujo de aire externo y flujo de aire interno.

- **Flujo de aire externo:** Este flujo interviene sobre las superficies exteriores del vehículo, generando áreas de presión o depresión y rozamiento viscoso con las paredes.
- **Flujo de aire interno:** Este flujo viene exigida por la refrigeración del motor y la aireación dentro del vehículo. Por un lado, la refrigeración del motor ha adquirido

mayor importancia en el proceso de diseño debido al aumento y mejora en la potencia de los motores, mejora del tamaño del motor, entre otras.

1.7.1 TIPOS DE FLUJO

Hoy en día los diferentes tipos de vehículo abordan varios problemas aerodinámicos, siendo la reducción de la resistencia el principal problema. Sin embargo, otros factores como la proximidad al suelo, dimensiones y formas del vehículo crean un diferente campo de flujo alrededor de este (Mott, 2017, pág. 120).

- **Flujo uniforme**

El flujo uniforme es cuando las partículas se mueven a lo largo de trayectorias uniformes en capas o láminas, deslizándose suavemente una capa sobre la adyacente.

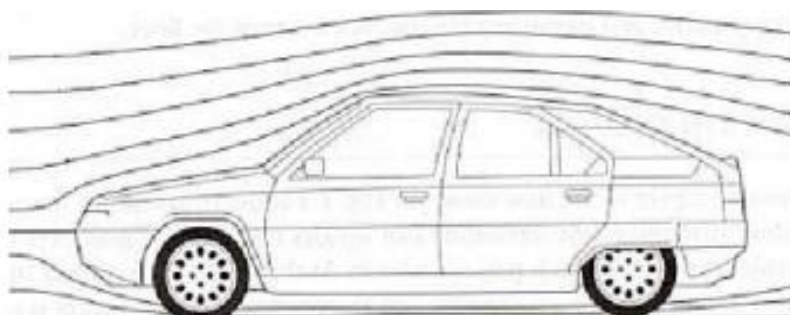


Figura 1.9 Flujo uniforme alrededor de un vehículo
(Blanco, 2011, pág. 57)

La Figura 1.9 muestra el flujo uniforme alrededor de un vehículo, cuya velocidad del fluido en cualquier punto no cambia con el tiempo, siendo la ley de Newton de la viscosidad la que rige el flujo laminar. En ciertas ocasiones, el flujo laminar no es estable debido a que existe combinaciones con baja viscosidad, alta velocidad o grandes caudales, por lo que se transforma en un flujo turbulento (Blanco, 2011, pág. 57).

- **Flujo turbulento**

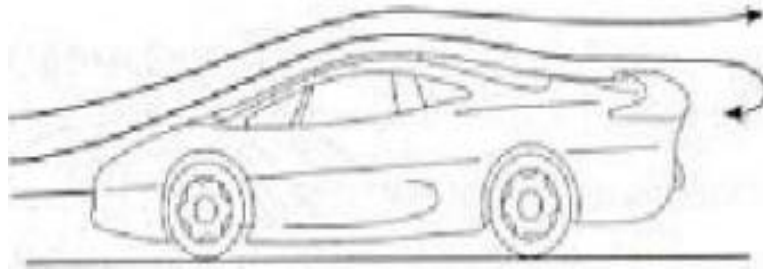


Figura 1.10 Flujo turbulento alrededor de un vehículo
(Blanco, 2011, pág. 58)

En la Figura 1.10 se evidencia el flujo turbulento alrededor de un vehículo, este flujo es el más frecuente en las aplicaciones prácticas en el cual las partículas del fluido se mueven en trayectorias anormales, produciendo una cantidad de intercambio de movimiento de una porción del fluido a otra.

1.8 AERODINÁMICA

Según Nostrud (2008), la aerodinámica es una de las ramas más complejas de la ingeniería, siendo de gran significancia en el estudio de mecánica de fluidos en el campo de automoción y aviación.

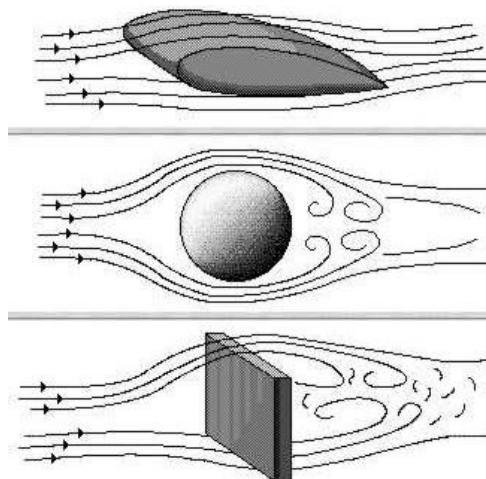


Figura 1.11 Efectos de la aerodinámica
(Mora, 2016, pág. 6)

La Figura 1.11 indica los efectos de la aerodinámica, la cual estudia las acciones que actúan sobre un cuerpo cuando existe un movimiento de aire u otros fluidos gaseosos, y de las

fuerzas que actúan sobre este cuerpo y que se mueven en dichos fluidos (Serway, 2012, pág. 71). En otras palabras, es la encargada de estudiar los efectos que aparecen en un cuerpo al ser introducido en una corriente de aire (Mora, 2016, pág. 15).

1.8.1 TEOREMA DE BERNOULLI

El Teorema de Bernoulli data del siglo XVIII, donde el físico - matemático suizo Daniel Bernoulli estableció en su tratado “Hidrodinámica” la relación que existe entre la presión y la velocidad en el movimiento de un fluido por una tubería (Riaño, 2020, pág. 76). Es decir, este teorema relaciona el aumento de la velocidad de flujo de un fluido (líquido o gas) con la disminución de la presión, y viceversa, la disminución de velocidad con el aumento de la presión (Mott, 2017, pág. 3).

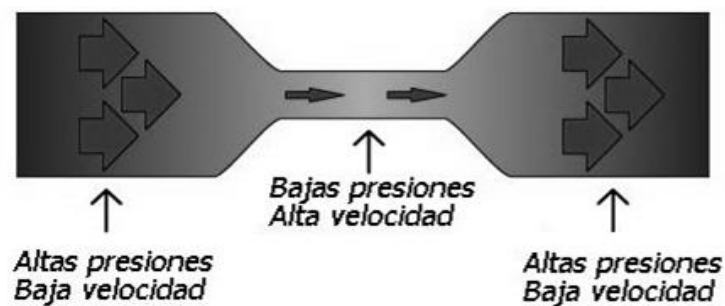


Figura 1.12 Teorema de Bernoulli

(Riaño, 2020, pág. 77)

De igual manera, el teorema asevera que la energía de un fluido en cualquier momento (líquido o gas), consta de tres componentes:

1. **Cinético:** Referencia a la velocidad que posee un fluido.
2. **Potencial gravitacional:** Relacionada con la altitud que posee un fluido.
3. **De presión:** Energía debido a la presión que tiene el fluido.

- **Bernoulli**

La ecuación de Bernoulli es la más relevante en dinámica de fluidos ya que indica el comportamiento cualitativo del movimiento del fluido. Esto es denominado “Efecto Venturi”.

$$\frac{V^2 \rho}{2} + P + \rho g z = k \quad [1.1]$$

Donde:

V = Velocidad del fluido.

P = Presión del fluido.

k = Constante.

ρ = Densidad del fluido.

g = Aceleración gravitatoria.

z = Altura en la dirección de la gravedad.

En la ecuación, la suma de las tres energías es constante, por lo cual, si un componente varía, debe existir un cambio en alguno de los otros dos componentes para mantener la constancia (Connor, 2019).

1.8.2 EFECTO VENTURI

El “Efecto Venturi”, denominado así por el físico italiano Giovanni Battista Venturi, es uno de los estudios de mayor interés práctico del teorema de Bernoulli y de las consecuencias derivadas de su ecuación de balance energético.

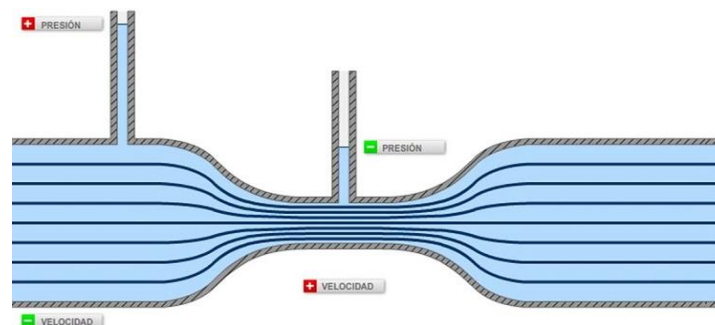


Figura 1.13 Efecto Venturi
(Salinas & Gutierrez, 2020, pág. 22)

La Figura 1.13 muestra el efecto Venturi, el cual trata sobre la consecuencia que tiene el movimiento de un fluido dentro de un conducto cerrado, determinando que cuando existe un aumento de la velocidad al pasar por una zona de sección menor del conducto, la presión del fluido disminuye (Salinas & Gutierrez, 2020, pág. 23).

1.8.3 FUERZAS AERODINÁMICAS

Según Padilla (2015), todo cuerpo que se encuentra inmerso en un fluido experimenta efectos por la interacción resultante entre ambos.

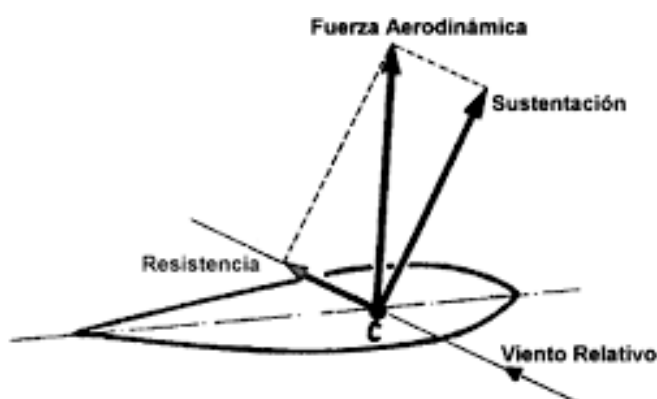


Figura 1.14 Fuerzas aerodinámicas
(Fraija, 2006, pág. 67)

La Figura 1.14 indica las tres fuerzas aerodinámicas que existen en la automoción tales como: la fuerza de sustentación, resistencia o arrastre y lateral.

1.8.3.1 Fuerza de sustentación

Es la fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido, de dirección perpendicular a la de la velocidad de la corriente incidente (McBeath, 2011, pág. 20).

Esta fuerza resulta más fácil de medir y calcular a diferencia de la resistencia, existiendo razones como: siempre la sustentación va a depender de las presiones generadas sobre el cuerpo, donde si el flujo se encuentra adherido, este se podrá determinar de manera sencilla, utilizando modelos matemáticos en los que se pueda omitir la viscosidad.

Esta fuerza se encuentra dada por la siguiente fórmula:

$$F_z = \frac{1}{2} (\rho C_z A_f V^2) \quad [1.2]$$

Donde:

A_f = Área frontal del vehículo.

V = Velocidad del viento.

ρ = Densidad del aire.

C_z = Coeficiente de sustentación aerodinámico.

En los vehículos al estar en movimiento, surge una fuerza de sustentación la cual va a reducir la carga que soportan los ejes de este, por lo que el vehículo tratará de separarse del suelo, conllevando a efectos negativos en el comportamiento dinámico (Mora, 2016, pág. 22). En sí, esto se origina cuando el aire que pasa por debajo de un objeto pasa más lentamente, por lo tanto, hay una mayor presión que por encima, debido a esto el cuerpo vence la fuerza de la gravedad, pudiendo elevarse del suelo (Padilla, 2015, pág 8).

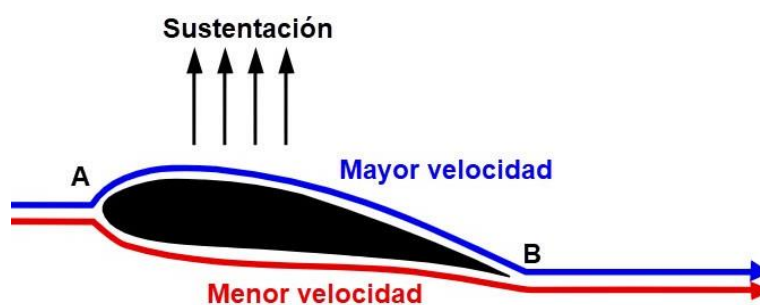


Figura 1.15 Fuerza de sustentación
(Mora, 2016, pág. 21)

Para que el vehículo presente una adecuada estabilidad en altas velocidades el reparto de las fuerzas de sustentación de los ejes delanteros y traseros deben ser igual al reparto del peso del vehículo como se muestra en la Figura 1.15 (Mora, 2016, pág. 22).

1.8.3.2 Fuerza de resistencia o arrastre

Es la fuerza que ejerce un fluido sobre un cuerpo en la dirección del flujo. De las tres fuerzas (sustentación, resistencia y lateral), esta es la que más se opone al desplazamiento de un cuerpo (McBeath, 2011, pág. 18).

Esta fuerza se encuentra dada por la siguiente fórmula:

$$F_x = \frac{1}{2}(\rho C_x A_f V^2) \quad [1.3]$$

Donde:

A_f = Área frontal del vehículo.

V = Velocidad del viento.

ρ = Densidad del aire.

C_x = Coeficiente de arrastre aerodinámico.

En los vehículos, la fuerza de resistencia es la que hay que vencer para que este se deslice sin tener en cuenta el rozamiento con el suelo. El componente mayor de resistencia en un vehículo se debe a la necesidad de desplazar el aire y a las diferencias de presión que lo provocan. Es decir, la fuerza de resistencia la provoca la necesidad de apartar de delante y reposicionar detrás del vehículo todo el volumen de aire que está traspasando.



Figura 1.16 Fuerza de resistencia o arrastre
(Artés, 2020)

En la Figura 1.16 se muestra la fuerza de resistencia o arrastre en la que se origina un efecto de succión fuerte cuando más rápido va el vehículo, debido a que se produce una importante

diferencia de presión entre la parte frontal del coche (donde choca con el aire) y la parte posterior del coche (Artés, 2020).

1.9 COEFICIENTES AERODINÁMICOS

Los coeficientes aerodinámicos son números adimensionales empleados en el estudio aerodinámico de diferentes campos de ingeniería y está determinado por las fuerzas y momentos que sufre un cuerpo en movimiento en el seno del aire, cuantificando características aerodinámicas (Martinez, 2018, pág. 8).

1.9.1 COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN (CL O CZ)

El coeficiente de sustentación trata sobre el componente vertical de fuerzas que no influye teóricamente sobre la resistencia al avance pero que afectan directamente a la estabilidad (Rolón, Villamizar, & Acevedo, 2017, pág. 11).

Este coeficiente se encuentra dado por la siguiente fórmula:

$$C_z = \frac{F_z}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_f} \quad [1.4]$$

Donde:

C_z = Coeficiente de sustentación.

V^2 = Velocidad del viento.

ρ = Densidad del aire.

A_f = Área del vehículo.

F_z = Fuerza de sustentación.

En los vehículos el coeficiente indica la tendencia de la carrocería a elevarse o a incrementar su presión contra el suelo.

1.9.2 COEFICIENTE DE RESISTENCIA O ARRASTRE (CD O CX)

El coeficiente de resistencia o arrastre se determina mediante ensayos realizados en túneles de viento. Dicho coeficiente varía dentro de un amplio rango y depende especialmente de la forma superficial.

Este coeficiente se encuentra dado por la siguiente fórmula:

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_f} \quad [1.5]$$

Donde:

C_x = Coeficiente de arrastre.

V^2 = Velocidad del aire.

ρ = Densidad del aire.

A_f = Superficie frontal de referencia del vehículo.

F_x = Fuerza de arrastre.

En los vehículos este coeficiente influye específicamente en la resistencia aerodinámica, es decir, determina como influye la forma del vehículo en la resistencia que presenta el aire al avance de este. El coeficiente de arrastre C_x es independiente del tamaño del vehículo, de su masa y de cualquier otra magnitud medible de los automóviles, por tal razón su carácter adimensional (Blanco, 2011, pág. 70).

CAPÍTULO II

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En el capítulo descrito anteriormente se dio a conocer cada uno de los componentes que forman parte del túnel de viento, mientras que en este apartado se establecen los materiales utilizados, además de la importancia que tiene cada material en la construcción del prototipo de túnel de viento, para reducir las pérdidas por efectos del mismo y poder llegar a las velocidades solicitadas.

2.1 MATERIALES

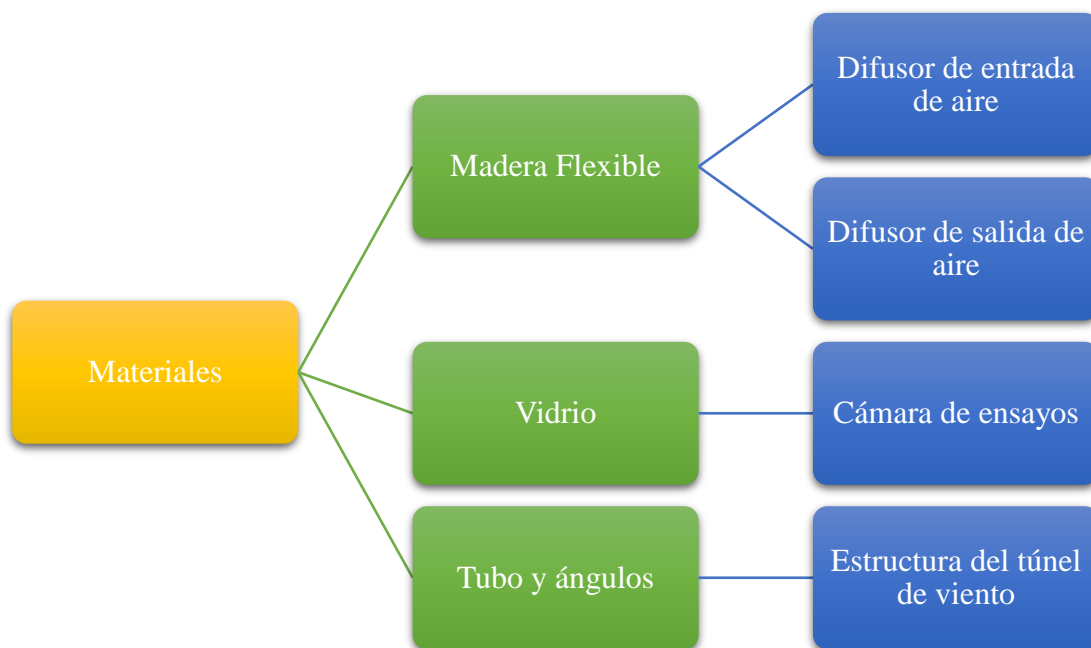


Figura 2.1 Diagrama de los materiales

En la Figura 2.1 se detalla cada uno de los materiales que fueron seleccionados para la construcción de las diferentes partes del prototipo túnel de viento, con el fin de que sea lo más compacto posible sin que sufra ninguna alteración durante su funcionamiento.

2.1.1 TUBOS CUADRADOS

Los tubos cuadrados pueden ser fabricados por materiales como el aluminio, el acero y el hierro, siendo este uno de los más utilizados gracias a sus propiedades de tenacidad. Este tipo de tubos generalmente son utilizados en elementos estructurales, cerrajería, auxiliar del automóvil y también en la fabricación de maquinaria y equipos.

Características físicas:

- Espesor: desde 1 mm hasta 3 mm.
- Longitud máx. 500 mm.
- Longitud mín. 10.000 mm.



Figura 2.2 Tubos

La Figura 2.2 muestra los tubos que fueron empleados para la construcción de toda la estructura general que constituye el túnel de viento, esto gracias a que presenta una facilidad de corte, una soldadura más fácil, un modelado y mecanizado moderado, también por su coste y su fácil adquisición en el mercado.

2.1.2 VIDRIO

Es un material inorgánico que no se encuentra bien determinado o regulado ya que es un material transparente, amorfo, frágil y duro. El uso frecuente que se le da al vidrio es para la fabricación de botellas, puertas, ventanas entre otros.



Figura 2.3 Vidrio

La Figura 2.3 muestra el vidrio que se utilizó para fabricar la sección de pruebas, pues la adaptación del vidrio a la forma deseada lo hace perfecto, los costos son relativamente bajos y su lugar de obtención es fácil, una característica importante que tiene este tipo de material es la de ser transparente facilitando de esta manera observar el comportamiento de los elementos de estudio como los vehículos a escala.

2.1.3 MADERA FLEXIBLE

La madera es un material liviano que posee una relación elevada entre su resistencia y peso, considerada también como una de las materias primas más explotadas por el ser humano. En cuanto a la flexibilidad en la madera se puede decir que es la capacidad que tiene al doblarse y regresar a su forma o estado inicial sin sufrir alteraciones permanentes. Este tipo de material por lo general es utilizado en la industria papelera.

Propiedades mecánicas de la madera

- Resistencia.
- Tracción.
- Compresión.
- Flexión.
- Elasticidad.



Figura 2.4 Madera flexible

La Figura 2.4 indica el tipo de madera que se utilizó para la construcción de las superficies que forman parte del difusor de entrada y salida de aire, esto debido a que permiten doblarse o ser curvadas en sentido longitudinal, sin riesgo a romperse, también debido al peso que puede llevar el adquirir otro material para la construcción, además de su bajo costo.

2.2 MATERIALES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS

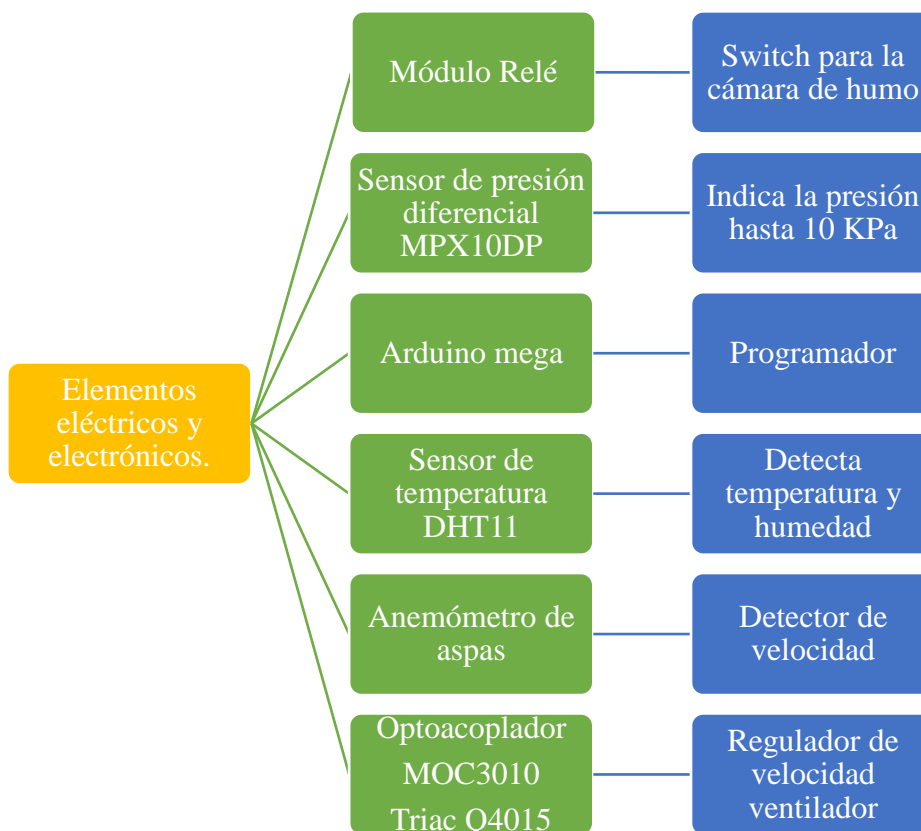


Figura 2.5 Diagrama elementos eléctricos y electrónicos

El diagrama de la Figura 2.5, muestra los diferentes materiales utilizados en la construcción del prototipo túnel de viento tales como: Arduino, sensores, Relé, entre otros.

2.2.1 ARDUINO MEGA

El Arduino Mega es una placa electrónica que posee varios pines de entrada y salida análogos y digitales a más de un puerto USB. Esta placa electrónica posee características de ser una placa robusta y muy potente, que cuenta con una amplia capacidad de memoria para programación y se encuentra construida con un microcontrolador de 8 bits.

Características:

- Microcontrolador ATmega2560.
- Voltaje de entrada: 7-12V.
- Voltaje operativo: 12V.
- Pines digitales de entrada/salida: 54 (14 de ellos son salidas PWM).
- Entradas análogas: 16.
- Velocidad del reloj: 16Mhz.

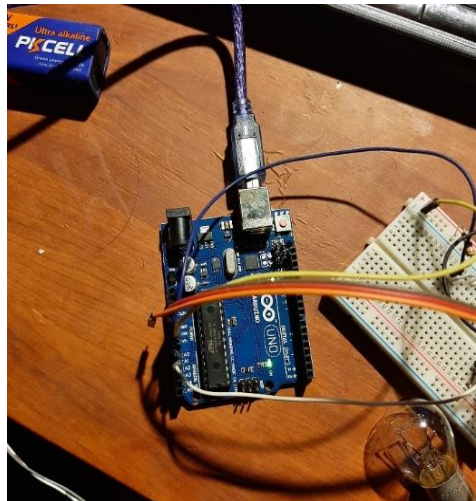


Figura 2.6 Arduino Mega

Esta placa se utilizó en la parte electrónica del túnel de viento, para ejecutar las acciones correspondientes en función a la programación realizada en el software Arduino, esto mediante la comunicación que se establece a través de un cable USB entre la tarjeta Arduino y la computadora como se muestra en la Figura 2.6.

2.2.2 MÓDULO RELÉ

Básicamente se trata de una placa en donde se encuentran uno o algunos relés junto a un circuito de optoacopladores a fin de aislar las señales de control del circuito que alimenta las bobinas (Arrieta, 2019).

Características:

- Voltaje de operación: 5V DC.
- N° de relays (canales): 2 CH.
- Corriente máx: 10A (NO), 5A (NC).
- Indicadores LED de activación.



Figura 2.7 Módulo Relé

La Figura 2.7 representa el módulo Relé, el cual se lo utilizó para controlar el encendido y apagado de la cámara de humo, actuando como interruptor mecánico que se activa cuando se genera un campo magnético por el paso de una pequeña corriente y se desactiva cuando la corriente deja de circular por el circuito.

2.2.3 SENSOR DE PRESIÓN DIFERENCIAL MPX10DP

El sensor MPX10DP, es un sensor de presión piezo-resistivo de silicio que entrega una salida de voltaje muy precisa y lineal directamente proporcional a la presión aplicada. Debido a sus características estos sensores de presión diferencial también pueden ser utilizados para medir las caídas de presión, niveles de caudales y fluidos.

Características:

- Voltaje de operación: 3V – 6V.
- Corriente de operación: 6Ma.
- Rango de presión diferencial: 0 KPa – 10 KPa.
- Temperatura de operación: - 40 °C – 125 °C.



Figura 2.8 Sensor de presión diferencial MPX10DP

La Figura 2.8 muestra el sensor de presión diferencial que se instaló en la cámara de análisis para medir la presión que se genera dentro del túnel, esto mediante una variación de señal que varía en función de la velocidad del flujo de aire que circula en el interior del túnel, es decir que la variación será directamente proporcional a la velocidad del flujo de aire.

2.2.4 TRIACQ4015

Triac Q4015 se le denomina a un componente electrónico que consta de tres terminales cuya función principal es controlar la corriente. En términos comunes un Triac sirve para controlar una corriente alterna, simulando ser un interruptor e incluso en algunos casos se utiliza como un Relé.

Características:

- Corriente hasta 15 amperios.
- Voltaje apagado hasta 400 voltios.
- Voltaje de activación de 2,5 V.
- Corriente para activación 50 mA.

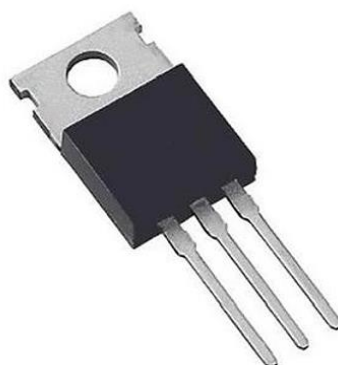


Figura 2.9 Triac Q4015

En la Figura 2.9 se aprecia el Triac Q4015 utilizado en la elaboración del prototipo de túnel de viento, este elemento se lo empleó como un interruptor conectado a la cámara de humo permitiendo prender y apagar según sean los requerimientos, se lo hace para tener el control en su solo dispositivo.

2.2.5 SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD DHT11

El DHT11 es un sensor que permite medir la temperatura y humedad, este es un sensor digital que posee un termistor y un sensor capacitivo, capaces de medir el aire a su alrededor y a su vez mostrar los datos a través de una señal digital.

Características:

- Rango de medición de temperatura de 0 a 50 °C.
- Voltaje de 3V – 5V DC.
- Rango de medición de humedad 20% hasta 90%.

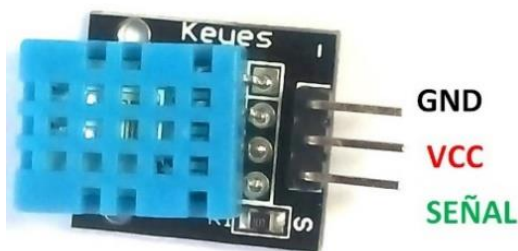


Figura 2.10 Sensor de temperatura y humedad DHT11

La Figura 2.10 muestra el sensor utilizado para detectar la temperatura y la humedad en el interior del túnel, específicamente en la cámara de análisis con el fin de medir la temperatura a la cual los vehículos realizan las pruebas aerodinámicas. En este caso se toma en cuenta los valores de humedad, ya que debido a los vapores que emite la cámara de humo puede derivar problemas al difusor de salida de aire, puesto que está construido con madera. El sensor cuenta con una resistencia de 5 ohmios y un led que indica su operación.

2.2.6 ANEMÓMETRO

El anemómetro es un elemento que consta de aspas las cuales giran al golpear con el viento, y así poder calcular la velocidad del viento.



Figura 2.11 Anemómetro

En la Figura 2.11 se observa el anemómetro de aspas empleado en el interior del túnel de viento. Este fue situado en la cámara de análisis cerca del automóvil donde se realizan las pruebas aerodinámicas.

2.2.7 OPTOACOPLADOR MOC3010

El Optoacoplador es un dispositivo de emisión y recepción que trabaja como interruptor que se activa a través de un diodo led. Su funcionamiento se basa en la combinación de un fotoemisor y un fotorreceptor, formando de esta manera un solo dispositivo semiconductor.

Características:

- Corriente hasta 50 mA.

- Voltaje de aislamiento de 5300 Vrms.
- Tensión de 1,2 V.
- Voltaje de salida sin activación 250 V.
- Corriente de salida máxima de 100 mA.



Figura 2.12 Optoacoplador Moc 310

En la Figura 2.12 se muestra el optoacoplador que se empleó en el túnel de viento, mismo que cumple la función de ser una fase de potencia que trabaja con el ventilador haciendo que este reduzca y aumente la velocidad de acuerdo con las necesidades solicitadas durante las pruebas de funcionamiento.

2.2.8 MÁQUINA DE HUMO

La máquina de humo es un elemento electrónico que se encuentra fabricado en un metal resistente, cuya función es la de proporcionar el flujo de aire (humo) necesario dentro de la sección de ensayos.

Características:

- Voltaje: AC 110 – 240 V 50 HZ/ 60 HZ.
- Potencia: 900 W.
- Peso: 3.5 a 4 kg.
- Dimensión: 390 x 250 x 220 mm.
- Salida de niebla: 18000 ft³/min.

$$\frac{18000 \text{ ft}^3}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \times \frac{0,3048 \text{ m}^3}{\text{ft}^3} = \frac{91.44 \text{ m}^3}{\text{s}}$$



Figura 2.13 Cámara de humo

En la Figura 2.13 se aprecia la cámara de humo que se instaló en la sección de ensayos para la ejecución de las respectivas pruebas, permitiendo visualizar el flujo de aire (humo) sobre los vehículos a escala en los que se efectuó las pruebas.

2.2.9 VENTILADOR

Para realizar las pruebas con el túnel de viento se necesitó de un ventilador cuyo trabajo es el de aportar suficiente aire y que este a su vez sea lo más laminar posible. Construir un túnel de viento de soplado implica una serie de desventajas ya que se hace complicado controlar el movimiento del aire al interior de los conductos de entrada y salida, por esta razón se implementó un ventilador del tipo axial, debido a que presenta una mayor capacidad para mover grandes volúmenes de aire, además de ser el indicado ya que independientemente del lugar donde sea instalado, las aplicaciones donde se requiera succión de aire lo desarrollará de manera eficiente para realizar las pruebas.

2.3 MÉTODO

En el diseño se tomó en cuenta la dimensión de la sección de pruebas ya que su área transversal no deberá ser mayor, puesto que exigiría mayor caudal de aire asumiendo mayores costos del túnel.

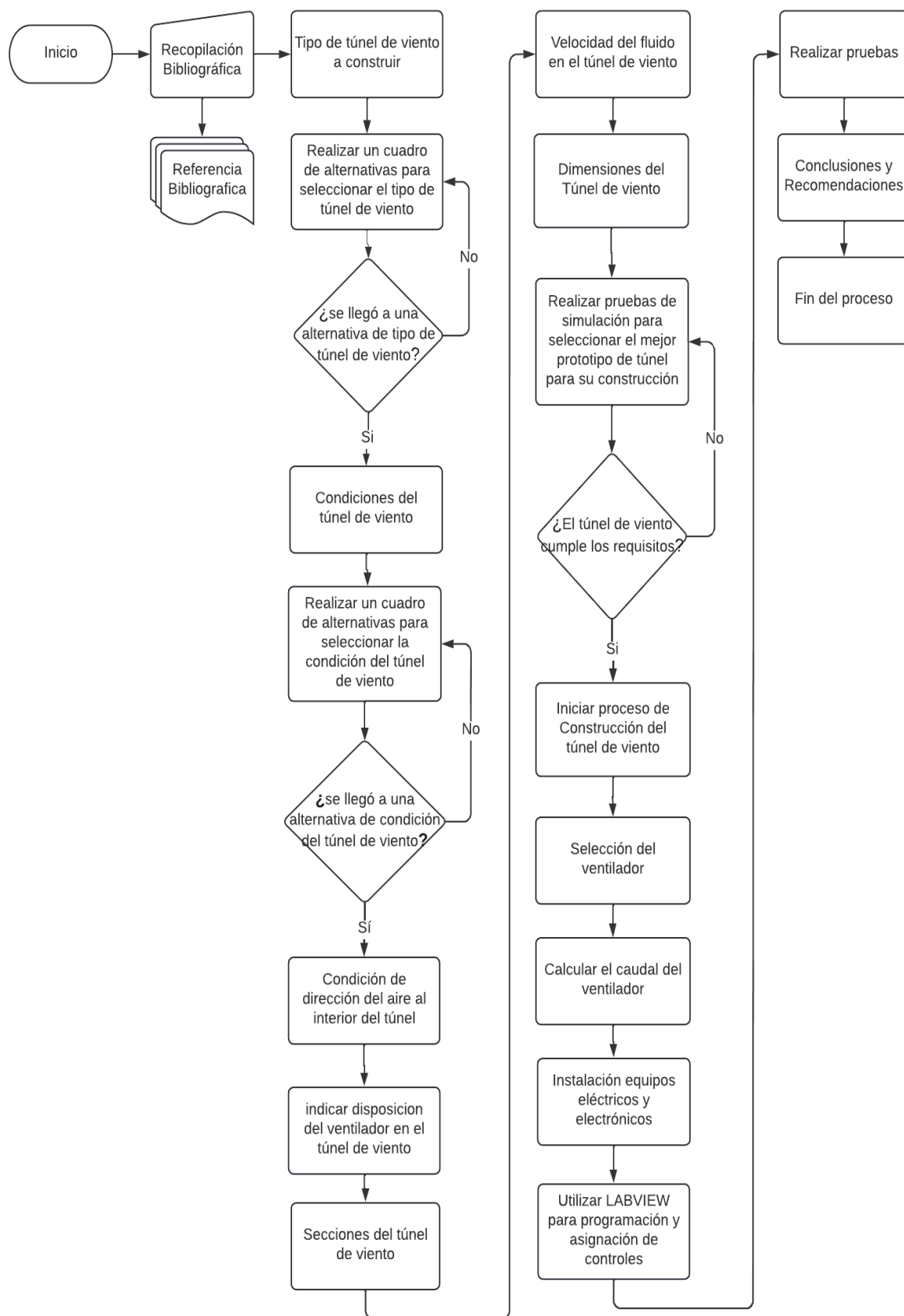


Figura 2.14 Flujograma de desarrollo

La Figura 2.14 representa al flujograma de trabajo de manera sintetizada y ordenada. Para la construcción del túnel de viento se tomó en cuenta diferentes variables de diseño por ejemplo que tipo de túnel utilizar, que ciclo tendrá el túnel de viento y que dirección del fluido tendrá. Todos estos factores se detallan más adelante. Otra variable a considerar es el diseño, es decir las dimensiones del túnel de viento, las cuales están realizadas mediante simulaciones CFD en SOLIDWORKS.

2.3.1 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Gracias a la información encontrada en la web, tesis, artículos, entre otros. Se hace más fácil comprender el funcionamiento del túnel de viento así mismo llegar a conclusiones claras durante su construcción. El principal beneficio del túnel de viento es que permite conocer si un objeto (vehículo) produce resistencia mientras circula el aire a través del objeto, así mismo identificar el comportamiento del flujo de aire (laminar o turbulento) sobre cualquier vehículo puesto a prueba. De esta manera aprovechar la construcción de esta maqueta con el fin de desarrollar bases de estudio referente a la aerodinámica vehicular.

2.3.2 TIPO DE TÚNEL DE VIENTO A CONSTRUIR

Para seleccionar la alternativa idónea, se consideró el cumplimiento de ciertas condiciones de operación del prototipo, siendo el punto más importante la velocidad del aire, refiriéndose al flujo de aire al interior del túnel de viento, junto con varias condiciones que se hacen necesarias para el análisis planteado.

En la Tabla 2.1 se cita las condiciones que se requiere para llegar a un prototipo de túnel de viento y los resultados que determinaron que el mejor túnel de viento para realizar el análisis aerodinámico en el sector automotriz es el subsónico, ya que cumple con las condiciones planteadas. En la cual el aspecto más importante a considerar es el rango de velocidades para su análisis, este fue comparado con el número de Mach, el cual es el resultado de la velocidad dada sobre la velocidad del sonido.

Tabla 2.1 Alternativas para la selección del túnel de viento

Condiciones	Tipo de túnel de viento a construir			
	Subsónico	Transónico	Supersónico	Hipersónico
Mach < 0,7	5	4	1	1
Análisis aerodinámico sobre vehículos.	5	4	1	1
Costos accesibles de operación.	4	2	1	1
Costos accesibles de implementación.	5	2	1	1
Visualización de resultados sin necesidad de aparatos especiales.	5	2	1	1
Cantidad de variables elevadas.	4	4	5	5
Total	28	18	10	10
PONDERACIÓN:	1: Muy bajo 2: Bajo	3: Medio 4: Alto	5: Muy alto	

2.3.3 CONDICIONES DEL TÚNEL DE VIENTO

Dentro del túnel de viento de tipo subsónico existen dos tipos de disposiciones como lo son de ciclo cerrado o abierto, cada tipo de túnel cuenta con su ventaja o desventaja las cuales se las considerará en variables para llegar a la mejor opción para su construcción.

A continuación, en la Tabla 2.2 se detallan las alternativas en función a la complejidad de implementación. Las ponderaciones que se obtuvieron para los dos tipos de túneles de viento son de 21 para el túnel de viento de ciclo abierto y 34 para un túnel de ciclo cerrado, más lo mencionado en el párrafo anterior hace notar que es más complicado la implementación de un túnel de ciclo cerrado.

Tabla 2.2 Alternativas en función de la complejidad de implementación

Valoración de alternativas										
Variables	Abierto					Cerrado				
	Valores					Valores				
1. Dificultad de construcción		2								5
2. Precio de construcción			3							5
3. Exigencia durante el diseño				4						5
4. Reducción de turbulencia			3							5
5. Elementos del túnel			3							5
6. Espacio requerido				4					4	
7. Implementación de aplicaciones		2						3		
8. Condiciones del fluido							2			
	0	4	9	8	0	0	2	3	4	25
Total	21					34				
PONDERACIÓN:	1: Muy bajo		4: Medio			5: Muy alto				
	2: Bajo		5: Alto							

Al observar la tabla, el túnel de ciclo cerrado se complica en aspectos de diseño y de construcción por ende demanda más tiempo y dinero para su construcción. Debido a esto, para el presente trabajo se utilizará un túnel de viento subsónico de ciclo abierto que en sí generará zonas de turbulencia en el interior del túnel que serán controladas mediante la implementación de dispositivos electrónicos.

2.3.4 CONDICIONES DE LA DIRECCIÓN DEL VIENTO EN EL INTERIOR DEL TÚNEL

Dependiendo de cada una de las disposiciones del túnel de viento se requiere un ventilador en función de su posición respectivamente, esto es, un túnel de viento aspirado o un túnel de viento soplado, el que consta con un ventilador antes de la cámara de análisis se lo denomina de soplado, mientras que el que tiene su ventilador después de la cámara de análisis se lo considera como de aspirado. Cada una de estas dos configuraciones tiene su respectiva ventaja como desventaja y todo esto dependerá del uso que se le vaya a dar al túnel de viento, para el presente trabajo de tesis se ha decidido utilizar la configuración de túnel de viento aspirado ya que se considera como la mejor disposición, pues el ventilador enviará un flujo

uniforme de aire, con esto dentro del túnel de viento se evitará tener turbulencias por el flujo de aire que ingresará. Sin embargo, la velocidad con la cual viaje el aire por el interior del túnel será menor, esta velocidad más la velocidad que emitirá la cámara de humo, más el aire del ambiente ayudará a que el túnel de viento no carezca de velocidad de aire en su interior.

2.3.5 SECCIONES DEL TÚNEL DE VIENTO

La elaboración del túnel de viento para el presente trabajo consistió en dividirlo en 3 secciones que facilitan el transporte de un lugar a otro, además cada una de sus secciones cumple una función esencial dentro de las pruebas aerodinámicas, cuyas funciones se las explicará a continuación.

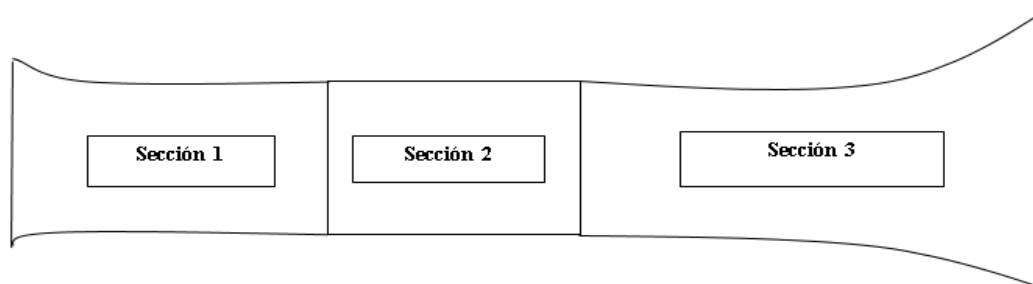


Figura 2.15 Secciones del túnel de viento

La Figura 2.15 representa la distribución de las secciones del túnel de viento donde la sección 1 es el difusor de entrada, el cual permite el ingreso del aire al túnel de viento, la sección 2 es la cámara de análisis, lugar donde se van a realizar las pruebas aerodinámicas y la sección 3 representa al difusor de salida, aquí se colocará el ventilador cuya función es ayudar a aspirar el aire del exterior.

2.3.6 VELOCIDAD DEL VIENTO

Para calcular la velocidad de trabajo al interior del túnel de viento, se tomó como referencia una velocidad de 30 m/s, velocidad que puede variar al interior del túnel de viento. Además, se tomó tres valores de velocidades para realizar las pruebas aerodinámicas las cuales fueron de 100 km/h, 150 km/h, 200 km/h y se procedió a transformar a escala con la cual se está trabajando en los vehículos dimensionados que es 1:18.

$$\frac{200 \text{ km}}{\text{h}} \times \frac{1000 \text{ m}}{\text{km}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 55,56 \text{ m/s}$$

$$\text{Velocidad del vehículo} = \frac{\text{VELOCIDAD REAL}}{\text{ESCALA}} \quad [2.1]$$

$$\text{Velocidad del vehículo} = \frac{55,56 \text{ m/s}}{18}$$

$$\text{Velocidad del vehículo} = 3,08 \text{ m/s}$$

$$\text{Velocidad a escala del vehículo} = 3,08 \text{ m/s}$$

2.4 DIMENSIONES DEL TÚNEL DE VIENTO

Para definir las dimensiones del túnel de viento, se realizó un análisis CFD para cinco diseños propuestos en los que se varió las dimensiones del difusor de entrada de aire, salida de aire y cámara de análisis, se ingresaron dos condiciones de simulación, por el difusor de entrada se ingresaron las condiciones de velocidad y por el difusor de salida ingresaron las condiciones de presión. La velocidad de entrada para realizar la simulación es de 30 m/s, para el valor de la presión se tomó en cuenta la presión atmosférica de 101325 Pa, que corresponde a la presión atmosférica de la ciudad de Ibarra. Adicionalmente, se ubicó en la parte central de la cámara, un auto a escala 1:18. El objetivo de este análisis es visualizar el comportamiento del fluido comparando resultados de velocidad, presión para los distintos diseños propuestos, con los datos obtenidos se analizaron cuál de los diseños es el más eficiente y óptimo para este tipo de banco de ensayos y de esta manera se justificó su selección para la construcción del túnel de viento. En este proceso se han omitido las etapas de cálculo a realizar, ya que el software (SOLIDWORKS) realizará cada uno de los cálculos debido a su programación. Sin embargo, no indica dicho cálculo sino indica de forma directa los datos y condiciones iniciales que se ingresa.

A continuación, se detallan cada uno de los 5 tipos de simulación realizadas con las 5 diferentes medidas propuestas. Los resultados principales mostrados en esta simulación es la velocidad, presión y turbulencia, este último punto se lo mostrará de manera sencilla ya

que requiere un punto de estudio avanzado, además de un conocimiento mayor para su explicación.

- **DISEÑO A**

Dimensiones del túnel de viento diseño A

Para el diseño A se tomaron las siguientes medidas como referencia, modificando las medidas de cada sección. A continuación, en la Tabla 2.3 se muestran las dimensiones de cada sección del túnel de viento para el diseño A del prototipo de túnel de propuesto.

Tabla 2.3 Dimensiones del diseño A

Partes	Medidas
Difusor entrada de aire	800 mm de largo, 500 mm de alto
Cámara de análisis	1000 mm de largo, 300 mm de alto
Difusor salida de aire	2000 mm de largo, 1000 mm de alto

Túnel de viento dimensionado en SOLIDWORKS

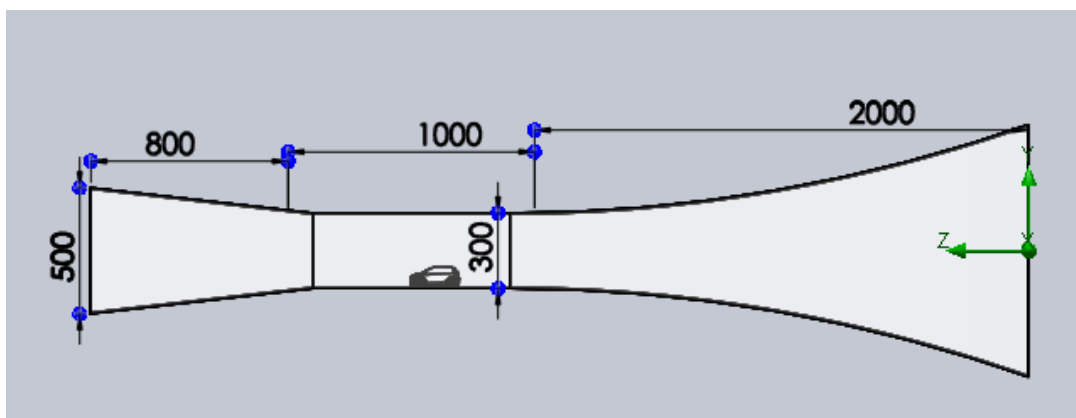


Figura 2.16 Dimensiones del túnel de viento A

En la Figura 2.16 se muestra el dimensionamiento del primer modelo correspondiente al diseño A, realizado en el software computacional de SOLIDWORKS, mostrando cada una de las dimensiones que tiene cada sección del túnel de viento.

Velocidad presente en túnel de viento diseño A

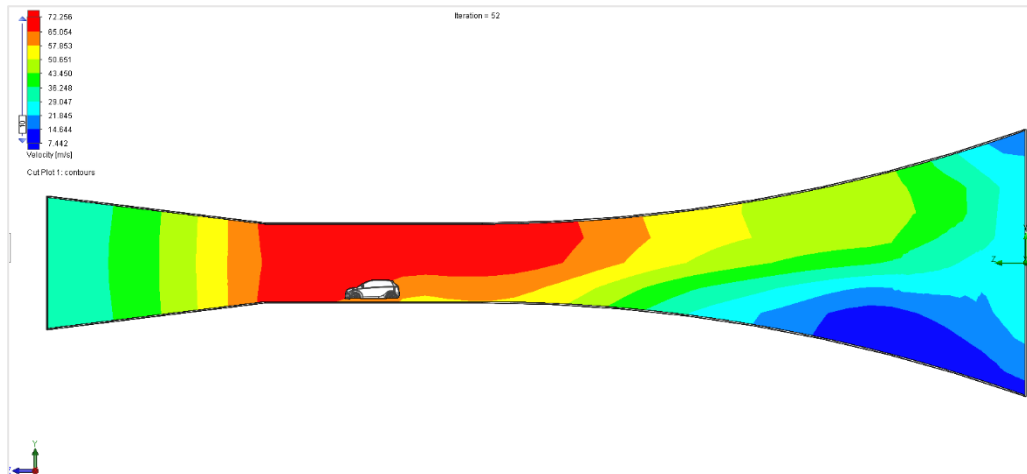


Figura 2.17 Velocidad del túnel de viento diseño A

A través del programa de CFD de SOLIDWORKS en la Figura 2.17 se puede apreciar que conforme va ingresando el fluido (aire) por el túnel de viento, este va aumentando su velocidad de circulación. Es por esto que existe una mayor velocidad en la cámara de análisis, llegando a un valor de 72,25 m/s. El comportamiento del fluido (viento) indica que conforme se reduce el área por donde circula la velocidad aumenta.

Presión presente en túnel de viento diseño A

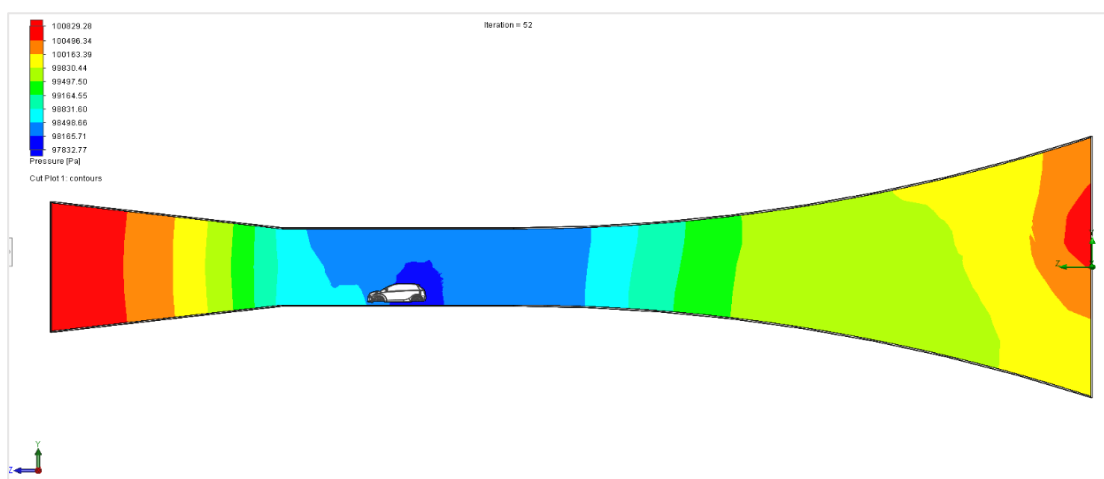


Figura 2.18 Presión del túnel de viento diseño A

En la Figura 2.18 indica la presión del diseño A, la presión se encuentra en aumento en el difusor de entrada de aire llegando a una presión máxima de 100829 Pa, conforme se va reduciendo la dimensión del túnel de viento la presión descende hasta llegar a la cámara de

análisis a una presión de 97832 Pa, después de pasar por la cámara llega finalmente al difusor de salida en donde vuelve a incrementar su presión.

Intensidad de turbulencia presente en túnel de viento diseño A

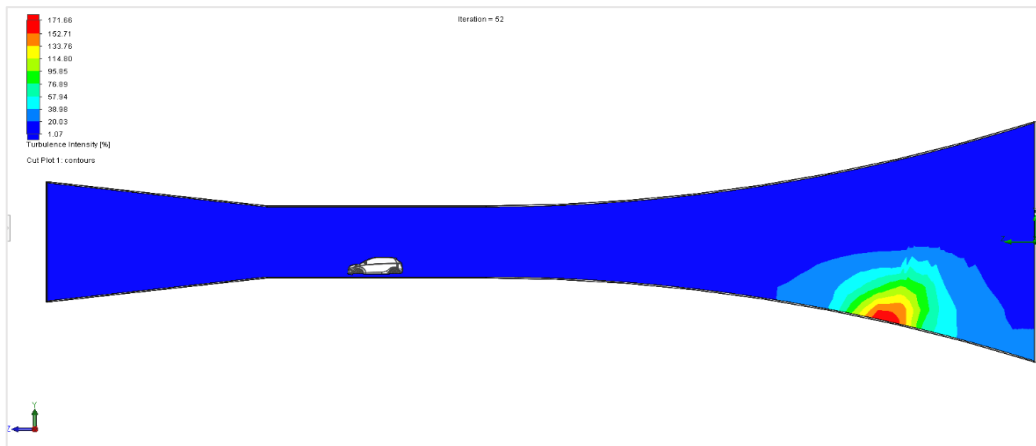


Figura 2.19 Intensidad de turbulencia en túnel de viento diseño A

La Figura 2.19 indica la intensidad de turbulencia y que a lo largo del túnel de viento presenta un flujo normal de aire sin precipitaciones que originen zonas de turbulencia en la cámara de análisis, tal como muestra la imagen en esta zona puede circular el aire sin ningún problema llegando a obtener un 5% de turbulencia que es bajo. Sin embargo, por el difusor de salida de aire se llega a tener zonas de mayor turbulencia esto se debe a su diseño, llegando a tener un 171% de turbulencia.

- **DISEÑO B**

Dimensiones del túnel de viento diseño B

Para el diseño B se tomaron las siguientes medidas como referencia, variando las medidas de cada una de las secciones. En la Tabla 2.4 se detallan las dimensiones del prototipo de túnel de viento del diseño B.

Tabla 2.4 Dimensiones del diseño B

Partes	Medidas
Difusor entrada de aire	1000 mm de largo, 600 mm de alto
Cámara de análisis	900 mm de largo, 300 mm de alto
Difusor salida de aire	1000 mm de largo, 1000 mm de alto

Túnel de viento dimensionado en SOLIDWORKS

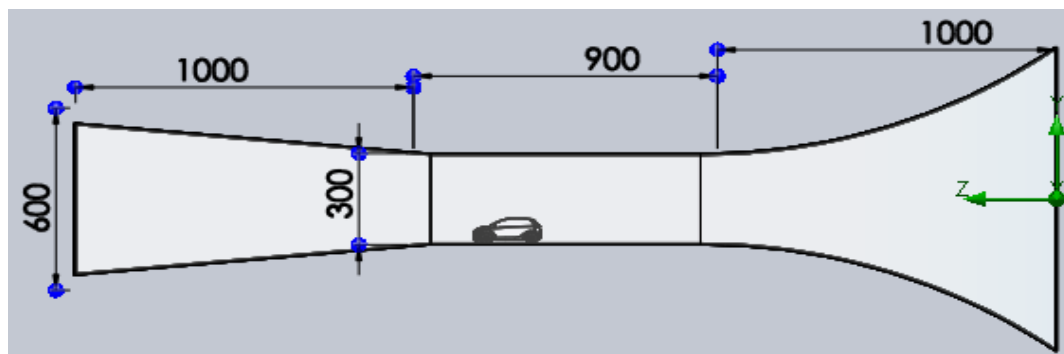


Figura 2.20 Dimensiones del túnel de viento B

En la Figura 2.20 se puede observar las dimensiones para el prototipo del diseño B propuesto realizado en el programa de SOLIDWORKS.

Velocidad presente en túnel de viento diseño B

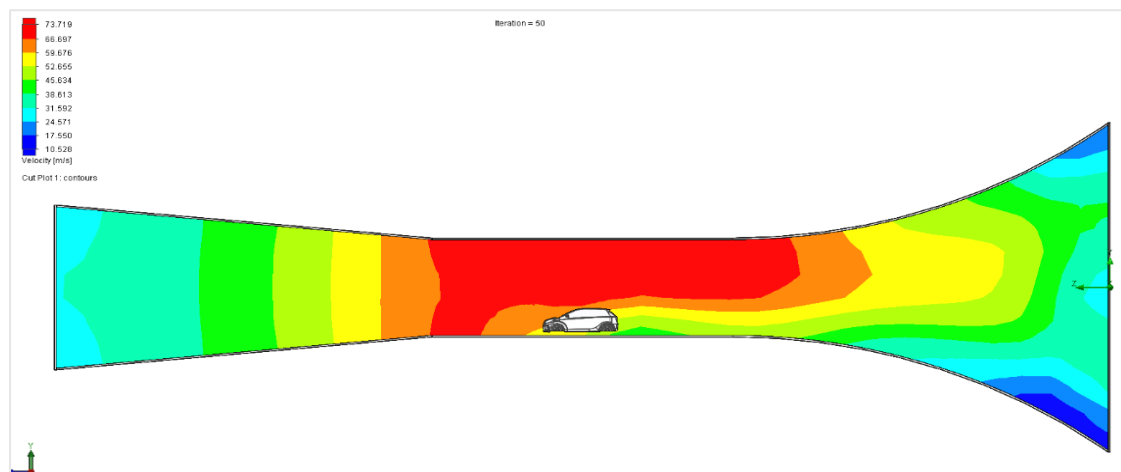


Figura 2.21 Velocidad del túnel de viento diseño B

La Figura 2.21 muestra la velocidad del viento del diseño B, simulado a través del programa de CFD de SOLIDWORKS, este nos indica que conforme va ingresando el fluido (aire) por el túnel de viento, este va aumentando su velocidad de circulación. Es por esto que existe

una mayor velocidad en la cámara de análisis, llegando a un valor de 73,71 m/s, un valor mayor y óptimo respecto a los del diseño A, una vez que pasa por la cámara de análisis, la velocidad se reduce debido a la ampliación del difusor de salida de aire.

Presión presente en túnel de viento diseño B

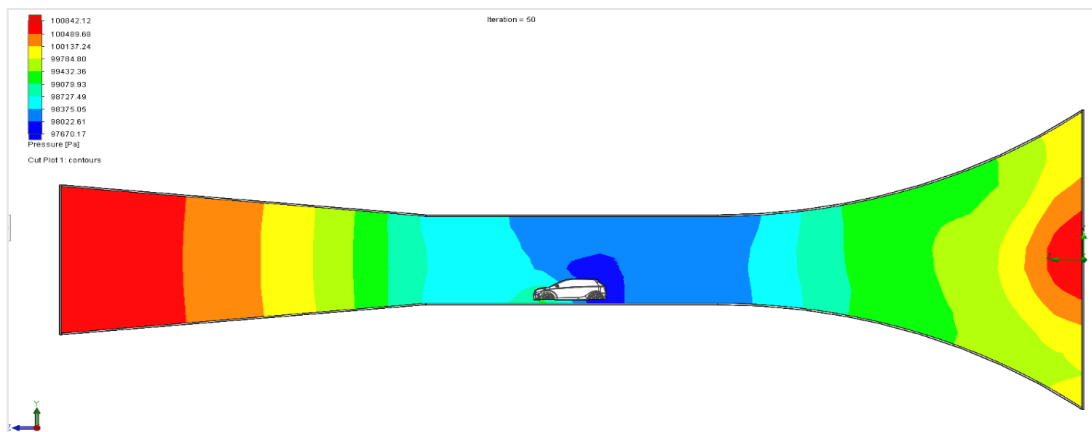


Figura 2.22 Presión del túnel de viento diseño B

La Figura 2.22 describe como la presión trabaja dentro del interior del túnel de viento, la presión en el difusor de entrada del aire al igual que en el difusor de salida de aire llega a obtener presiones de hasta 100842 Pa, resultados de una mayor presión, en la cámara de análisis se llega a obtener una presión de 97670 Pa, en donde su presión se considera menor debido a su coloración de la imagen lo que resultaría tener zonas de bajas presión para realizar las pruebas.

Intensidad de turbulencia presente en túnel de viento diseño B

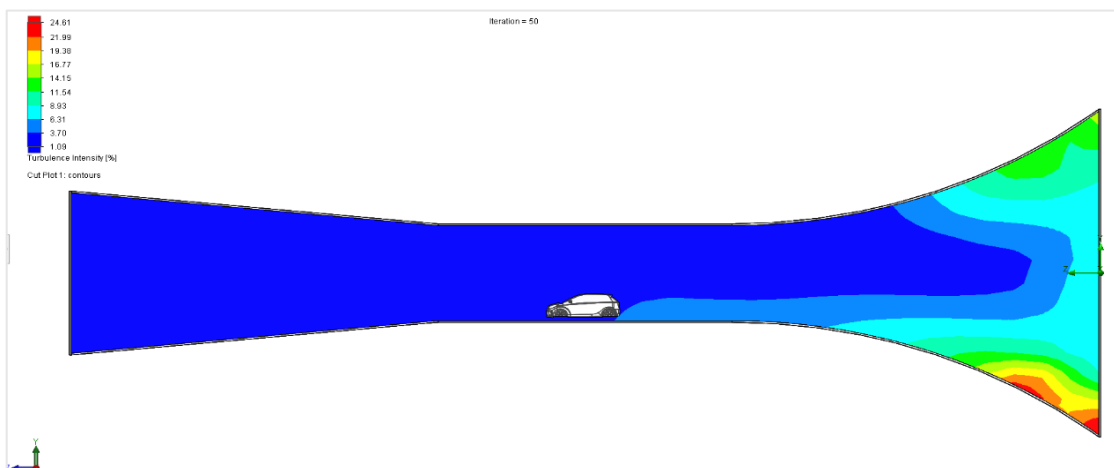


Figura 2.23 Intensidad de turbulencia del túnel de viento diseño B

Conforme inicia la circulación del viento se puede observar que en la Figura 2.23 existen zonas de turbulencia baja, empezando desde el difusor de entrada de aire hasta llegar a la cámara de análisis. Sin embargo, en el momento que el viento choca con el vehículo puesto a prueba, se puede apreciar que en la parte posterior del vehículo empieza a formarse zonas de turbulencia por lo que cambia la coloración en la simulación llegando a una turbulencia de 7% por detrás del vehículo y conforme va circulando hasta llegar al difusor de salida llega a una turbulencia de 24%.

- **DISEÑO C**

Dimensiones del túnel de viento diseño C

En lo referente al diseño C se realiza la simulación con las medidas adoptadas en la Tabla 2.5 donde existe cambio de medidas de cada sección.

Tabla 2.5 Dimensiones del diseño C

Partes	Medidas
Difusor entrada de aire	1105 mm de largo, 500 mm de alto
Cámara de análisis	800 mm de largo, 300 mm de alto
Difusor salida de aire	910 mm de largo, 780 mm de alto

Túnel de viento dimensionado en SOLIDWORKS

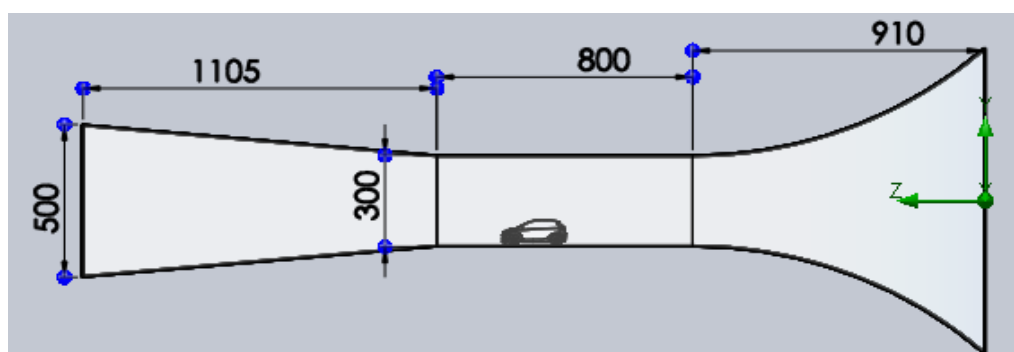


Figura 2.24 Dimensiones del túnel de viento diseño C

La Figura 2.24 muestra el dimensionamiento del prototipo del diseño C realizado en la interfaz del Software de cada una de las secciones de túnel de viento.

Velocidad presente en túnel de viento diseño C

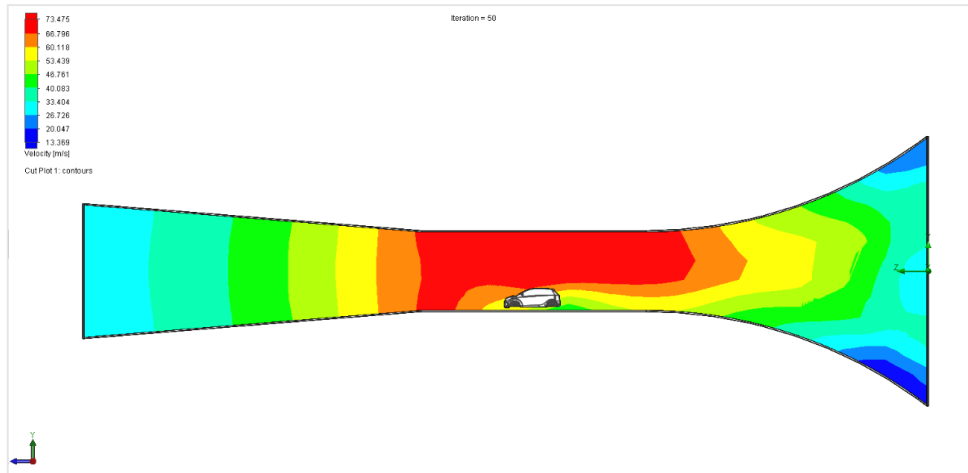


Figura 2.25 Velocidad del túnel de viento diseño C

En la Figura 2.25 se puede observar la velocidad del túnel de viento del diseño C realizado a través del programa de CFD de SOLIDWORKS, el cual nos indica que conforme va ingresando el fluido (aire) por el túnel de viento, este va aumentando su velocidad de circulación. Es por esto que existe una mayor velocidad en la cámara de análisis, llegando a un valor de 73,4 m/s, un valor mayor y óptimo respecto al diseño A y menor al diseño B, una vez que pasa por la cámara de análisis, la velocidad se reduce debido a la ampliación del difusor de salida de aire.

Presión presente en túnel de viento diseño C

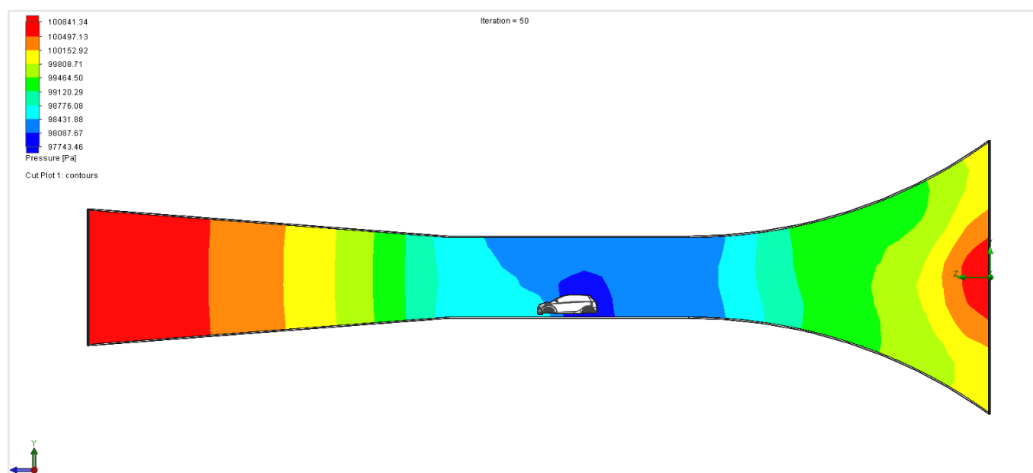


Figura 2.26 Presión del túnel de viento diseño C

La Figura 2.26 muestra la presión del túnel de viento del diseño C proporcionada por el programa de simulación, este nos indica el comportamiento de la presión al interior del túnel. Además, entrega resultados haciendo referencia la presión exterior en este caso un aumento

o reducción de la presión en su interior respecto a la presión de Ibarra esto es 101325 Pa, en la cámara de ensayos vemos que esta presión decae llegando a 977 Pa. Y de hecho, se puede decir que llega a ser un resultado óptimo ya que no se requiere una presión elevada en esta sección, en el difusor de entrada de aire se observa una mayor presión llegando a los 100841 Pa, manteniendo su presión respecto al exterior.

Cabe recalcar que la gradiente de presión puede variar en función de la velocidad del aire con el que fluya en su interior. Esto es, si existe un aumento o reducción de presión que será indicada por su coloración también existirá un cambio de velocidad al interior del túnel de viento por el contrario si no existe ninguna variación en la presión la velocidad se mantendrá estable.

Intensidad de turbulencia presente en túnel de viento diseño C

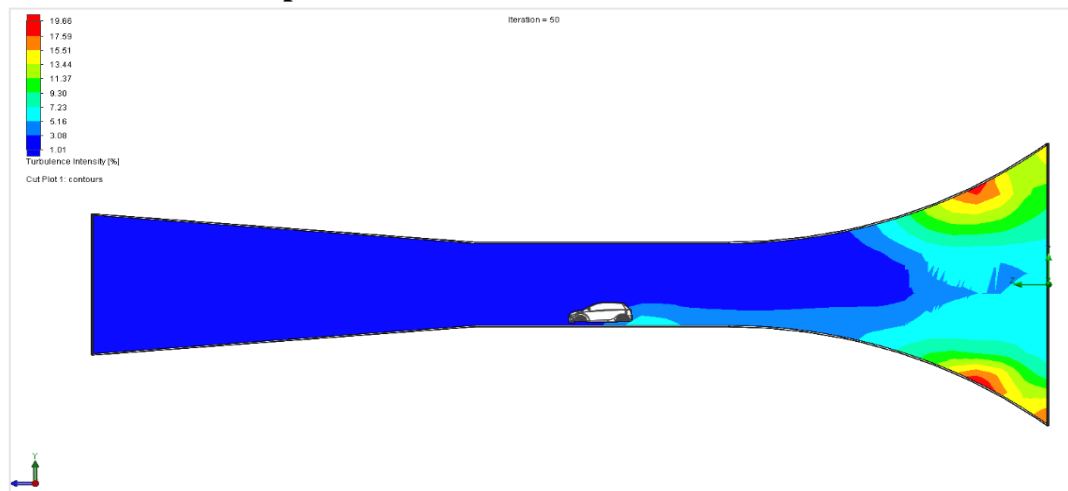


Figura 2.27 Intensidad de turbulencia del túnel de viento diseño C

En la Figura 2.27 nos indica una baja turbulencia en casi todo el túnel a excepción del difusor de aire de salida llegando en su punto más alto a 19% presentando una inestabilidad del aire en un mínimo porcentaje, mientras que por el difusor de entrada y la cámara de análisis no se muestra casos de turbulencia elevada, por el contrario indica un porcentaje menor de 2% con lo que las pruebas se desarrollarían con éxito.

- **DISEÑO D**

Dimensiones del túnel de viento diseño D

Para el diseño D se muestra en la Tabla 2.6 las modificaciones realizadas a cada sección para realizar la simulación.

Tabla 2.6 Dimensiones del diseño D

Partes	Medidas
Difusor entrada de aire	1500 mm de largo, 500 mm de alto
Cámara de análisis	900 mm de largo, 300 mm de alto
Difusor salida de aire	500 mm de largo, 1000 mm de alto

Túnel de viento dimensionado en SOLIDWORKS

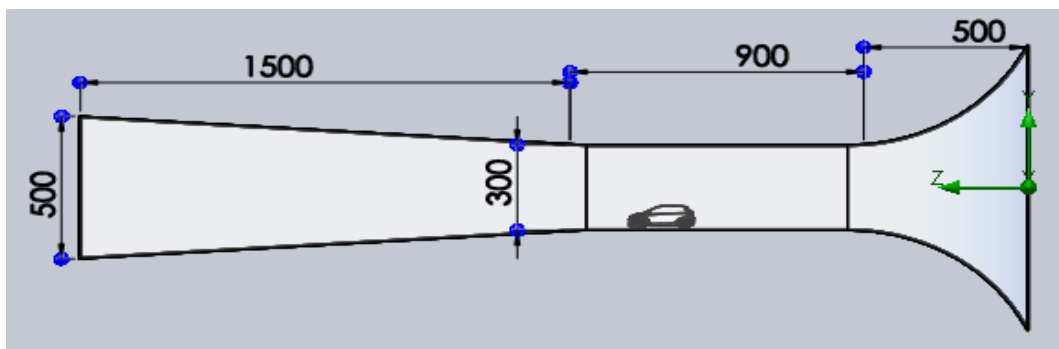


Figura 2.28 Dimensiones del túnel de viento diseño D

La Figura 2.28 muestra las dimensiones del túnel de viento realizado en el programa de SOLIDWORKS del diseño D propuesto.

Velocidad presente en túnel de viento diseño D

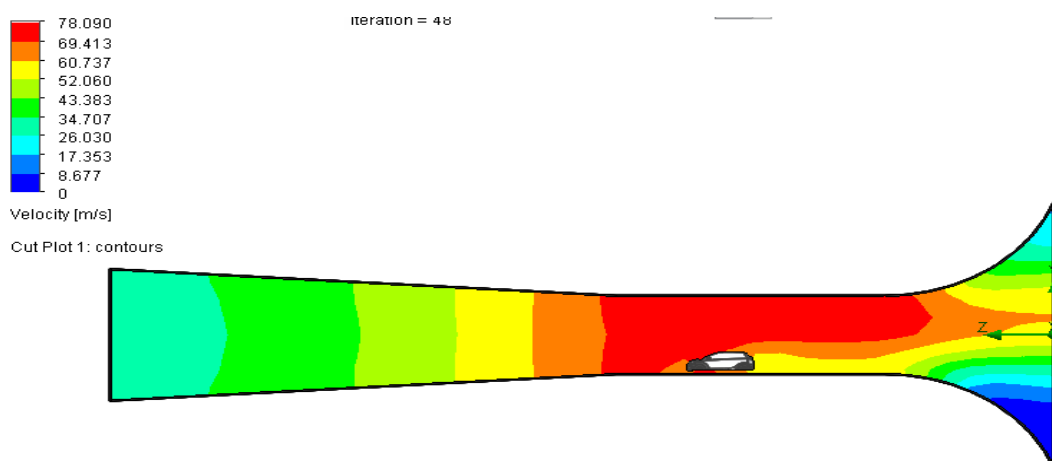


Figura 2.29 Velocidad del túnel de viento diseño D

La Figura 2.29 indica la velocidad del túnel de viento del diseño D, obtenida en el programa de CFD de SOLIDWORKS, nos indica que conforme va ingresando el fluido (aire) por el túnel de viento, este va aumentando su velocidad de circulación. Sin embargo, su velocidad

no aumenta drásticamente debido al diseño del difusor de aire de entrada ya que es demasiado largo, la velocidad del fluido (viento) llega a un valor de 24,19 m/s, valor que resulta menor a comparación del diseño A, B y C, una vez que pasa por la cámara de análisis, la velocidad se reduce lentamente ya que el diseño del difusor de aire de salida es corto.

Presión presente en túnel de viento diseño D

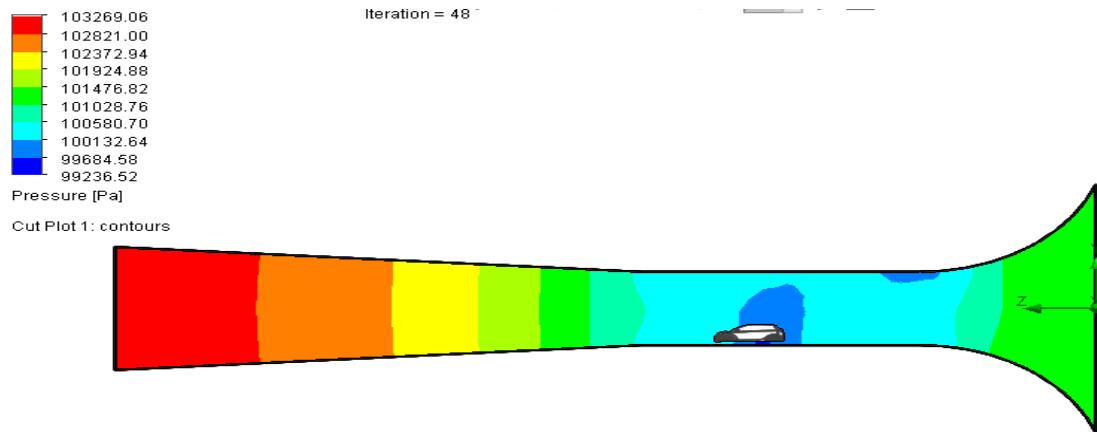


Figura 2.30 Presión del túnel de viento diseño D

En este caso de la Figura 2.30 describe que debido a las dimensiones propuestas para este prototipo se obtiene una mayor presión en casi todo el difusor de entrada de aire que llega hasta 101466 Pa. Esto se debe, a que la medida dada a este difusor hace que exista una mayor presión y una menor velocidad, esto se compensa conforme se va reduciendo la medida de la cámara de análisis obteniendo una presión de 101182 Pa.

Intensidad de turbulencia presente en túnel de viento diseño D

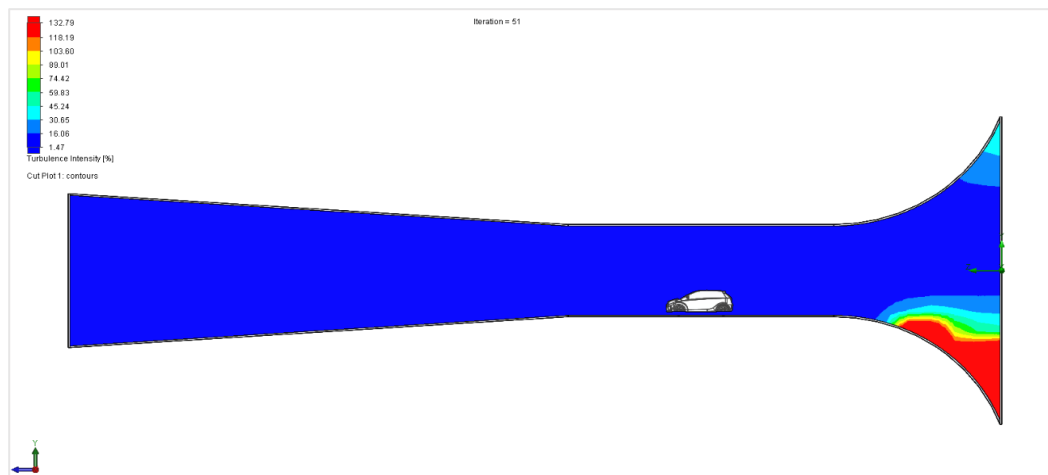


Figura 2.31 Intensidad de turbulencia del túnel de viento diseño D

En la Figura 2.31 la intensidad de turbulencia se mantiene baja en dos de las tres secciones. Esto es, en el difusor de entrada de aire y en la cámara de análisis llegando a valores de 8% mientras que en el difusor de salida de aire se origina zonas de turbulencia llegando a un valor máximo de 132%.

- **DISEÑO E**

Dimensiones del túnel de viento diseño E

Para el diseño E se realiza una reducción del difusor de entrada de aire con el fin de observar los cambios de simulación. La Tabla 2.7 muestra las medidas para cada sección del túnel de viento.

Tabla 2.7 Dimensiones del diseño E

Partes	Medidas
Difusor entrada de aire	500 mm de largo, 500 mm de alto
Cámara de análisis	800 mm de largo, 300 mm de alto
Difusor salida de aire	1500 mm de largo, 1000 mm de alto

Túnel de viento dimensionado en SOLIDWORKS

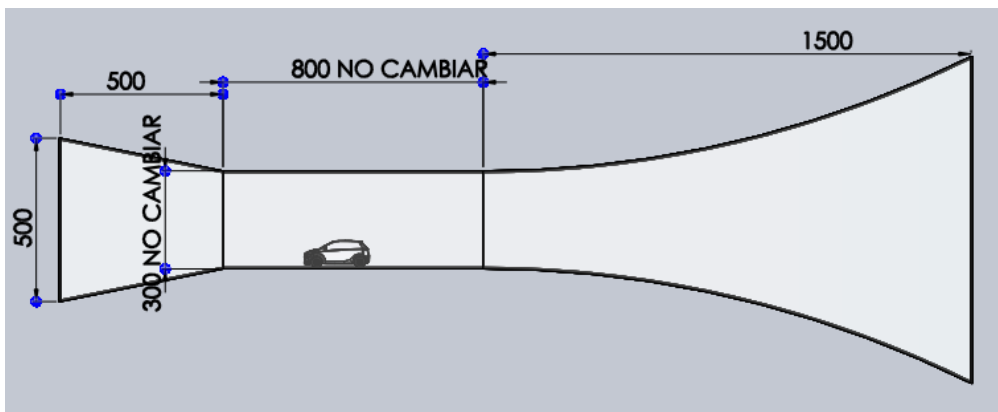


Figura 2.32 Dimensiones del túnel de viento diseño E

La Figura 2.32 indica el dimensionamiento de cada sección del túnel de viento realizado en el programa SOLIDWORKS, representa el diseño E propuesto en el presente trabajo.

Velocidad presente en túnel de viento diseño E

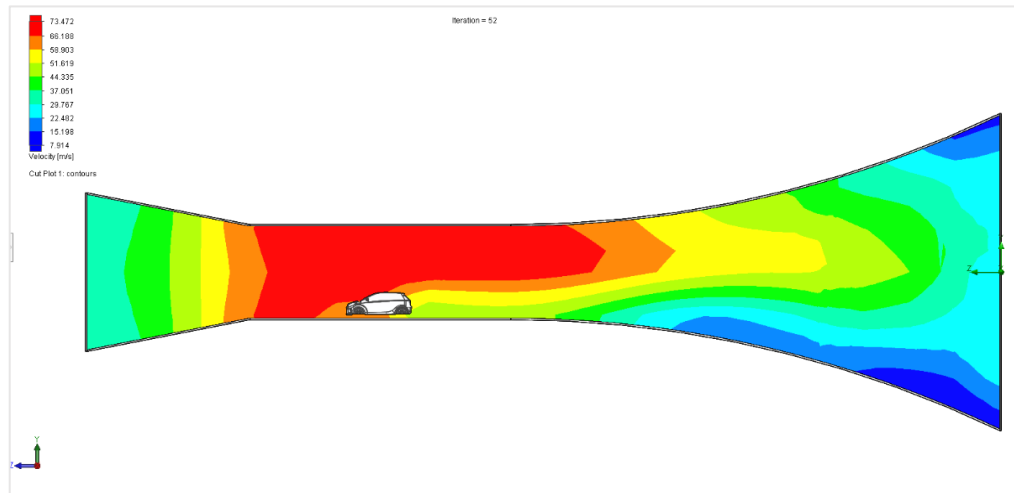


Figura 2.33 Velocidad del túnel de viento diseño E

En la Figura 2.33 se denota la velocidad del túnel de viento del diseño E, obtenida a través del programa de CFD de SOLIDWORKS e indica que conforme va ingresando el fluido (aire) por el túnel de viento, este va aumentando su velocidad de circulación. Es por esto, que existe una mayor velocidad en la cámara de análisis, llegando a un valor de 73,47 m/s, un valor mayor y óptimo respecto a los del diseño A y D, igual al diseño C y menor al diseño B. Una vez que pasa por la cámara de análisis, la velocidad se reduce debido a la ampliación del difusor de salida de aire.

Presión presente en túnel de viento diseño E

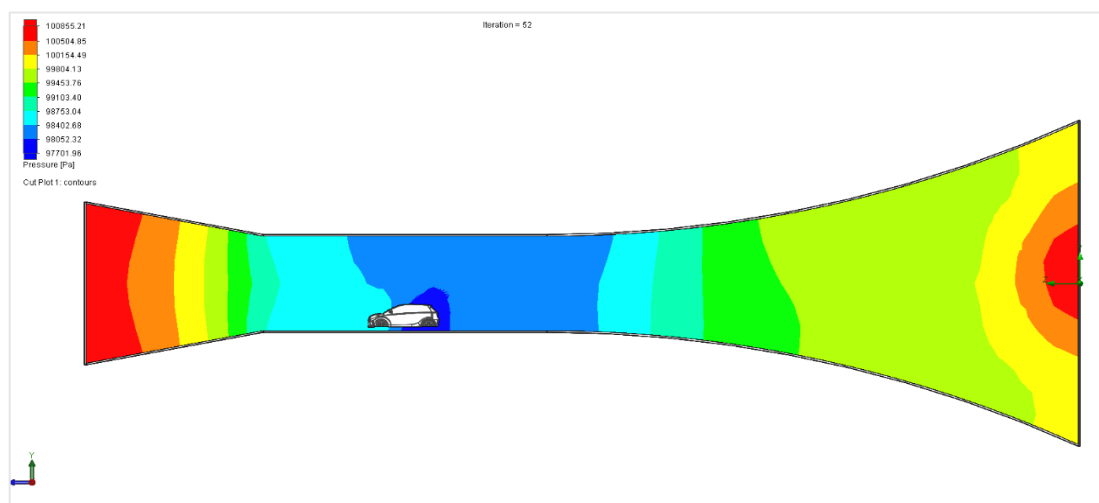


Figura 2.34 Presión del túnel de viento diseño E

En la Figura 2.34 se puede constatar que a velocidades mayores su presión se disminuye mientras que a velocidades menores su presión va en aumento. En este caso existe una zona de menor presión en la cámara de análisis exactamente en la mitad del automóvil siendo está de 97701 Pa., y por ende existe una mayor velocidad, mientras que en el difusor de aire tanto de entrada como de salida la presión es mayor llegando a 100855 Pa.

Intensidad de turbulencia presente en túnel de viento diseño E

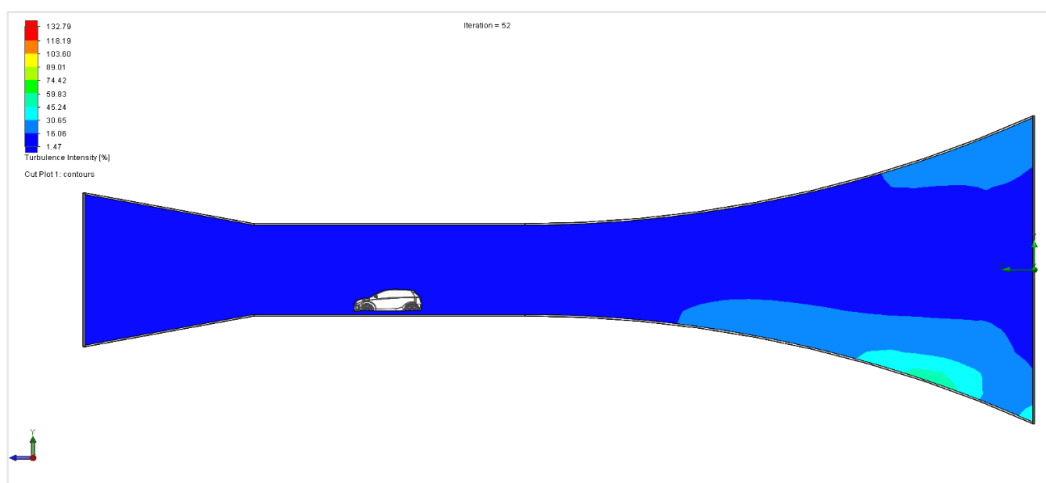


Figura 2.35 Intensidad de turbulencia del túnel de viento diseño E

En la Figura 2.35 no llega a tener una zona de turbulencia que sea mayor o donde su coloración cambie severamente, desde que empieza la circulación del aire por la primera sección hasta la segunda sección la turbulencia se mantiene en un rango de 1% a 15%, únicamente tiene zonas de poca turbulencia al terminar la carrera de circulación de aire en el difusor de salida en donde la turbulencia llega a rangos de 30% a 45%.

2.5 SELECCIÓN DEL VENTILADOR

Para la selección del ventilador se consideró un parámetro muy importante, como lo es el caudal de aire, pues este debe contar con todas las bondades de proporcionar un caudal suficiente para así poder emplearlo en el prototipo de túnel de viento.

2.5.1 CAUDAL REQUERIDO POR EL VENTILADOR

El caudal se representa como el volumen del fluido que avanza por unidad de tiempo. Es importante tomar en cuenta este aspecto, ya que se consideró como el primer parámetro para la adquisición del ventilador.

$$Q = V \times a \quad [2.2]$$

Dónde:

Q= Caudal que requiere ventilador.

V= Velocidad del fluido.

A= Área del difusor de salida de aire.

$$Q = 3,08 \text{ m/s} \times 0.35 \text{ m}^2$$

$$Q = 1,07 \text{ m}^3/\text{s}$$

Se toma en cuenta la ley de Bernoulli, en donde el caudal es el mismo en todas partes del circuito. En base a lo mencionado anteriormente se asumió que se debe implementar un ventilador cuyo caudal sea mayor a $1,07 \text{ m}^3/\text{s}$, esto indica el caudal que se necesitará en la cámara de análisis para la realización de las pruebas. Una vez ya obtenido los datos en los cálculos anteriores, se indica que para poder hacer las pruebas aerodinámicas a una velocidad de 200 km/h se debe utilizar un ventilador que pueda producir un caudal de $1,07 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figura 2.36 Ventilador marca MAXX

Con los cálculos antes realizados se llegó a la conclusión que se necesita un ventilador cuyo caudal sea de $1,07 \text{ m}^3/\text{s}$. Por esta razón se eligió un ventilador marca MAXX como se muestra en la Figura 2.36, el cual entra en funcionamiento por un motor eléctrico de 110 W, permitiendo producir un caudal constante de aire.

Características del ventilador

- Potencia: 220 W.
- Aspas: 4.
- Tamaño: 24 pulgadas.
- Voltaje: 110 V.

Evacuación de aire de $12000 \text{ m}^3/\text{h}$ que transformando a unidades llega a un valor de:

$$\frac{12000 \text{ m}^3}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 3,3 \text{ m}^3/\text{s}$$

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se detallan los resultados del diseño y la simulación respectiva del túnel de viento más idóneo para el presente estudio de investigación realizado en el software computacional de diseño SOLIDWORKS en su versión estudiantil. El diseño se realizó en base a las herramientas o funciones con las que cuenta el software (extracción, vaciado, redondeo, corte, entre otros.) para así realizar el dimensionamiento del túnel de viento a la escala 1:18. Por otra parte, la simulación de cada una de las etapas se siguió de una forma ordenada tales como: preproceso, cálculo y postproceso las cuales permitieron analizar el comportamiento del flujo del viento en el túnel de viento sobre un vehículo automotor, denotando la resistencia que este pone al flujo. Además, con el desarrollo de las simulaciones de las pruebas CFD se consiguió un prototipo de túnel de viento idóneo para su elaboración. También se describe el proceso de construcción del túnel de viento además de cálculos realizados como coeficiente aerodinámico resistencia y potencia para realizar comparaciones entre los vehículos puestos a prueba.

3.1 COMPARACIÓN DE SIMULACIÓN

Para obtener un diseño real para la construcción del túnel de viento se realizó previamente una simulación con diferentes prototipos de dimensiones. Los resultados obtenidos de las simulaciones de CFD de los modelos propuestos se muestran en la tabla a continuación, por lo que se concluye lo siguiente:

Cuando se varia la longitud hasta 800 mm en el difusor de entrada de aire, se obtiene que no varía la velocidad del aire por lo cual, se concluye que una longitud mayor a 800 mm del difusor podría ser utilizada para la construcción de este banco de ensayos.

Para un difusor de salida de aire con una longitud de 500 mm o menor a esta como la que presenta el diseño D, se observa en la cámara de análisis una velocidad tres veces menor del aire con respecto a las demás simulaciones realizadas. Por esta razón, no se podría implementar un diseño con el difusor de salida de aire menor a 500 mm.

Con respecto a la intensidad de turbulencia se obtiene el menor porcentaje en el diseño C, por lo cual este sería el que produciría un flujo más estable en los ensayos, y por esta razón se justifica su selección para su posterior fabricación en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Cuadro de resultados de cada simulación

Condición	Unidad	Diseño				
		A	B	C	D	E
Velocidad	m/s	72.25	73.71	73.47	78.08	73.472
Presión	Pa	100829	100842	100841	103269	100855
Intensidad de turbulencia	%	171.66	24.61	19.66	132.79	132.79

Se consideraron 3 condiciones de simulación, la presión, velocidad y turbulencia, llegando a la conclusión que la mejor opción de diseño es el prototipo C ya que presenta menores pérdidas y mayor aprovechamiento del aire dentro del túnel.

3.2 DISEÑO DE TÚNEL DE VIENTO

El diseño del túnel de viento puede variar según los tipos o condiciones del mismo debido a esto en el capítulo anterior se realizó una tabla de condiciones para determinar qué tipo de túnel es el más eficiente en nuestro estudio. La facilidad en la construcción de un túnel subsónico está en que la recopilación de datos se la puede realizar instalando sensores, los cuales dependiendo de su posición y calibración muestran resultados más precisos.

La adquisición y el costo por los sensores no es elevado en comparación con el resto de los túneles de viento en donde su número de Match es superior, a la vez el manejo de información y recopilación de datos requieren un conocimiento mayor para llegar a analizarlo y por ende mayores costos, por tanto, para tener un ejemplo dentro de que rangos de velocidad se maneja un Match < 0.7 dentro de un túnel subsónico se procede a despejar la velocidad máxima:

$$\text{Match} = \frac{V_{\text{máx}}}{V_{\text{sonido}}} \quad [3.1]$$

Dónde:

V máx: velocidad máxima.

V sonido: velocidad del sonido.

Match = 0.7.

$$\text{Match} = 0.7 \quad \text{Match} = \frac{V_{\text{máx}}}{V_{\text{sonido}}}$$

$$0.7 = \frac{V_{\text{máx}}}{300 \text{ m/s}}; \quad V_{\text{máx}} = 0.7 \times 300 \text{ m/s}$$

$$V_{\text{máx}} = 210 \text{ m/s} = 756 \text{ km/h}$$

Esta fórmula se la realizo para ver que rangos de velocidades se pueden manejar un túnel de viento subsónico, dicho esto se llegó a la conclusión que un túnel de viento subsónico es suficiente para realizar las pruebas aerodinámicas.

La condición del túnel también se estudió en el capítulo anterior, ocupar un túnel abierto o cerrado fueron los aspectos a analizar. El túnel de viento cerrado es la mejor opción con respecto a su disposición, este tipo de túnel tiene conectada la entrada de aire con la salida, existe una recirculación continua de aire sin que exista entrada de aire del ambiente u otro flujo que intervenga en su interior.

La ventaja de utilizar un túnel de viento cerrado es que mediante esta aplicación algunas variables termodinámicas se las mantendrá controladas: presión, densidad y temperatura, con esto se tendrá menos pérdidas que un túnel de viento abierto, por el contrario, su instalación es más compleja y grande y la realización de esto puede afectar directamente a la parte económica por esto se descartó un túnel de viento cerrado y se escogió un túnel de viento abierto que tiene mejor accesibilidad de construcción y facilidad de instalación de elementos electrónicos.

La selección del prototipo de túnel de viento se lo realizó en función a los cinco modelos de diseños propuestos y sus respectivas simulaciones CFD realizadas en el software en el anterior capítulo (ver apartado 2.4) para cada uno de los prototipos propuestos, obteniendo como resultado el literal C, el cual cumple con todos los requerimientos necesarios y es el

mejor para su construcción considerando la velocidad, presión e intensidad de turbulencia en el túnel de viento, pues son puntos muy importantes que se tomaron en cuenta para su selección y posterior fabricación.

El dimensionamiento del túnel de viento del diseño C en la interfaz del software de SOLIDWORKS tiene las siguientes dimensiones; el difusor de entrada de aire del túnel contó con un dimensionamiento de 1105 mm de largo y 500 mm de alto. La cámara de análisis fue construida con un dimensionamiento de 800 mm de largo y 300 mm de alto. Finalmente, la parte del difusor salida de aire del túnel de viento tuvo una dimensión de 910 mm de largo y de 780 mm de alto así obteniendo la siguiente figura mostrada a continuación.

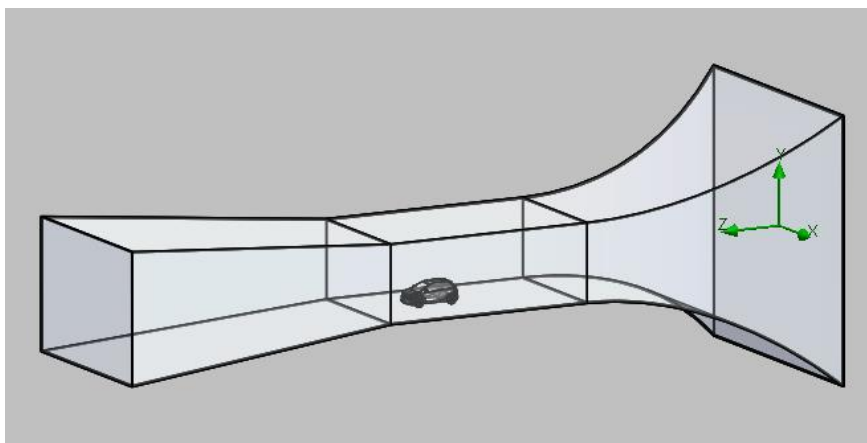


Figura 3.1 Diseño a construir del túnel de viento

La Figura 3.1 indica el túnel de viento ya diseñado con las medidas anteriormente descritas. Sin embargo, se debe diseñar una estructura debido a la distribución del peso, pues al ser más largo el difusor de entrada de aire, este puede generar inconvenientes de estabilidad.

- **Distribución de peso**

Para tener un diseño óptimo se analizó la distribución del centro de gravedad para los distintos modelos analizados, el mejor diseño es el que tiene el centro de gravedad más cercano a la cámara de análisis, por esta razón se seleccionó el diseño C, a continuación, se muestra la ubicación del centro de gravedad más alejado y cercano a la cámara.

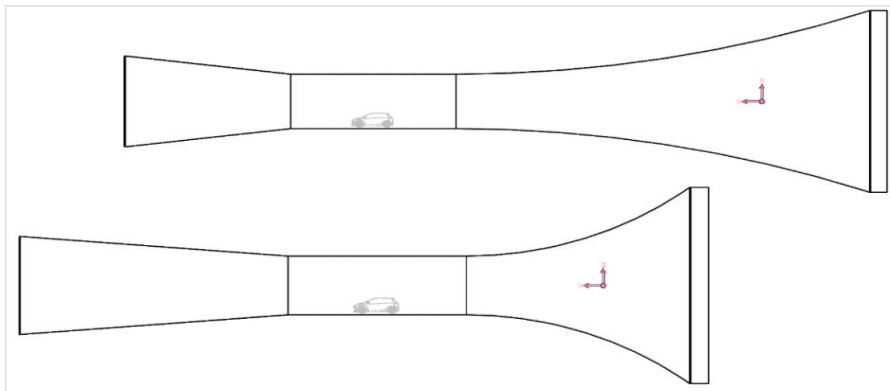


Figura 3.2 Distribución de peso

En la Figura 3.2 se puede observar la distribución de peso, así como la ubicación del centro de gravedad, gráfico superior diseño A, gráfico inferior diseño C. Una vez expuesto los siguientes argumentos para la selección del mejor diseño del túnel de viento se seleccionó el tipo C, para el mismo se adjuntan las planimetrías.

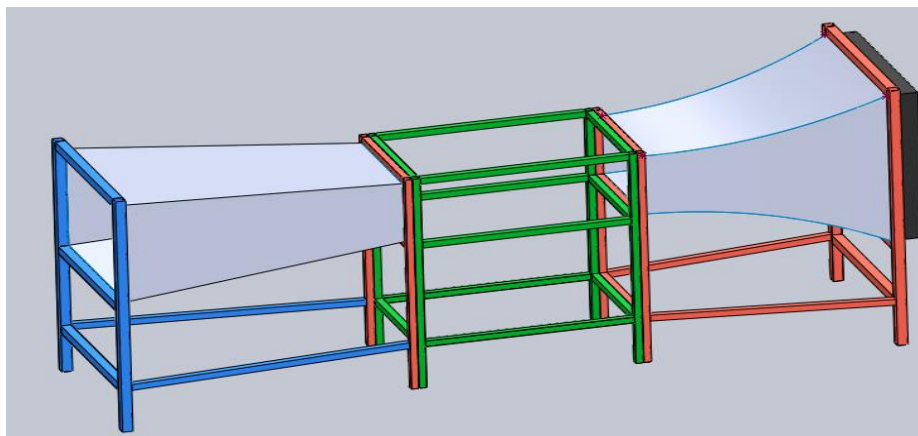


Figura 3.3 Prototipo del túnel de viento del diseño C

En la Figura 3.3 se puede observar el túnel de viento en una vista isométrica del diseño C, el cual nos refleja de una manera más detallada el túnel deseado para la presente investigación en cada una de sus secciones, pues el bosquejo de este tipo de túnel realizado en el software sirvió para su posterior construcción. Se puede notar que se diseñó la estructura para su construcción y en la sección de anexos se puede verificar los planos con los que se realizó el diseño de la estructura de una manera más detallada.

La geometría del diseño del túnel de viento jugó un papel muy importante en la funcionalidad de este, pues permitió alcanzar las velocidades deseadas y la reducción de pérdidas por efectos del túnel de viento. Asimismo, se tomó en cuenta que en cada una de las pruebas no

se extralimitara su área transversal, ya que de ser así exigiría mayor caudal de aire, conllevando al aumento del costo inicial del prototipo en su construcción.

3.3 SIMULACIÓN

La simulación a través de las pruebas CDF en la interfaz de SOLIDWORKS fueron muy importantes antes de proceder con la construcción del prototipo, pues se trató de simular el flujo de aire dentro del túnel y evidenciar los efectos positivos y negativos de cada uno de los diseños propuestos, siendo el idóneo el modelo del diseño C.

3.3.1 ETAPAS DE SIMULACIÓN

Para la simulación del prototipo en el software de SOLIDWORKS, se tomó en cuenta las etapas que se presentan a continuación:

- Pre-proceso.
- Cálculo.
- Post proceso.

En la etapa de pre-proceso, se ingresaron todas las condiciones iniciales del modelo dibujado, el método que más se utiliza en estos casos es el de elementos finitos, que se puede traducir en que cualquier cuerpo sólido puede dividirse en varios elementos pequeños que podrán ser analizados de manera individual para después mostrar un resultado final, por ejemplo, las condiciones iniciales son: flujo del aire, presión atmosférica, temperatura ambiente, entre otros. En el cálculo, se procedió a resolver las ecuaciones de cada análisis requerido previamente en el programa, por lo general el método mayormente utilizado es el de volúmenes o elementos finitos, siendo el primero el más factible y que de igual manera entrega datos precisos. Este método reemplaza a los cálculos mediante ecuaciones diferenciales que podrían llegar a ser muy difíciles de resolver.

Por último, la etapa de post proceso, indica todos los resultados que pueden ser apreciados en la ventana gráfica en donde se mostraron diagramas de temperaturas, presiones, velocidades, estos datos deberán ser próximos a los cálculos que se obtenga en la realidad siempre y cuando las condiciones iniciales se hayan ingresado de manera correcta.

Los valores mostrados en la Tabla 3.2 fueron las condiciones iniciales que se ingresaron en el programa con el fin de que de este mismo calcule y entregue los resultados de simulación. Todos los datos han sido calculados previamente.

Tabla 3.2 Parámetros de simulación

Parámetros de simulación	Valor	Unidad
Fluido para análisis	Aire	-
Presión atmosférica	101325	Pa
Velocidad del fluido	30	m/s

El fluido que se utiliza para las pruebas de simulación es el aire, la presión dada es la presión de la ciudad de Ibarra y su unidad es en Pascales, la velocidad que se le da al aire en el interior del túnel de viento es de 30 m/s, velocidad con la que se pueden realizar pruebas aerodinámicas.

- **Condiciones iniciales de simulación**

Para iniciar el proceso de simulación se introdujeron ciertos valores con los cuales se va a trabajar, para esto se debió tener activo los complementos de simulación en SOLIDWORKS, a continuación, se indicará el paso a paso de la simulación del túnel de viento a escala.

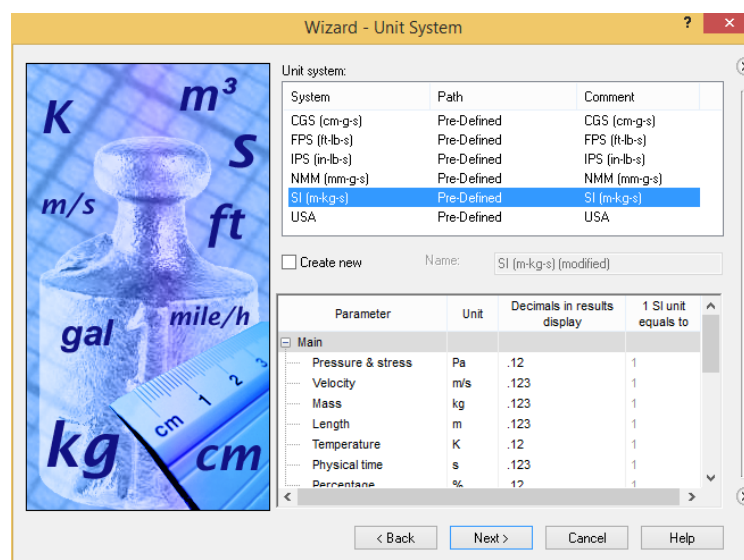


Figura 3.4 Cuadro de selección de sistema de unidades

Una vez activos los complementos de simulación se procedió a dar clic en la pestaña Wizard, en donde se ingresaron los valores. En la Figura 3.4 se puede denotar una tabla de unidades

en las cuales se pueden hacer los cálculos y después ver los resultados, por ello para este trabajo de grado se optó por trabajar en el sistema internacional de unidades ya que este sistema se lo utiliza en Ecuador, dependiendo de cada uno se procedió a la conversión de unidades al pasar de km/h a m/s o cambiar de °K a °C.

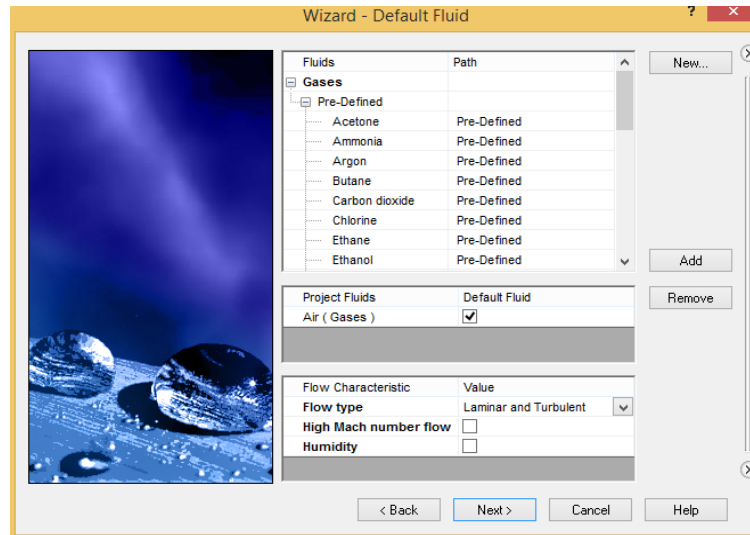


Figura 3.5 Cuadro de selección de fluidos a intervenir

La Figura 3.5 indica un cuadro de selección de fluidos, dentro del cual se eligió un análisis de flujo interno o externo. Se escogió esta opción debido a que el vehículo puesto a prueba no dispone de ningún orificio en el interior por donde pueda circular el flujo de aire. Seguidamente se introdujo los fluidos que van a intervenir en el análisis y se seleccionó el aire como fluido a intervenir.

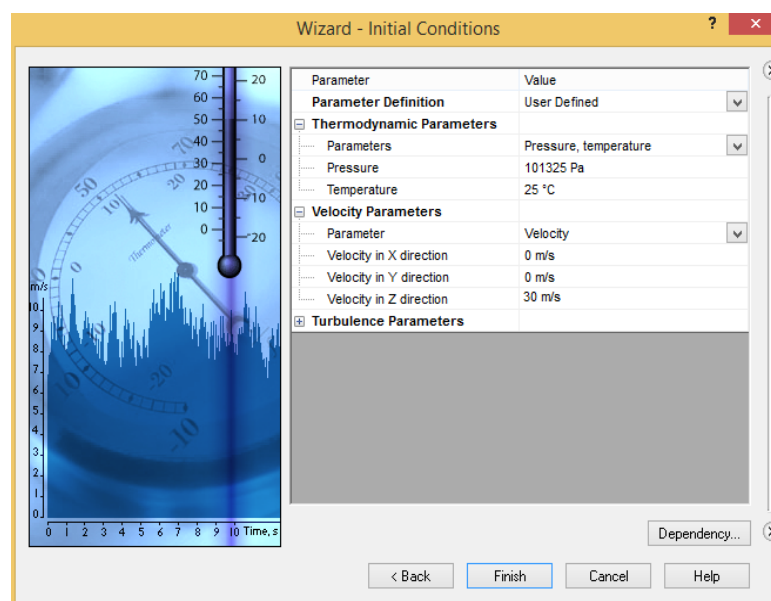


Figura 3.6 Cuadro de parámetros de presión y velocidad

En la Figura 3.6 se puede observar un cuadro de parámetros de presión y velocidad, en la pestaña de Wizard, donde se ingresaron los parámetros termodinámicos y de velocidad. Para el presente trabajo se ingresó en la presión un valor de 101325 Pa, valor que representa la presión atmosférica de la ciudad de Ibarra, en lo referente a la temperatura se ingresó un valor de 25 °C que de igual forma representa la temperatura de la ciudad de Ibarra. Para los parámetros de velocidad solamente se ingresó un solo valor en la dirección en donde se realiza el análisis, para este caso se seleccionó la dirección del eje Z con un valor de 30 m/s.

- **Interpretación entrada y salida del fluido**

Para llegar a un diseño óptimo del túnel de viento se debió seguir un proceso, en este caso una vez terminado de representar cada sección del túnel, se procedió a dibujar el túnel de viento ayudados del programa computacional SOLIDWORKS. Se continuó realizando una simulación CFD, donde el programa de simulación determinó a través de sus resultados cuál es el mejor prototipo para su construcción.

Para realizar un análisis, en este caso el aire debe ser aspirado por medio de un ventilador el cual debe encontrarse dimensionado para llegar a las condiciones de prueba requeridas, como también cada una de sus secciones para mantener un flujo estable del aire y reducir las pérdidas generadas en dicho túnel.

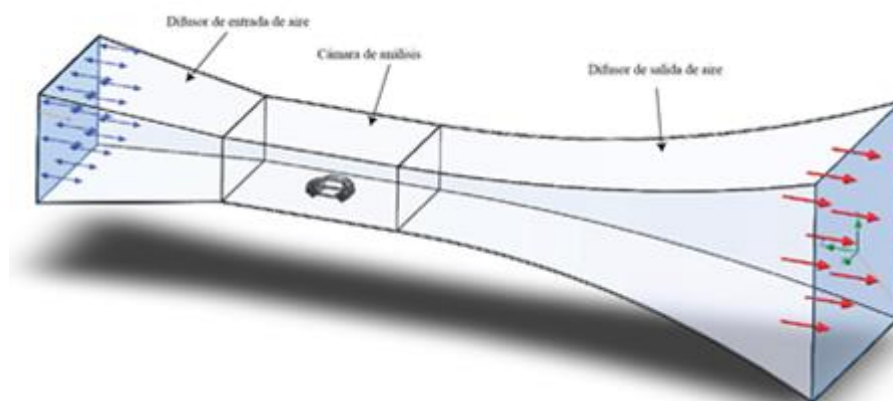


Figura 3.7 Diseño del túnel de viento de ciclo abierto

En la Figura 3.7 se observa unas flechas de color rojo y azul, esto indica la dirección que tomará el viento en la simulación, las flechas azules corresponden a las condiciones de simulación, esto indica la presión atmosférica y las flechas rojas representan a la velocidad

del fluido (viento) de salida. Para la simulación, se utilizó el módulo de CFD FLOW SIMULATION del programa SOLIDWORKS, en el mismo se modeló y se realizó el proceso de pre y post - procesamiento y solución.

- **Post proceso**

Dentro de la etapa de post proceso se ha omitido la parte del cálculo, puesto que el software SOLIDWORKS 2017 realiza los cálculos según su programación, pero estos no los muestra, sino que este indica los resultados de manera directa solo con ingresar las condiciones iniciales.

Durante el proceso de simulación se ingresaron parámetros de presión, velocidad, temperatura y densidad del aire que permitieron verificar el funcionamiento del túnel de viento. En la Tabla 3.3 se detallan los resultados obtenidos mediante la simulación por computadora.

Tabla 3.3 Resultados de la simulación

Nombre	Mínimo	Máximo
Presión (Pa)	97743.4	100841.3
Temperatura (°C)	25	28
Densidad (kg/m ³)	1.16	1.20
Velocidad (z)(m/s)	13.3	73.4

El resultado presenta los siguientes valores; una presión mínima de 97743.4 Pa en la cámara de análisis y a la vez la velocidad máxima en esta sección de 73.4 m/s, contrastando al teorema de Bernoulli en un tubo Venturi en este caso al túnel de viento. Una presión máxima de 100841.3 Pa en el difusor de entrada de aire y en una pequeña sección del difusor de aire de salida y a su vez una velocidad mínima de alrededor de 13.3 m/s lo cual constata el teorema.

La temperatura al interior del túnel de viento en si no varía demasiado sino a 25 °C y dependiendo de la velocidad y la humedad que genere la cámara de humo llega a valores de 28 °C. La densidad muestra un valor de 1.16 kg/m³ hasta una densidad máxima de 1.20

kg/m³, esto se debe al espesor que produce la cámara de humo especialmente a partir de la cámara de análisis hasta el difusor de salida de aire.

3.4 CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO

La construcción del túnel de viento se encuentra sustentada en el diseño previamente realizado en el software SOLIDWORKS, mismo que especifica las medidas de cada una de las secciones que conforman el túnel de viento, siendo estas el:

- Difusor de entrada de aire.
- Cámara de análisis.
- Difusor de salida de aire.



Figura 3.8 Construcción del túnel de viento

En la Figura 3.8 se puede observar el prototipo de túnel de viento ya realizado en función al dimensionamiento del software de SOLIDWORKS. A continuación, se detalla cada una de sus secciones.

3.4.1 BASE DEL TÚNEL DE VIENTO

Esta estructura metálica fue la encargada de servir de soporte al túnel de viento, para la construcción se utilizó hierro angular de una pulgada, se cortó hierro según el plano incluido en la sección de anexos y se procedió a unir con suelda eléctrica.



Figura 3.9 Base del túnel de viento

La Figura 3.9 indica la base del túnel de viento construida, debido al tamaño del túnel de viento la distribución de pesos hace que el difusor de aire de salida dónde se encuentra el ventilador sea más pesado, razón por la cual se construyó una estructura resistente que ayude a mantener estable toda la maqueta, la estructural sirve de base y columna al túnel de viento.

3.4.2 DIFUSOR DE ENTRADA DE AIRE

Para la construcción del difusor de entrada, se empleó cuatro pedazos de madera flexible con un espesor de 1 mm, la unión de la madera con la estructura del difusor se lo realizó mediante pernos, logrando de esta manera conseguir una mayor sujeción entre estas dos partes.



Figura 3.10 Difusor entrada de aire

En la Figura 3.10 se puede observar la sección del difusor de entrada de aire ya elaborado. Una vez concluida con la estructura del túnel de viento se procedió a cortar la madera según las medidas establecidas y posterior a esto se realizó la sujeción de cada madera mediante pernos y silicona, con la finalidad de conseguir un cierre hermético y a su vez evitar que existan fugas de aire las cuales ocasionarían problemas al momento de ejecutar las pruebas. Esta sección se encuentra pintada de color negro y permite el ingreso del aire del exterior al interior del túnel.

3.4.3 CÁMARA DE ANÁLISIS

Para la construcción de esta sección se utilizó como material principal el vidrio, mismo que posee 10 mm de espesor. A diferencia de las otras secciones del prototipo, la cámara de análisis tuvo que contar con una característica esencial la cual es la facilidad para visualizar su interior durante las pruebas.



Figura 3.11 Cámara de análisis

La Figura 3.11 muestra la sección de la cámara de análisis ya elaborada, misma que permite observar el comportamiento del flujo de aire en las pruebas realizadas sobre los automóviles a escala. Para la construcción de esta sección se cortó el vidrio dependiendo de las medidas señaladas para después unirlos a la estructura con silicona limpiando cada borde sin que esta salga por los lados, esta sección no se pinta ya que debe ser visible para observar las pruebas.

3.4.4 DIFUSOR DE SALIDA DE AIRE

Esta sección se consideró como la más importante ya que aquí se colocó el ventilador, por ende, sus dimensiones son mayores a las del difusor de entrada, además esta sección ayuda a la salida del aire una vez ya realizada las pruebas.



Figura 3.12 Difusor salida de aire

En la Figura 3.12 se puede apreciar el difusor de salida de aire ya construido, para ello los principales materiales que se utilizaron para su elaboración fueron la madera de 10 mm de espesor y los tubos cuadrados. Al igual que el difusor anterior una vez concluida la estructura se procedió a colocar las láminas de madera para después sujetarlas con pernos tal y como se lo realizó con el difusor de entrada de aire. Esta sección permite la salida del aire que es aspirado por el ventilador.

3.4.5 INSTALACIÓN ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

En este apartado se detallan todos los componentes eléctricos y electrónicos que se implementaron como complementos al túnel de viento, con la finalidad de tener un buen funcionamiento del túnel en cada una de las pruebas que se desarrollaron.

3.4.5.1 Sistema de control

Para iniciar el proceso de instalación eléctrica y electrónica se debió tener claro, la función que debe cumplir cada uno de los instrumentos a utilizar, es decir, quienes serán los encargados de obtener, procesar y enviar la información. A continuación, se detalla en un mapa cada una de las etapas y los elementos a utilizar y su dirección en la función.

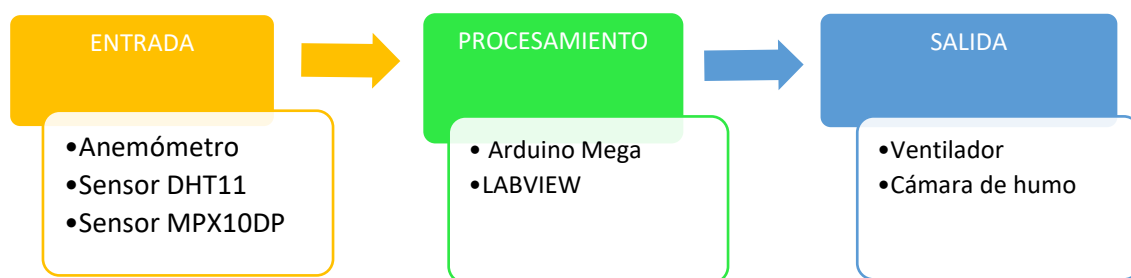


Figura 3.13 Diagrama de instalación electrónica

La Figura 3.13 indica el diagrama de instalación electrónica en sus diferentes etapas. Dentro de la etapa de entrada corresponde a los sensores ya que estos son los encargados de recibir señales del entorno y responder a otro sistema. El Arduino Mega se halla en la etapa del procesamiento ya que por aquí se reciben las señales que llegan desde los distintos sensores, velocidad, temperatura y presión.

Por último, la etapa de salida consiste en el ventilador y la cámara de humo, donde una vez recibida la información y hecho el procesamiento dentro de Arduino Mega envía la señal para su funcionamiento dependiendo de las características de la programación.

- **Flujograma electrónico para Arduino**

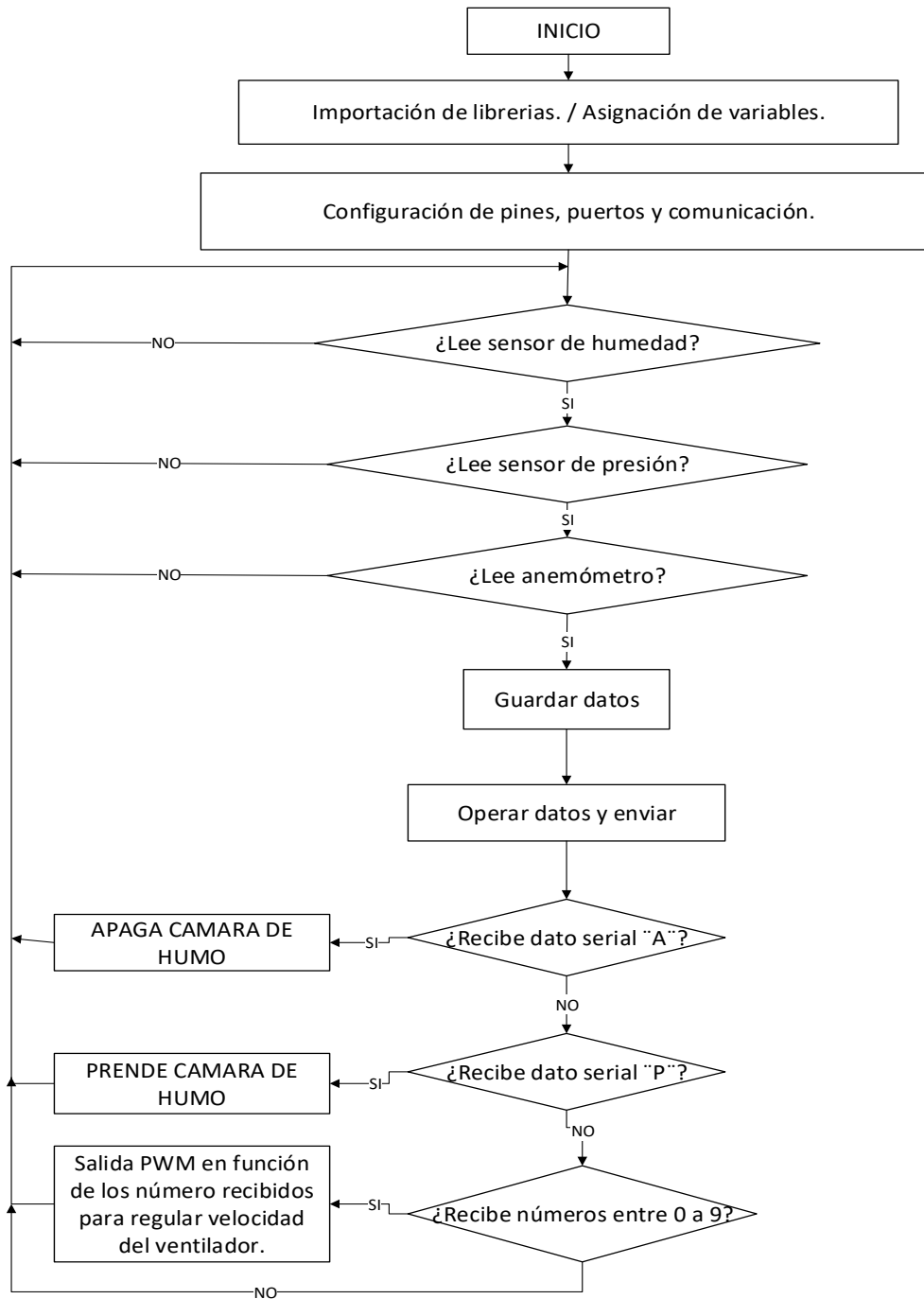


Figura 3.14 Flujograma electrónico

La Figura 3.14 corresponde al flujograma que se utilizó para la instalación electrónica, pues este detalla el proceso de trabajo del Arduino donde inicia importando librerías y asignando variables. Todo esto se lo hace a través de una línea unidireccional, luego de esto pasa a configurar los pines y puertos. Posteriormente, se inicia el proceso de comunicación

entrando netamente en el algoritmo, mediante la línea unidireccional que se une hacia los tres sensores, en donde al leer cada uno de los sensores pasa al siguiente bloque en el cual se guarda la información de los sensores por individual. Luego de esto, se operan los datos y se envían a través de un puerto USB hacia el software de LabVIEW. El programa que a la vez remite información también hace el proceso de recepción de información para prender o apagar la cámara de humo, puesto que si recibiera un dato serial A la cámara de humo dejará de funcionar. Pero si ingresara el dato serial P, la cámara de humo se pondría en funcionamiento.

La actualización de los datos se lo hace en tiempo real ya que una vez enviada la información vuelve a actualizarse, para el funcionamiento del ventilador de igual manera se recibe información en números de 0 a 9 que sirven para regular el caudal del ventilador.

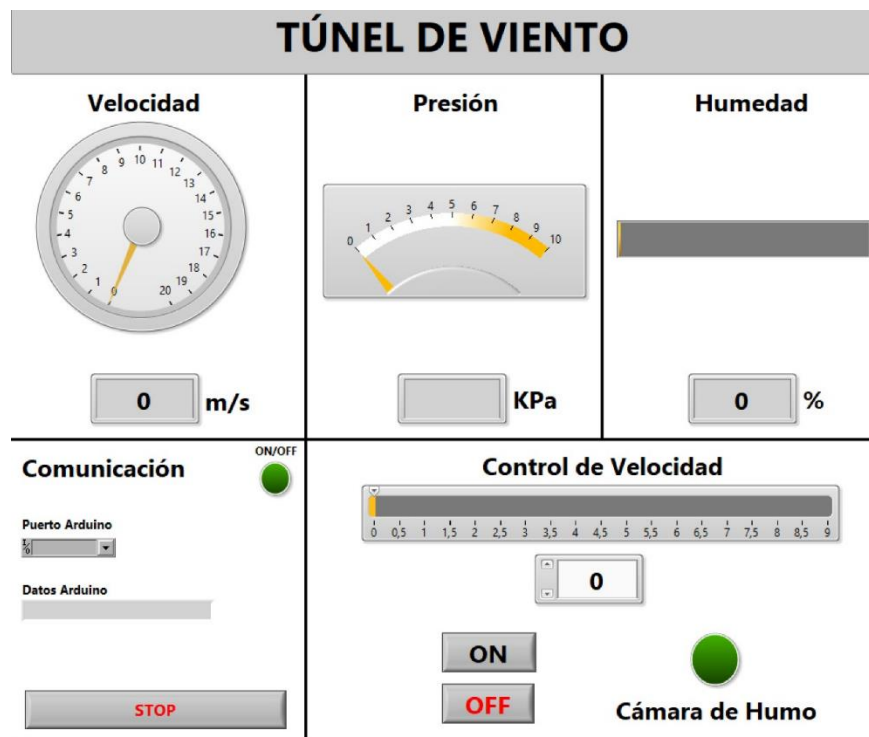


Figura 3.15 Panel frontal de control

La Figura 3.15 muestra el panel frontal creado para la visualización de datos cuando el túnel de viento entre en funcionamiento. Los cuadros superiores indican los resultados obtenidos durante las pruebas, los cuales deben ser idénticos a los resultados de la simulación. Los cuadros inferiores sirven de control para la manipulación de la cámara de humo y regular la

velocidad del ventilador. El cuadro de comunicación sirve para conectar el Arduino a LabVIEW a través de un puerto USB, en caso de existir algún fallo o error de la comunicación se dispuso un botón de stop que detendrá de manera instantánea el programa.

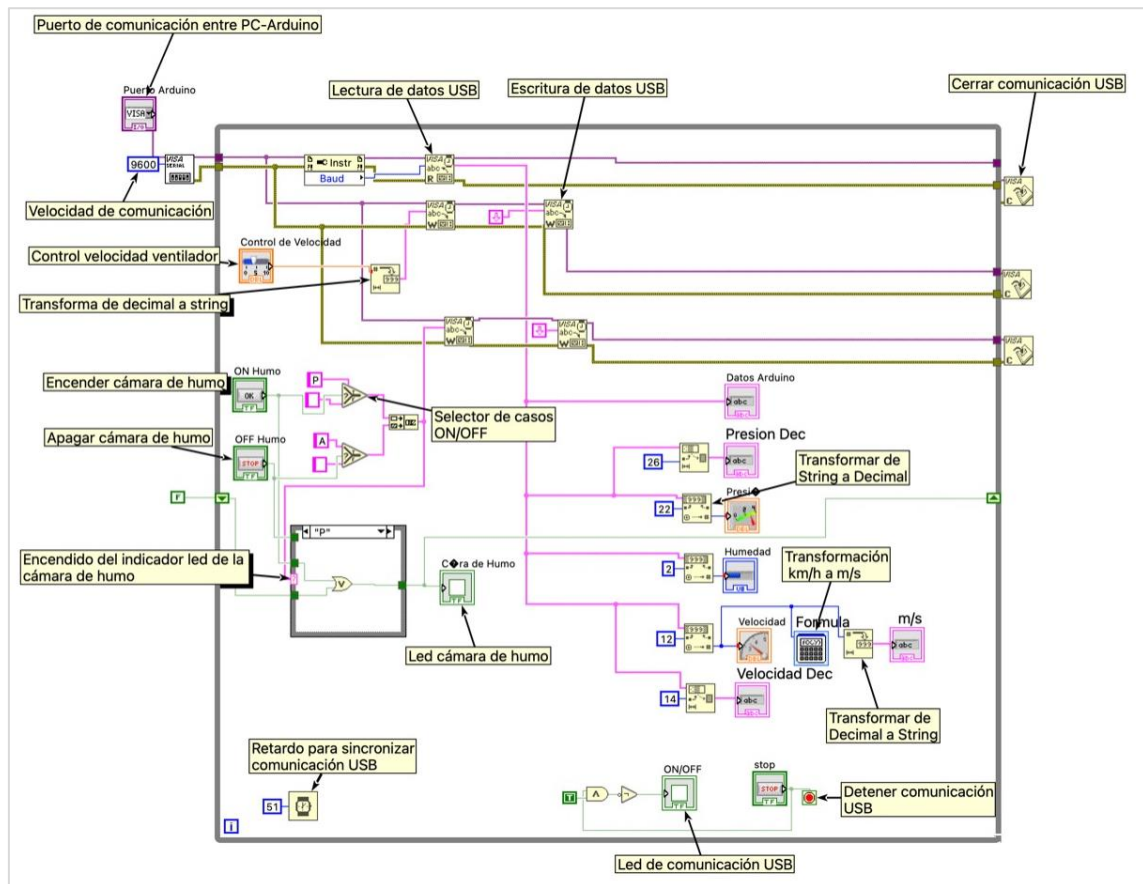


Figura 3.16 Panel de bloques

La Figura 3.16 denota el diagrama de bloques utilizado para la creación del panel de control principal. Inicialmente, se procedió a colocar bloques según correspondiera la función de cada uno de ellos empezando por un bloque que sirvió de comunicación entre la PC y el Arduino. Después de esto, pasamos a crear otro bloque el cual leyó los datos que llegan del Arduino. La entrada de comunicación debe ser transformada a String para su procesamiento. Aquí interviene un bloque de String que realiza este proceso.

Asimismo, se colocó un bloque de selector de casos para encender y apagar la cámara de humo, pues cuando el serial lee la letra A, la cámara de humo se apagará. Por el contrario, si lee el serial P, la cámara de humo se encenderá. Cada programa tiene su tiempo de procesamiento y esto puede retrasar o aparentemente indicar que no avanza la programación,

por eso se colocó un bloque de retardo de comunicación. Esto hace que tenga un tiempo limitado para la comunicación USB y así evitar que suceda lo antes mencionado.

Para que el programa sea repetitivo sin tener que dar clic para nuevamente avanzar, se utilizó un ciclo while que hace que el código siga su trabajo repetidamente hasta cumplir una condición.

3.5 VALIDACIÓN DE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN CON LA SIMULACIÓN

Cabe mencionar que, para las pruebas realizadas anteriormente en la selección de túnel de viento a construir, se utilizaron velocidades elevadas que puedan justificar la aerodinámica al interior del túnel. Para la validación de la simulación con programación en el túnel de viento ya construido se trabajó a escala debido a que en el sector comercial no existe un ventilador capaz de generar una velocidad de 73 m/s.

Para esto se proporciona la siguiente imagen que es un método de verificación de escala en donde la figura 3.17 proporciona una velocidad de entrada de 30 m/s llegando hasta una velocidad de 73 m/s que pasado a escala 1:18 llega a una velocidad 1.5 m/s. Este dato se ingresó como la velocidad del viento en la entrada del túnel el viento ya construido, y velocidad con la que se procedió a realizar la simulación.



Figura 3.17 Simulación con velocidad a escala

La Figura 3.17 representa la simulación en donde la velocidad se la hizo a escala 1:18 y se aplicó la velocidad de entrada de 1.5 m/s. Al realizar la simulación se obtuvo como resultado que conforme va circulando el aire, su velocidad va en aumento ya que esto se debe a la reducción del túnel de viento, mostrando así el efecto Venturi en donde a menor espacio

mayor velocidad del fluido. Concluyendo que, en la cámara de análisis llega una velocidad de 4 a 5 m/s velocidad que debe ser plasmada en la pantalla del computador una vez instalados los sensores.

- **Pruebas de funcionamiento del túnel de viento**

Una vez concluida con la construcción del túnel de viento se pone a prueba cada uno de los componentes instalados para verificar si trabajan de manera adecuada y cumplen con los requerimientos establecidos.



Figura 3.18 Túnel de viento concluido

La Figura 3.18 indica la maqueta del túnel de viento culminada para ejecutar las pruebas aerodinámicas, las instalaciones eléctricas y electrónicas se las llevaron a cabo sin ningún problema salvo la instalación del sensor de presión el cual se lo detallara más adelante.

- **Prueba de funcionamiento del panel de control**

En el panel de control del computador se puede verificar si cada uno de los interruptores funciona correctamente una vez realizadas las conexiones. La Tabla 3.4 indica si el funcionamiento es el correcto o incorrecto dependiendo de las pruebas.

Tabla 3.4 Funcionamiento de controles de operación

Controles	Funcionamiento
On/Off Máquina de humo	Correcto
Control de velocidad del ventilador	Correcto
Stop de comunicación	Correcto
Lectura de sensores	Correcto

Después de poner a prueba los controles del panel frontal se puede poner en evidencia que no existe ninguna falla y el funcionamiento de cada control es el correcto, así como la lectura de los sensores.

- **Pruebas de funcionamiento del ventilador**

Antes de colocar el ventilador en el túnel de viento se debe comprobar la velocidad y hasta qué punto máximo llega, esto se lo hace a través del anemómetro. La Tabla 3.5 indica las velocidades que alcanza el ventilador.

Tabla 3.5 Velocidad del ventilador

Velocidad Real (m/s)	Velocidad a Escala (m/s)
18	1
36	2
54	3
72	4
90	5

Las velocidades del ventilador que se leen en el anemómetro coinciden con los valores a lo que se debe encontrar en la cámara de análisis del túnel de viento es decir que el ventilador cuenta con la velocidad necesaria para realizar las pruebas aerodinámicas por ende se procede a colocar el ventilador en el túnel de viento.

- **Pruebas de funcionamiento de la Máquina de humo**

Previamente al realizar las pruebas de funcionamiento se debe revisar el depósito de líquido, el cual debe estar sobrepasando el 50 % de su capacidad para que su funcionamiento sea eficiente.

La máquina de humo posee un modo de operación de espera de 3 minutos aproximadamente, debido a que esta tiene que cargarse para generar el humo necesario, esta máquina emite un flujo de humo durante un minuto, después de esto se debe esperar de 2 a 3 minutos para volverla accionar.

Una vez concluida con las pruebas de funcionamiento si se observa que el flujo del humo es el correcto se procede a la instalación dentro del túnel de viento. El flujo del humo al salir de la máquina y al dispersarse por el interior del túnel se vuelve turbulento es por eso que a la salida de la máquina se colocó un tubo de aluminio para lograr que el flujo del humo sea lo más laminar posible teniendo respuestas satisfactorias.

Una vez finalizadas las pruebas se debe vaciar el fluido del conducto de la cámara ya que esto evita que el fluido se coagule dentro del conducto, otro punto acerca de la máquina de humo es que cada tres pruebas se debe realizar un mantenimiento, esto debe hacerse llenado el depósito con vinagre blanco encenderlo y hacerlo funcionar para que se limpien los filtros y conductos de la máquina de humo.

- **Lugar de instalación del túnel de viento**

Para realizar la instalación del túnel de viento lo más recomendable es adaptarlos según las normas de seguridad industrial.

- Ubicar en un espacio grande libre de polvo.
- Colocar en un espacio libre de luz puesto que el túnel de viento cuenta con luz y la luz exterior puede interferir la visualización del flujo de aire.

- **Condiciones de trabajo ambientales**



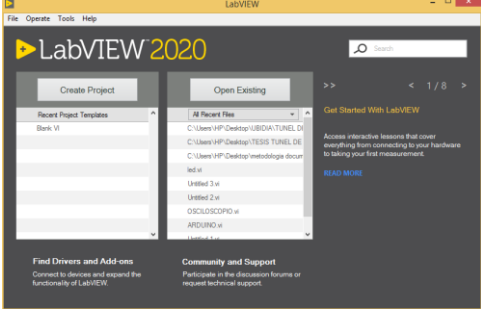
- Temperatura entre 10° y 30°.
- Mantener seco y limpio el lugar de trabajo.

- Ubicarlo cerca de un tomacorriente de 120 V.

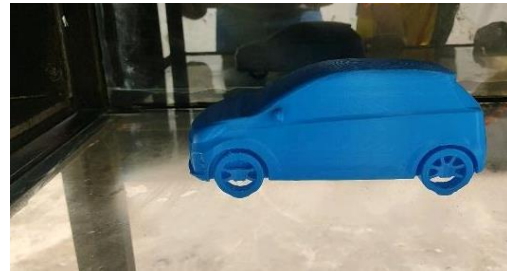
3.5.1 INSTRUCCIONES DE FUNCIONAMIENTO DEL TÚNEL DE VIENTO

En la Tabla 3.6 se describen los pasos de cómo utilizar el túnel de viento partiendo desde la revisión hasta llegar a la realización de pruebas, se cree importante realizar esta sección ya que servirá para que los estudiantes puedan realizar sus prácticas mediante la utilización de este túnel de viento.

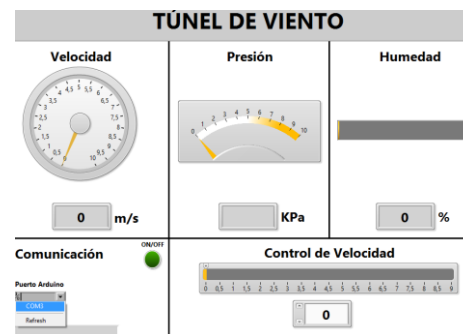
Tabla 3.6 Pasos para manipular el túnel de viento

Pasos	Fotos
<p>Revisar la caja de elementos y verificar que las conexiones se encuentren conectadas correctamente.</p>	
<p>Revisar que la máquina de humo se encuentre con el líquido suficiente y tener en cuenta que después de cada prueba debe ser vaciado el fluido del conducto.</p>	
<p>Conectar el puerto USB al computador y abrir el programa de LABVIEW.</p>	

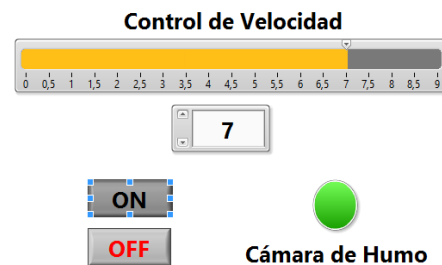
Colocar el vehículo que se va a realizar las pruebas dentro de la cámara de análisis y encender la luz que se encuentra en este compartimiento para observar de mejor manera la dirección del flujo de aire.



Una vez abierto el programa de LABVIEW, dirigir el cursor del mouse hacia el cuadro de comunicación, ahí es donde se elegirá el puerto que comunica LABVIEW con el Arduino mega. Una vez seleccionado esperar hasta que lea el puerto y aparezca un código en la parte inferior.



Concluido el paso anterior se puede dar clic en el botón de correr el programa, el control de velocidad se lo puede activar a través del teclado, así como la máquina de humo, teniendo en cuenta que esta debe estar cargada.



Ya encendidos todos los elementos del túnel de viento se puede observar como el flujo de aire pasa a través del vehículo formando una capa en el entorno, en este punto puede ver las diferencias de un vehículo con otro.



3.5.2 ANÁLISIS DE RESISTENCIA AERODINÁMICA

Dentro de la aerodinámica vehicular se encuentra presente como objetivo un conjunto de efectos y acciones que ejerce el aire sobre el vehículo cuando este se encuentra en movimiento, y así analizar que dichos efectos sean lo mas favorables posibles para el rendimiento del automóvil. De estos pueden distinguirse dos tipos de flujo:

1. Flujo de aire que circula a través de compartimentos del vehículo.
2. Flujo de aire externo.

En el presente trabajo de tesis se analizó el segundo item; el flujo de aire que circula sobre las superficies externas al vehículo, en donde se puede producir zonas de depresión o presión asi como de rozamientos viscosos con las paredes. Todo esto puede originar esfuerzos que influyen en el avance del vehículo, además de producirse cargas sobre las ruedas e inestabilidad del automóvil.

Sin embargo, a pesar de que cada uno de los aspectos aerodinámicos en los vehículos se estudiaron desde el inicio de la era automovilística, la época denominada crisis del petróleo hizo incrementar aún mas la atención a estos problemas, ya que teniendo un auto que circule a 100 km/h su resistencia aerodinámica representara al 80 % de la resistencia total en los vehículos de medio tamaño.

Pese a esto, todos los tipos de vehículos plantean problemas aerodinámicos, siendo críticos en distintos aspectos, por ejemplo en vehículos de turismo la preocupación durante los últimos años es la reducción de la resistencia al avance, por cuestiones de economía. En el caso de furgonetas o microbuses, existen problemas que requieren mas atención como la sensibilidad al viento lateral. En el caso de los vehículos de competición la fuerza de tracción se convierte en una problemática, en dónde se hace necesario la implementación de elementos que produzcan una sustentación aerodinámica negativa.

Mientras tanto a la aerodinámica se la considera clave durante el diseño de aeronaves, para los vehículos del sector comercial, las demandas respecto a sus prestaciones, confort, seguridad, estilo, comportamiento direccional y posibles problemas de producción disminuye su importancia.

- **Flujo exterior**

Si se considera que el aire se encuentra en reposo o bien este se mueve a una velocidad dada frente al vehículo, se puede suponer que este se encuentra estático y el aire se mueve respecto al automóvil con una velocidad constante con la que el vehículo se desplaza, pues alrededor del vehículo se genera un campo de flujo. Existen zonas en donde no se producen separaciones entre la superficie del vehículo y el fluido, en donde se genera una capa límite de un espesor de milímetros que es gobernado por la viscosidad del aire.

- **Resistencia al avance**

El valor C_x coeficiente de resistencia puede verse afectado dependiendo de los factores de diseño: techo, partes laterales, spoilers delantero y trasero, inclinación del parabrisas, remolques, posible equipaje en techo, etc. En donde su análisis requiere mayores límites de trabajo. Sin embargo se presentan valores con los cuales se puede observar la influencia que tiene sobre los diseños y partes del vehículo en el coeficiente de resistencia, pues se debe tener en cuenta dichas influencias interdependientes entre sí, dicho esto en el diseño de un vehículo han de apreciarse todas las zonas y partes.

Cabe recalcar que no existe hasta el momento ningún modelo teórico preciso que pueda predecir la resistencia aerodinámica como también las acciones de la naturaleza. Por esta razón, los resultados experimentales vienen a constituir una fuente importante de conocimientos y datos sobre la influencia de distintas variables geométricas. La resistencia aerodinámica depende de la acción del flujo de aire que circula sobre el vehículo. La proporción que cada una de las resistencias pueda influir en la acción global, depende de la lisura de las superficies y del cuerpo en sí.

- **Influencia en la parte posterior del vehículo**

Una forma de representar la resistencia al avance es identificando las formas más frecuentes de perfiles longitudinales de la parte posterior del vehículo.



Figura 3.19 Formas traseras usuales de los vehículos
(Bermeo, Sigüencia, & Serpa, 2012, pág. 121)

Cada una de las formas visualizadas en la Figura 3.19 pueden causar distintos tipos de flujos que pueden afectar a la presión en la parte trasera. Aquí, la tipo A donde la parte posterior es inclinada se produce un flujo con dos vórtices dirigidos en dirección longitudinal. La tipo B para furgonetas y autos de tipo familiares en donde la parte posterior es cuadrada se suelen producir separaciones que forman vórtices en dirección transversal al vehículo. La parte trasera tipo C es en donde la parte posterior es escalonada y se produce una mezcla entre las dos mencionadas anteriormente.

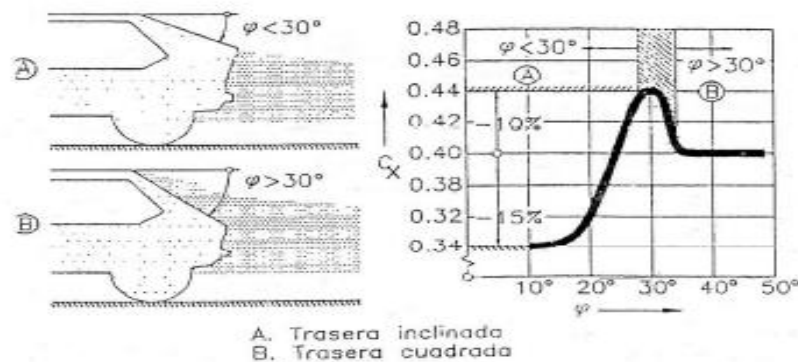


Figura 3.20 Influencia aerodinámica del C_x según su parte trasera
(Bermeo, Sigüencia, & Serpa, 2012, pág. 122)

La Figura 3.20 muestra el cambio de C_x dependiendo del ángulo trasero que puede presentar cada vehículo donde si llegara a un ángulo menor a 30° grados denota que es inclinado, si el valor excede los 30° grados su parte trasera es cuadrada.

En la Tabla 3.7 detalla el Cx dependiendo del ángulo de la parte trasera del vehículo, indicando que si un vehículo tiene un ángulo menor a 30° el coeficiente aerodinámico Cx se reducirá, mientras que un vehículo que posee ángulos de 30° a 40° grados, el Cx se mantendrá moderado, es decir mantendrá su rango. Mientras que si el ángulo es mayor a 40° el aire que viaja por el techo se despegará al final y se encontrará en ese estado haciendo que Cx sea malo.

Tabla 3.7 Incidencia Cx según la forma trasera del vehículo

Forma trasera del vehículo	Cx
Inclinado	Bajo
Escalon	Alto
Cuadrado	Moderado

3.5.3 CÁLCULOS DE COEFICIENTES AERODINÁMICOS

Para calcular el coeficiente aerodinámico de los vehículos planteados a continuación se aplicó la siguiente fórmula.

$$C_x = \frac{2F_d}{\rho v^2 A} \quad [3.2]$$

Donde:

F_d: Fuerza de arrastre del vehículo.

ρ: Densidad de masa del fluido.

V: Velocidad del flujo del objeto en relación al fluido (vehículo).

A: Área del vehículo.

- **Densidad**

Para obtener el dato de la densidad del aire se recurrió al libro de transferencia de calor de Cengel.

Propiedades del aire a la presión de 1 atm							
Temp., $T, ^\circ\text{C}$	Densidad, $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico, $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica, $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica, $\alpha, \text{m}^2/\text{s}^2$	Viscosidad dinámica, $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática, $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-6}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946

Figura 3.21 Propiedades del aire

Fuente: (Cengel & Cimbala, 2006, pág. 894)

En la Figura 3.21 se señala la temperatura de 25 °C del aire a una presión de 1 atm, cuya densidad es de 1.184 kg/m³. Este dato de la densidad se aplica a cada una de las fórmulas planteadas para la realización del cálculo del coeficiente aerodinámico.

- **Velocidad**

Se tomó como referencia una velocidad promedio de 150 km/h, cuyo valor hace que influya apreciablemente la aerodinámica. Esta velocidad hace referencia a la velocidad del fluido.

Vehículo N°1

- Fuerza de arrastre

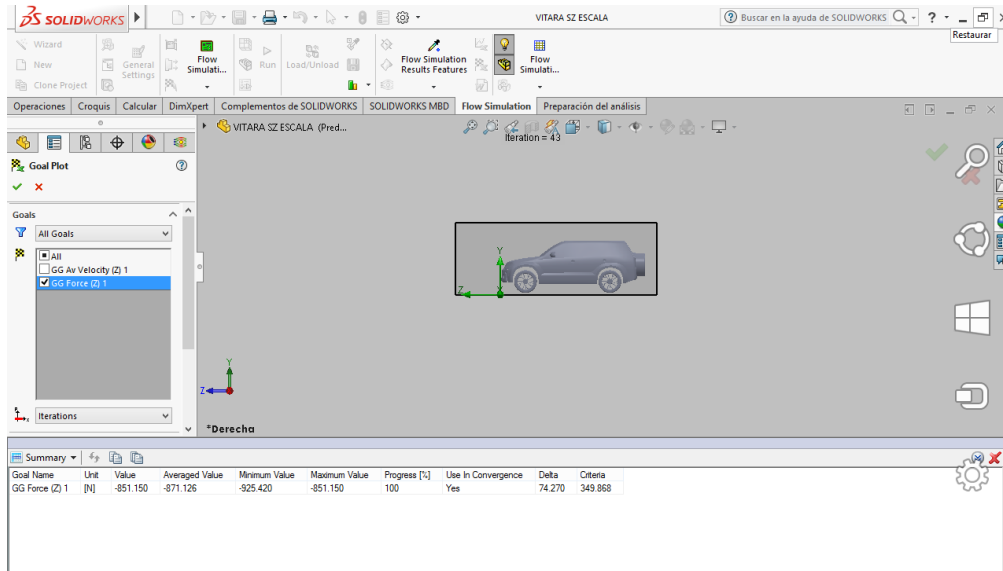


Figura 3.22 Fuerza de arrastre – Vehículo N°1

Para el cálculo de la fuerza de arrastre se realizó una simulación en SolidWorks. En la Figura 3.22 se aprecia el resultado que se obtuvo como fuerza de arrastre, siendo de 871.12 N, el cual representa el valor promedio para realizar los cálculos del coeficiente aerodinámico.

- Área del vehículo

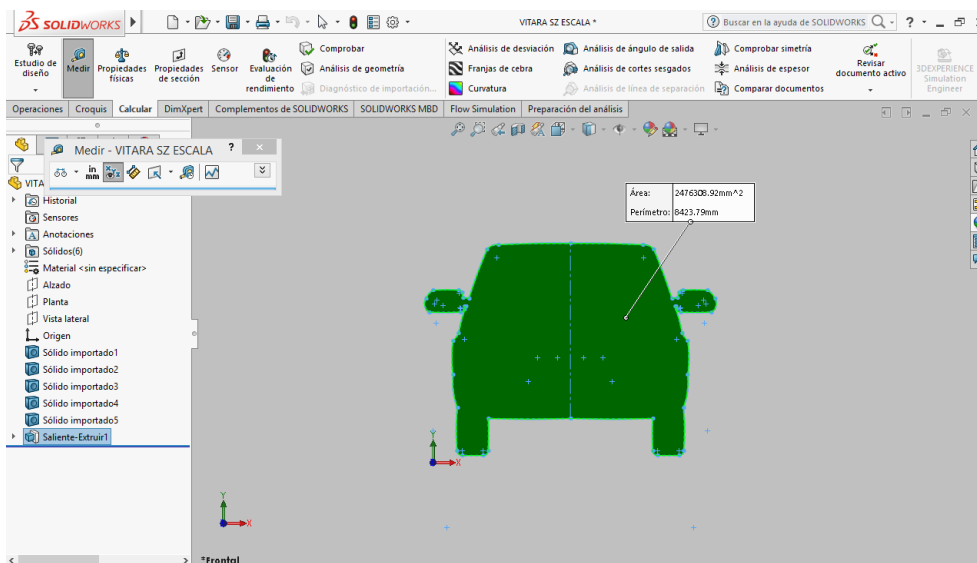


Figura 3.23 Área del vehículo – Vehículo N°1

Para determinar el dato del área del vehículo, se utilizó la herramienta de SOLIDWORKS, tal como se muestra en la Figura 3.23. En la vista frontal se creó un plano manteniendo una distancia, después se realizó el dibujo del contorno del vehículo para luego extruirlo a 0,01 mm, una vez realizado esto se obtuvo el área de 2476308.92 mm².

Cálculo coeficiente aerodinámico: Para ello se reemplazaron valores en la Ecuación 3.2.

F_d: 871.12 N

ρ: 1.184 kg/m³

V: 150 km/h = 41.6 m/s

A: 2476308.92 mm² = 2.47 m²

$$C_x = \frac{2F_d}{\rho v^2 A}$$

$$C_x = \frac{2(871.12 \text{ N})}{1.184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (41.6 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 (3.50 \text{ m}^2)}$$

$$C_x = \frac{1742.24 \text{ N}}{5060.98 \text{ N}}$$

$$C_x = 0.34$$

Vehículo N° 2

- Fuerza de arrastre

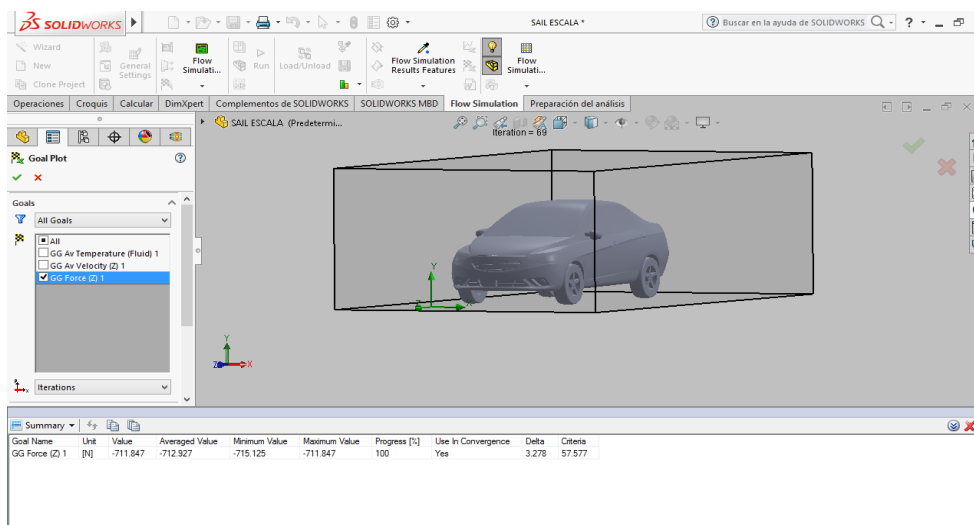


Figura 3.24 Fuerza de arrastre – Vehículo N°2

Al igual que en la sección anterior, para determinar el coeficiente aerodinámico se utilizó el programa SOLIDWORKS y se realizó una simulación activando los goal plots, datos que se requirieron conocer en la simulación tal como indica la Figura 3.24. Para el vehículo N° 2 se obtuvo una fuerza de arrastre de 712.927 N.

- **Área del vehículo**

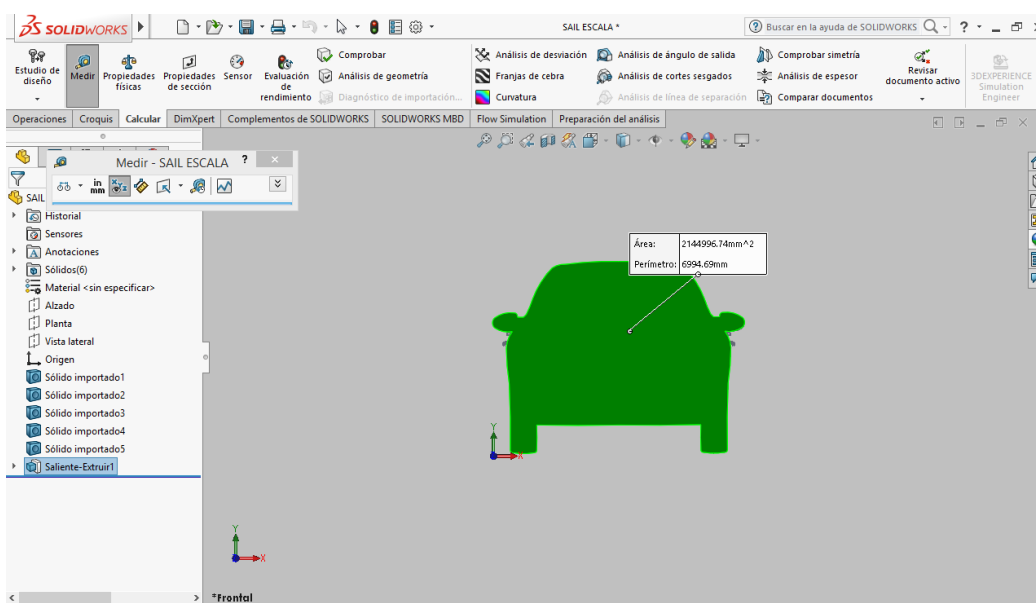


Figura 3.25 Área del vehículo – Vehículo N°2

Para determinar el área del vehículo N°2, se graficó el contorno frontal del vehículo realizando un nuevo croquis. Una vez terminado se lo extruyó y se calculó el área mediante el programa. En la Figura 3.25 se muestra el área de 2144996.74 m².

Cálculo coeficiente aerodinámico:

Datos:

F_d: 712.927 N

ρ: 1.184 kg/m³

V: 150 km/h = 41.6 m/s

A: 2144996.74 mm² = 2.14 m²

Todos estos valores fueron sustituidos dentro de la Ecuación 3.2.

$$C_x = \frac{2Fd}{\rho v^2 A}$$

$$C_x = \frac{2(712.927 \text{ N})}{1.184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (41.6 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 (2.14 \text{m}^2)}$$

$$C_x = \frac{1425.84 \text{ N}}{4384.82 \text{ N}}$$

$$C_x = 0.32$$

Vehículo N° 3

- Fuerza de arrastre

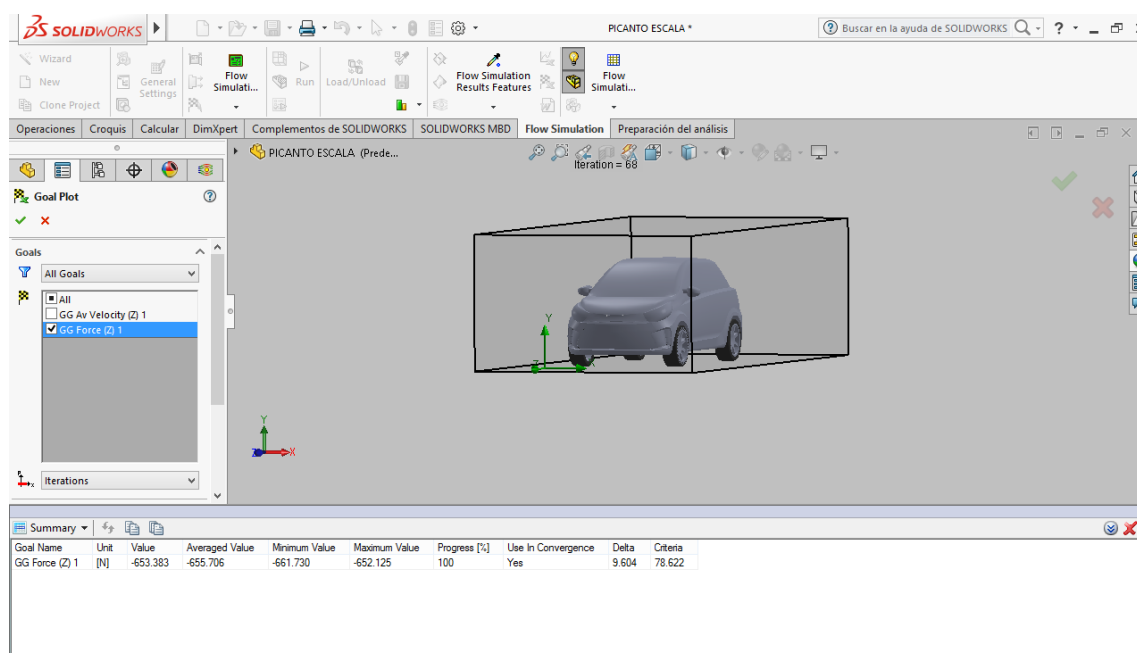


Figura 3.26 Fuerza de arrastre – Vehículo N°3

Al igual que en las anteriores secciones para determinar la fuerza de arrastre del vehículo N°3 se realizó una simulación especificando los datos que se necesitaban obtener dentro del programa. Estos cálculos se omiten debido a que el software de SOLIDWORKS muestra el resultado de forma directa. En la Figura 3.26 se aprecia que el vehículo tuvo una fuerza de arrastre de 655.706 N.

- Área del vehículo

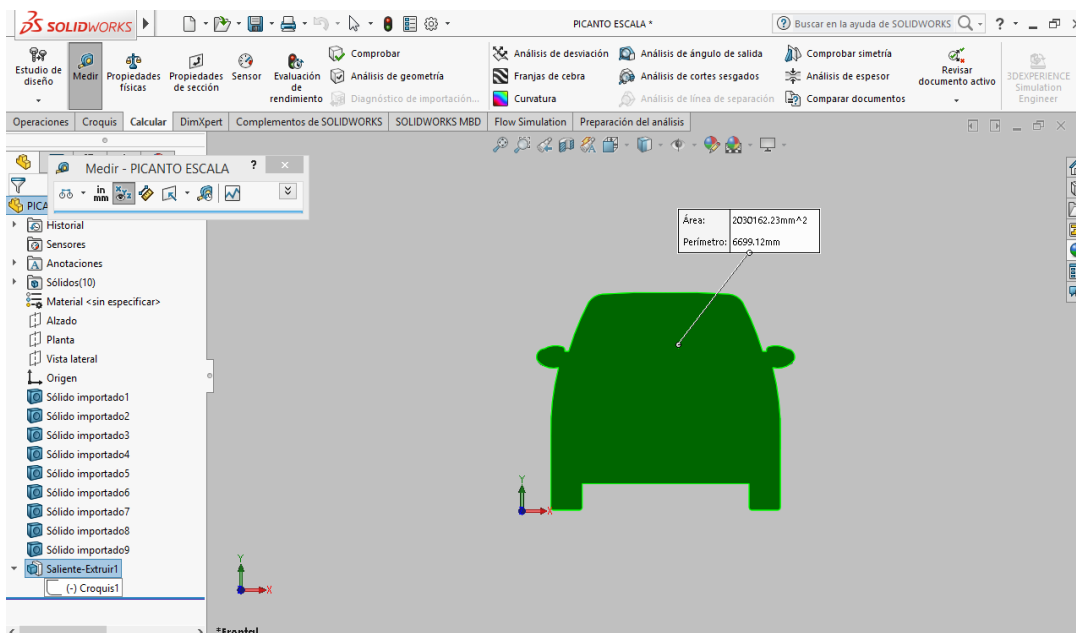


Figura 3.27 Área del vehículo – Vehículo N°3

Tal como indica la Figura 3.27 el vehículo N° 3 tiene una área de 2030162.23 mm², los pasos utilizados para la obtención de este dato, son los mismos descritos en las secciones anteriores como se los hizo para el vehículo N°1-2.

Cálculo coeficiente aerodinámico:

F_d: 655.706 N

ρ: 1.184 kg/m³

V: 150 km/h = 41.6 m/s

A: 2030162.23 mm² = 2.03 m²

Todos estos valores fueron reemplazados dentro de la Ecuación 3.2.

$$C_x = \frac{2F_d}{\rho v^2 A}$$

$$C_x = \frac{2(655.706 \text{ N})}{1.184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (41.6 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 (2.03 \text{ m}^2)}$$

$$C_x = \frac{1311.4 N}{4159.43 N}$$

$$C_x = 0.31$$

Una vez terminado de calcular cada uno de los coeficientes aerodinámicos para los diferentes tipos de vehículos se obtiene los siguientes resultados que se detallan a continuación en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Coeficientes aerodinámicos

Nº Vehículo	Coficiente Aerodinámico
1	0,34
2	0,32
3	0,31

Los valores reflejados indican los coeficientes aerodinámicos C_x , siendo un valor numérico que define el nivel de resistencia que tiene el vehículo al avanzar. Teniendo mejor capacidad aerodinámica cuanto más bajo sea su C_x , es así como el mejor vehículo aerodinámicamente es el vehículo N° 3 puesto que su C_x es menor en comparación al resto y el vehículo N° 1 reduce su capacidad aerodinámica en comparación a los otros dos modelos.

- **Resistencia Aerodinámica**

La resistencia es una fuerza que se opone al movimiento que recibe cualquier objeto que se desplaza a través del aire, como por ejemplo cuando un vehículo circula por una carretera, esta resistencia proviene de 4 tipos de fuentes.

La primera es la forma relacionada al volumen del objeto que atraviesa el aire, este puede ser pequeño, grande, alto o bajo. La segunda es la fricción superficial que se debe al rozamiento del aire que se produce en contra del vehículo. La tercera fuente es la inducida, producida por elementos adicionales que se adhieren al vehículo haciendo que produzcan anti-sustentación como alerones, faldones entre otros y la última es por interferencia que se produce por el aire que se desvía desde la carrocería al retrovisor y el aire que se desvía del

retrovisor a la carrocería produciendo una resistencia. Todos estos elementos se los detalla en la ecuación 1.3.

- **Cálculos de resistencia para los tres tipos de vehículos**

Para el cálculo de la resistencia se utilizó la Ecuación 1.3.

Vehículo N° 1

Datos:

C_x: 0.34

ρ: 1.184 kg/m³

V: 100 km/h = 27.7 m/s

A_f: 2.14 m²

$$F_x = \frac{1}{2}(\rho C_x A_f V^2)$$

$$F_x = \frac{1}{2}(1.184 \text{ kg/m}^3)(0.34)(2.14 \text{ m}^2)(27.7 \text{ m/s})^2$$

$$F_x = 381.46 \text{ kg m/s}^2$$

$$F_x = 381.46 \text{ N}$$

Vehículo N° 2

Datos:

C_x: 0.32

ρ: 1.184 kg/m³

V: 100 km/h = 27.7 m/s

A_f: 2.03 m²

$$F_x = \frac{1}{2}(\rho C_x A_f V^2)$$

$$F_x = \frac{1}{2}(1.184 \text{ kg/m}^3) (0.32)(2.4 \text{ m}^2)(27.7 \text{ m/s})^2$$

$$F_x = 311.06 \text{ kg m/s}^2$$

$$F_x = 311.06 \text{ N}$$

Vehículo N° 3

Datos:

Cx: 0.31

ρ : 1.184 kg/m³

V: 100 km/h = 27.7 m/s

Af: 2.03 m²

$$F_x = \frac{1}{2}(\rho C_x A_f V^2)$$

$$F_x = \frac{1}{2}(1.184 \text{ kg/m}^3) (0.31)(2.03 \text{ m}^2)(27.7 \text{ m/s})^2$$

$$F_x = 285.85 \text{ kg m/s}^2$$

$$F_x = 285.85 \text{ N}$$

Para realizar la comparación de resultados se debe realizar los cálculos de resistencia para tres tipos de velocidades a 100, 150 y 200 km/h más adelante se mostrará los resultados en una tabla y su posterior explicación.

3.5.4 ANÁLISIS DE POTENCIA NECESARIA PARA VENCER LA RESISTENCIA AERODINÁMICA

Realizar un análisis de potencia es de gran importancia ya que un vehículo al desplazarse por una carretera choca con el viento, generando una resistencia que retiene el vehículo al avance. Este debe romper la resistencia que presente el aire alrededor del vehículo aumentando la potencia generando así un mayor consumo de combustible. Debido a esto se

realizó un análisis para calcular cuanta potencia necesita un vehículo cuando se desplaza a distintas velocidades.

Para calcular la potencia necesaria para vencer al aire cuando un vehículo se encuentra en movimiento se utilizó la ecuación 3.3. Por ende, para realizar los cálculos se procedió a someter a los tres vehículos a tres velocidades distintas con el fin de calcular la resistencia aerodinámica a vencer y la potencia necesaria para vencer dicha resistencia.

$$P = \frac{1}{2} \rho C_x A_f V^3 \quad [3.3]$$

Donde:

A_f = Área frontal del vehículo.

V = Velocidad con la que circula el vehículo.

ρ = Densidad del aire.

C_x = Coeficiente Aerodinámico.

- **Cálculos de Potencia para los tres tipos de vehículos**

El cálculo de la potencia para vencer el aire de los tres tipos de vehículos se lo realizó sustituyendo los diferentes datos dentro de la Ecuación 3.3.

Vehículo N° 1

Datos:

Cx: 0.34

ρ : 1.184 kg/m³

V: 100 km/h = 27.7 m/s

Af: 2.47 m²

$$P = \frac{1}{2} (\rho C_x A_f V^3)$$

$$P = \frac{1}{2} (1.184 \text{ kg/m}^3) (0.34)(2.47 \text{ m}^2)(27.7 \text{ m/s})^3$$

$$P = 10566.63 \text{ kg m}^2/\text{s}^3$$

$$P = 10566.63 \text{ J/s}$$

$$P = 14.36 \text{ CV}$$

Vehículo N° 2

Datos:

Cx: 0.32

ρ : 1.184 kg/m³

V: 100 km/h = 27.7 m/s

Af: 2.14 m²

$$P = \frac{1}{2} (\rho C_x A_f V^3)$$

$$P = \frac{1}{2} (1.184 \text{ kg/m}^3) (0.32)(2.14 \text{ m}^2)(27.7 \text{ m/s})^3$$

$$P = 8616.37 \text{ kg m}^2/\text{s}^3$$

$$P = 8616.37 \text{ J/s}$$

$$P = 11.71 \text{ CV}$$

Vehículo N° 3

Datos:

Cx: 0.31

ρ : 1.184 kg/m³

V: 100 km/h = 27.7 m/s

Af: 2.03 m²

$$P = \frac{1}{2}(\rho C_x A_f V^3)$$

$$P = \frac{1}{2}(1.184 \text{ kg/m}^3)(0.31)(2.03 \text{ m}^2)(27.7 \text{ m/s})^3$$

$$P = 7918.05 \text{ kg m}^2/\text{s}^3$$

$$P = 7918.05 \text{ J/s}$$

$$P = 10.76 \text{ CV}$$

Los datos recogidos para calcular la potencia se obtuvieron de secciones anteriores como el área frontal del vehículo y el coeficiente aerodinámico. Se trabajó con una densidad a una temperatura de 25 °C y al realizar los cálculos para cada velocidad propuesta se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 3.9 que indican los valores de potencia necesaria para vencer la resistencia que se genera en la parte trasera del vehículo en condiciones de velocidad.

Tabla 3.9 Resultados de potencia necesaria para vencer la resistencia

Vehículo N° 1			
Velocidad (km/h)	Resistencia (N)	Resistencia (kg)	Potencia (CV)
100	381.46	38.9	14.36
150	860.36	87.7	48.66
200	1531.38	156.16	115.56
Vehículo N° 2			
100	311.06	31.7	11.71
150	701.57	71.5	39.68
200	1248.73	127.3	94.22
Vehículo N° 3			
100	285.85	29.1	10.76
150	644.71	65.7	36.46
200	1147.53	117	86.6

Los valores de resistencia medida en Newton, que debe vencer el vehículo para atravesar el aire. Es así como el vehículo N°1 con una dimensión grande al circular a una velocidad de 150 km/h necesita vencer una resistencia de 860.36 N. Sin embargo, un vehículo con una dimensión pequeña como lo es el vehículo N° 3 al circular a la misma velocidad de 150 km/h necesita vencer una resistencia de 644.71 N, siendo menor en comparación al del vehículo N°1.

La resistencia equivalente medida en kg corresponde a la fuerza con la que el aire retiene al vehículo al avance. El vehículo N°1 al viajar a una velocidad de 150 km/h indicó que el aire produce una fuerza de retención de 87.7 kg, que comparado con el vehículo N°3 a la misma velocidad, el aire produjo una retención de 65.7 kg siendo una resistencia equivalente menor debido al tamaño de cada uno de los vehículos, mientras que el vehículo N° 2 a la misma velocidad, el aire produjo una resistencia de 71.5 kg.

También indica los caballos de fuerza que necesita un vehículo para vencer la resistencia aerodinámica, pues un vehículo con dimensiones pequeñas a velocidades medias necesita una menor potencia en comparación con un vehículo grande que circule a la misma velocidad, diferencia que afecta al consumo de combustible.

3.5.5 ANÁLISIS DE PRUEBAS EN VEHÍCULOS

Para iniciar con las pruebas se utilizaron tres modelos de vehículos a escala 1:18, los cuales fueron previamente diseñados e impresos. Se trata de vehículos que se comercializan en la ciudad de Ibarra, a estos tres modelos se los sometió a tres velocidades diferentes, en los cuales el factor a tomar en cuenta es el tipo de flujo que genere en distintas zonas del vehículo.

Las pruebas realizadas en este punto se enfocaron en el tema de velocidades y comportamiento del flujo de aire, e identificar los tipos de flujo que se generen específicamente al contorno externo de cada uno de los modelos a escala impresos.

Prueba vehículo N° 1

- Prueba a 100 km/h



Figura 3.28 Prueba a 100 km/h – Vehículo N°1

La Figura 3.28 muestra el comportamiento del aire puesto a prueba en el vehículo N° 1 a 100 km/h en donde el flujo en todo su recorrido es laminar a excepción cuando circula por el capó y parabrisas donde se vuelve semi laminar y el aire conforme va circulando se va perdiendo hacia la salida del túnel de viento.

- Prueba a 150 km/h



Figura 3.29 Prueba a 150 km/h – Vehículo N°1

La Figura 3.29 muestra la prueba a 150 km/h, dónde el comportamiento del aire se vuelve semi laminar en todos los puntos indicados como son: capó, parabrisas y techo, a excepción del parachoques donde su flujo es laminar.

- **Prueba a 200 km/h**



Figura 3.30 Prueba a 200 km/h – Vehículo N°1

La Figura 3.30 indica el vehículo al interior de la cámara a una velocidad de 200 km/h, en esta se refleja una zona de turbulencia en el capó y el parabrisas. En el parachoques indica una zona semi laminar al igual que en el techo. La zona de turbulencia vuelve a ser en la parte posterior del vehículo aquí se puede observar un poco más la turbulencia ya que en la parte trasera el vehículo incorpora una llanta de refacción que hace más visible la zona de turbulencia creada.

- **Resultados vehículo N° 1**

La Tabla 3.10 indica los tipos de flujos encontrados al realizar las pruebas al vehículo N° 1 donde los flujos turbulentos se generan cuando el vehículo viaja a una velocidad de 200 km/h generando una mayor resistencia lo cual puede generar un mayor gasto de combustible. Al realizar las pruebas a 150 km/h, las zonas en donde se produce un flujo laminar es en el techo y parabrisas.

Tabla 3.10 Resultados de pruebas al vehículo N° 1

Velocidad			Comportamiento del flujo de aire			
Real (km/h)	Real (m/s)	Escala (m/s)	Parachoques	Capó	Parabrisas	Techo
100	27,78	1,55	Laminar	Semi laminar	Semi laminar	Laminar
150	41,67	2,31	Semi laminar	Laminar	Laminar	Semi laminar
200	55,56	3,08	Semi laminar	Turbulento	Turbulento	Semi laminar

Prueba vehículo N° 2

- Prueba a 100 km/h



Figura 3.31 Prueba a 100 km/h – Vehículo N°2

La Figura 3.31 muestra el vehículo a escala, con una velocidad de prueba de 100 km/h, en la que se indica un flujo laminar en el recorrido exterior del vehículo a excepción del parabrisas ya que al finalizar el recorrido por el capó choca el aire al dirigirse hacia el parabrisas.

- Prueba a 150 km/h



Figura 3.32 Prueba a 150 km/h – Vehículo N°2

La Figura 3.32 muestra el vehículo a escala con una velocidad de 150 km/h, en donde se denota que cuando existe un aumento de velocidad existe un flujo semi laminar al entrar en contacto contra el parachoques.

- **Prueba a 200 km/h**



Figura 3.33 Prueba a 200 km/h – Vehículo N°2

La Figura 3.33 muestra un punto donde existe una pequeña variación del flujo de aire, en la parte del parachoques y parabrisas cuando se hace las pruebas a 200 km/h. Sin embargo, el flujo de aire se estabiliza cuando pasa por el capó y el techo ya indicando un flujo laminar.

Las pruebas realizadas a las tres distintas velocidades indica que la dirección de aire no varía en su flujo. Por lo contrario, lo mantiene en casi todo su recorrido. Sin embargo, al finalizar cada recorrido se puede observar en cada una de las pruebas que existe zona de turbulencia en la parte posterior del vehículo. Esto se debe a que existe un choque entre el aire que circula por la parte superior y el que circula por la parte inferior.

- **Resultados vehículo N° 2**

Dicho esto, los resultados obtenidos de cada una de las pruebas se detallan en la Tabla 3.11 como se muestra a continuación:

El comportamiento del aire cuando circula en dirección al vehículo, esto lo corrobora el coeficiente aerodinámico que indica que las condiciones en las cuales puede transportarse el vehículo lo hacen óptimo. Esto se hizo para analizarlo aerodinámicamente mostrando resultados alentadores.

Tabla 3.11 Resultados de pruebas al vehículo N° 2

Velocidad			Comportamiento del flujo de aire			
Real (km/h)	Real (m/s)	Escala (m/s)	Parachoques	Capó	Parabrisas	Techo
100	27,78	1,55	Laminar	Laminar	Semi laminar	Laminar
150	41,67	2,31	Semi laminar	Laminar	Laminar	Laminar
200	55,56	3,08	Semi laminar	Laminar	Semi laminar	Laminar

Prueba vehículo N° 3

- **Prueba a 100 km/h**

**Figura 3.34** Prueba a 100 km/h – Vehículo N°3

La Figura 3.34 muestra la prueba realizada al vehículo N° 3 en la que se obtuvo como resultado que al iniciar con una velocidad de 100 km/h el flujo que emite es reducido en el techo del vehículo haciendo poco evidente el humo que circula por aquí, produciendo el flujo semi laminar. Mientras que en la zona de capó, parachoques y parabrisas el flujo de aire es laminar.

- **Prueba a 150 km/h**

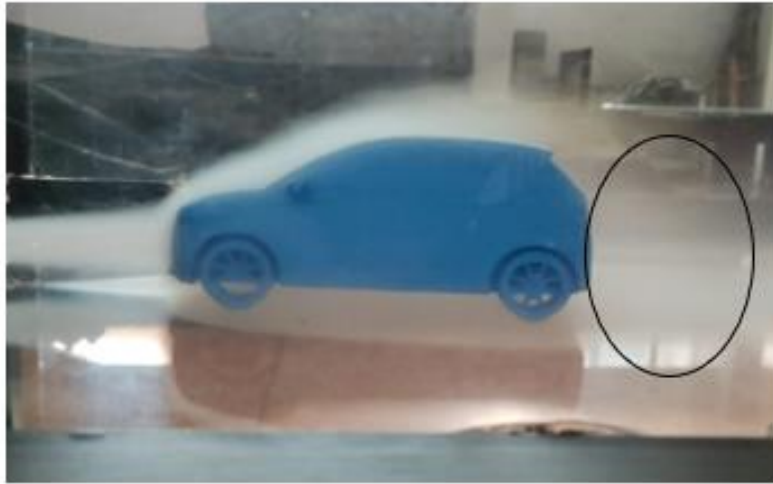


Figura 3.35 Prueba a 150 km/h – Vehículo N°3

La Figura 3.35 indica el flujo de aire a una velocidad de 150 km/h, al direccionarse hacia el parachoques muestra que se produce un flujo laminar, al igual que en la zona del capó y parabrisas. Sin embargo, al finalizar el recorrido en la zona del techo el flujo de aire se vuelve semi laminar.

- **Prueba a 200 km/h**



Figura 3.36 Prueba a 200 km/h – Vehículo N°3

En la Figura 3.36 se puede observar el vehículo puesto a prueba en el túnel a 200 km/h, en donde muestra un flujo semi laminar en la zona del parachoques y conforme va circulando el aire en la zona del capó el flujo es laminar al igual que en el techo. Como se menciona anteriormente, la zona en donde el aire produce turbulencia es en la parte posterior del vehículo ya explicado anteriormente.

- **Resultados vehículo N° 3**

La Tabla 3.12 indica que el vehículo N° 3 posee mayor estabilidad al circular a altas velocidades, esto se debe al tamaño del vehículo que lo hace apto para adherencias a la calzada cuando se circule a velocidades de hasta 200 km/h.

Tabla 3.12 Resultados de pruebas al vehículo N° 3

Velocidad			Comportamiento del flujo de aire			
Real (km/h)	Real (m/s)	Escala (m/s)	Parachoques	Capó	Parabrisas	Techo
100	27,78	1,55	Laminar	Laminar	Laminar	Semi laminar
150	41,67	2,31	Laminar	Laminar	Laminar	Semi laminar
200	55,56	3,08	Semi laminar	Laminar	Laminar	Laminar

3.5.6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De todos los 3 vehículos puestos a prueba en el mercado ninguno puede llegar a velocidades elevadas de 200 km/h. Para este trabajo de investigación se optó por esta velocidad debido a que la aerodinámica vehicular se realiza a altas velocidades. A diferencia de otras pruebas aerodinámicas, para este caso se colocó un sensor de presión diferencial el cual mide dos presiones: la exterior y la interior. Debido a esto se anuló la ley de Bernoulli, en donde dicta que en un conducto a mayor velocidad menor presión, pues la medición se la realiza entre un conducto cerrado y a una sección abierta, la igualdad en los valores de presión se debe a que el sensor no se lo instaló cerca del vehículo ya que es complicado adquirir sensores de mayor precisión por el costo que conlleva.

Debido a esto, los resultados se basan en la observación de flujos que se pueden generar en cada parte del vehículo. Ya terminadas las pruebas a cada uno de los vehículos, se concluye que cada vehículo se comporta de tal manera, que cuando viajan a velocidades altas se adhieren más a la calzada, proporcionando a la vez una mayor estabilidad al momento de virar en una curva o viajando simplemente en una recta.

A través de las pruebas aerodinámicas realizadas se constata que de los tres vehículos utilizados el que se comporta mejor aerodinámicamente es el vehículo N° 3 mientras que el vehículo con menor prestaciones de adherencia y resistencia es el N° 1 ya que sus flujos durante las pruebas llegan a ser turbulentos en su perfil posterior.

En este caso se omitió las ayudas aerodinámicas, ya que los modelos puestos a prueba no cuentan con elementos que ayuden en el efecto aerodinámico como alerones, difusores o spoilers. Pero en el caso de que hubiese un vehículo con alerones al momento de ser puesto a prueba mostraría un valor mayor de presión negativa respecto a los demás vehículos, lo cual sería de gran ayuda al momento de hablar de dicho tema, puesto que mediante un estudio y fabricación de alerones, spoilers y difusores se pudiese estudiar más a fondo y a la vez comprobar lo mencionado.

- **Análisis económico**

En este apartado se hará un análisis en cuanto a la factibilidad económica del trabajo de tesis. Tomando en cuenta que al realizar el anteproyecto se tuvo una proyección del dinero a invertir y estos resultaban elevados, a pesar de esto y conscientes de esto, trabajamos en ello.

Sin embargo, el hecho de utilizar pocos elementos, el costo final llegó a ser importante, puesto que cada elemento de adquisición era costoso, además de contar con la ventaja que cada elemento se lo podía adquirir en el mercado nacional sin necesidad de hacer importaciones.

En capítulos descritos anteriormente se detalló y señaló cada uno de los elementos del túnel de viento, y ahora se describirá el costo de cada uno de ellos.

Tabla 3.13 Costos de material para la construcción del túnel de viento

Descripción	Cantidad	Costo unitario	Costo total (USD)
Madera flexible para túnel de viento	1	400.00	400.00
Ventilador marca MAXX AIR	1	300.00	300.00
Máquina de humo	1	195.00	195.00
Anemómetro		100.00	100.00
Variador de Frecuencia	1	30.00	30.00
Cable de alimentación	1	15.00	15.00
Material de oficina	-	90.00	90.00
Sensores	2	45.00	90.00
Arduino mega	1	15.00	15.00
Total			1235.00

CAPÍTULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta la implementación de un túnel de viento para el análisis aerodinámico de prototipos en 3D dentro de la cámara de ensayos, a través de la ejecución de la simulación de diferentes pruebas. Principalmente, dentro de esta maqueta se constató la resistencia que el vehículo se opone al flujo de aire aplicado, por lo cual se llegó a las siguientes conclusiones:

- Para la construcción del túnel de viento se realizó un análisis comparativo en donde se utilizó 5 tipos de diseños para seleccionar al mejor prototipo de construcción. Se seleccionó el túnel de viento por medio de matrices de alternativas en donde se colocaron condiciones que debían cumplir cada uno de los tipos de túnel de viento. Así también para la selección se descartó túneles de viento de Mach $M > 0.7$, justificando que un túnel subsónico es suficiente. En lo que respecta a su diseño, uno de ciclo abierto es mayormente adecuado comparado con un de ciclo cerrado, con utilidades y prestaciones semejantes. Para finalizar se utilizó un túnel de viento de aspirado por tener una mayor facilidad de acople y presentar menores pérdidas, así que el túnel de viento que se construyó fue un subsónico de aspirado de ciclo abierto.
- La selección del ventilador se lo realizó a través de una serie de cálculos matemáticos que facilitaron conocer los requerimientos que debe cumplir este en cuanto se refiere al caudal de aire que debe circular en el interior del túnel de viento, con los resultados obtenidos se determinó que el flujo de aire que se necesita es de $1.7 \text{ m}^3/\text{s}$, por lo cual se realizó la adquisición de un ventilador tipo industrial marca Maxx que posee un caudal de $3.3 \text{ m}^3/\text{s}$ los cuales son necesarios para realizar las pruebas aerodinámicas.
- Mediante los diferentes dispositivos electrónicos que se encuentran instalados en las secciones del túnel de viento se constató que la velocidad del aire alcanzada dentro del túnel de viento fue alrededor de 4 a 5 m/s, tanto en las simulaciones ejecutadas y calculadas mediante el programa asistido por computadora SOLIDWORKS, como

también en la maqueta una vez concluida y puesta en funcionamiento, y con eso se lograron validar los instrumentos de medición con la simulación.

- A través de los datos proporcionados por la simulación computacional se consiguió calcular el coeficiente aerodinámico C_x de los tres modelos a escala y con ello se determinó que tipo de vehículo posee un menor C_x y una mejor aerodinámica al desplazarse a diferentes velocidades de pruebas.

4.2 RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos una vez concluido el proceso con la elaboración y ejecución de las pruebas en el túnel de viento, realizamos las siguientes recomendaciones:

- Estudiar las condiciones que debe tener un túnel de viento es importante ya que esto ayuda a tener una mejor eficiencia en las pruebas, se recomienda realizar alternativas de diseño si se va a modificar el túnel de viento.
- Antes de poner en funcionamiento la maqueta revisar que todos los cables que corresponden al ventilador se encuentren conectados correctamente con el fin de evitar fallos que ocasionen desde pérdidas de potencia hasta problemas de encendido, y de igual manera no manipular el mismo cuando se encuentre en funcionamiento ya que sus hélices pueden ocasionar lesiones graves.
- Tener cuidado con el manejo de los instrumentos de medición ya que son aparatos frágiles que pueden llegarse a romper o descalibrar. En cuanto a las instalaciones eléctricas y electrónicas no manipular sin antes tener un previo conocimiento del funcionamiento general del túnel de viento.
- Para tener una exactitud en la realización de los cálculos aerodinámicos de cada vehículo, es necesario que al momento de ejecutar las simulaciones se seleccione una velocidad específica, misma que debe ser utilizada para los tres vehículos con la finalidad de evitar resultados erróneos.

TRABAJOS FUTUROS

- Como métodos de estudio para realizar comparaciones aerodinámicas entre los modelos a escala, utilizar elementos adicionales como alerones, faldones que proporcionan una mayor anti-sustentación.

- Implementar más sensores en la cámara de análisis para tener mayor información y con ello ejecutar otro tipo de ensayos.
- Adquirir vehículos a escala que faciliten abrir y cerrar sus ventanas de modo que se pueda ejecutar pruebas en estas dos condiciones y posterior a esto describir el cambio de flujo laminar y turbulento al interior del vehículo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AERODINÁMICA. (20 de Noviembre de 2010). *Túneles de viento (I)*. Obtenido de <https://www.flaldia.com/10650/tuneles-de-viento-i/>
2. Alamy. (2020). *Funcionamiento de un túnel de viento*. Obtenido de <https://www.alamy.es/imagenes/wind-tunnel-fan.html>
3. Andrade, C., & Gómez, J. (2017). "Estudio de factibilidad de la colocación de un alerón frontal y posterior mediante análisis cfd para el vehículo monoplaça eléctrica tipo formula sae". Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.
4. Arango, A., & Yepes, M. (2014). Diseño, construcción y puesta en funcionamiento del túnel de viento subsónico de circuito abierto de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá con implementación de sistemas de toma de datos de aire y visualización de flujo. Fundación Universitaria Los Libertadores.
5. Arroyo, A. (2016). Informe de túneles de viento por el mundo. *Laboratorio de Investigación En Energía Eólica*, 53(9), 1689–1699.
6. Artés, D. (20 de Noviembre de 2020). *Aerodinámica del automóvil: principios básicos* . Obtenido de <https://www.diariomotor.com/que-es/mecanica/aerodinamica/>
7. Barnard. (2014). Road Vehicle Aerodynamic Design Second Edition. *Dairy Science & Technology*, CRC Taylor & Francis Group, (June), 1–542.
8. Bermeo, J., Siguencia, D. F., & Serpa, P. (2012). *Diseño y construcción de un túnel de viento para análisis aerodinámico en vehículos a escala*. Universidad Politécnica Salesiana.
9. Blanco, C. (2011). *Determinación del comportamiento aerodinámico de un vehículo en movimiento*. Universidad Carlos III Madrid.
10. Bustillos, B., & Zambrano, J. (2018). *Diseño y simulación de un banco de pruebas aerodinámico (túnel de viento) para la validación de simulaciones con software cfd*. Universidad Técnica Estatal de Quevedo.
11. Camúñez, R. (2014). *Elementos y dispositivos aerodinámicos en la Fórmula 1: parte central del vehículo*. Universidad Politécnica de Cataluña.

12. Carsolio, O., & Chávez, S. (2011). *“Diseño conceptual de un alerón trasero para un automóvil formula 1.”* Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.
13. Connor, N. (9 de Diciembre de 2019). *¿Cuál es el teorema de Bernoulli? Definición.* Obtenido de <https://www.thermal-engineering.org/es/cual-es-el-teorema-de-bernoulli-definicion/>
14. Domingo, A. (2015). *Apuntes de Mecánica de Fluidos (Vol. 0).* Universidad Politécnica de Madrid.
15. Fraija, I. (2006). Estudio de la aerodinámica en los vehículos. *Prospectiva*, 4(2), 66–70. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=496251108011>
16. García, N. (21 de Agosto de 2015). *moveo.* Obtenido de <https://www.lavanguardia.com/motor/actualidad/20150821/54434932020/aerodinamica-consumo-tunel-viento.html>
17. Landázuri, P. (2016). *Diseño y construcción de un túnel de viento a escala.* Universidad San Francisco de Quito USFQ.
18. Martínez, M. (2018). *Estudio y optimización de una aeronave con fuselaje de ala fija aplicado a vehículos aéreos no tripulados en la región andina mediante simulación numérica de dinámica de fluidos computacional (CFD).* Quito, Ecuador. Escuela Politécnica Nacional.
19. McBeath, S. (2011). *Competition Car Aerodynamics: A Practical.*
20. Mora, E. (2016). *Estudio para establecer los parámetros aerodinámicos en un vehículo, que se deberían aplicar en la estructura o compacto para mejorar la eficiencia en el consumo de Combustible.* Universidad Tecnológica Equinoccial.
21. Morocho, D. (2012). *“Diseño y construcción aerodinámica tuning para faldones, alerones y estribos de un vehículo Chevrolet Esteem 2002.”* Escuela Politécnica del Ejército Extensión Latacunga.
22. Morquecho, F. (2017). *Propuesta de Diseño Técnico de un Túnel de Viento para la Realización de Pruebas en Modelos y Diseño de Autopartes.* Universidad Internacional SEK.
23. Mott, R. (2017). *Mecánica de Fluidos* (Séptima Ed). Estados Unidos.

24. Nigro, N., Delia, J., Storti, M., & Franck, G. (2015). *Análisis aerodinámico de un automóvil mediante CFD. M(3000)*.
25. Nostrud, H. (2008). *Basic Aerodynamics. In: Nørstrud H. (eds) Sport Aerodynamics. CISM International Centre for Mechanical Sciences, vol (506)*.
26. Olivares de Jodar, J. (2011). Estudio aerodinámico aplicado en el campo de la automoción (Universidad Politécnica de Cataluña (UPC); Vol. 1). Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). Obtenido de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/14663/PFC_I.pdf?sequence=2
27. Orozco, W. (2006). Diseño y simulación de las fuerzas de arrastre y sustentación en los autos. *Prospectiva*, 4(2), 26–33.
28. Ortiz, A. (2019). *Diseño aerodinámico del alerón trasero para el Chevrolet Sail S3*. Universidad Internacional SEK.
29. Padilla, M. (2015). *Creación de tunel de viento a escala 1:18 que indique flujo de aire sobre objetos, en especial vehículos, para fomentar el estudio de la aerodinámica*. Universidad Tecnológica Equinoccial.
30. Perez, S., & Renedo, C. (2019). *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas* (Universidad de Cantabria). Universidad de Cantabria.
Obtenido de <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1307/course/section/1605/T06.pdf>
31. Riaño, F. (2020). Antecedentes de la conocida ecuación de Bernoulli. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 41(1), 71–84. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382020000100071
32. Rolón, H., Villamizar, Y., & Acevedo, C. (2017). *Methodology for the calculation of lift and drag coefficients in symmetrical serodynamic profiles applied to Darrieus turbines*.
33. Ruiz, H., & Curicama, Á. (2013). “Diseño y construcción de un túnel de viento para pruebas aerodinámicas en vehículos para la escuela de ingeniería automotriz.” Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

34. Salinas, A., & Gutierrez, A. (2020). Diseño, construcción y calibración de un venturímetro para el laboratorio de hidráulica de la Universidad Cooperativa de Colombia, Sede Villavicencio. (vol. 25). Universidad Cooperativa de Colombia.
35. Serway, V. (2012). *Fundamentos de Física*. México. Obtenido de <http://latinoamerica.cengage.com>
36. Senplades. (22 de Septiembre de 2017). *Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021. Toda una Vida*. Obtenido de Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo: <https://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/11/PLAN-NACIONAL-DE-DESARROLLO-2017-2021.compressed.pdf>
37. Topa, C. (2017). *Trabajo de titulación previo a la obtención del título de magíster en eficiencia energética*. Quito, Ecuador. Escuela Politécnica Nacional.

ANEXOS



Figura AI.2. Elaboración del difusor de entrada del túnel de viento



Figura AI.3. Elaboración del difusor de salida del túnel de viento

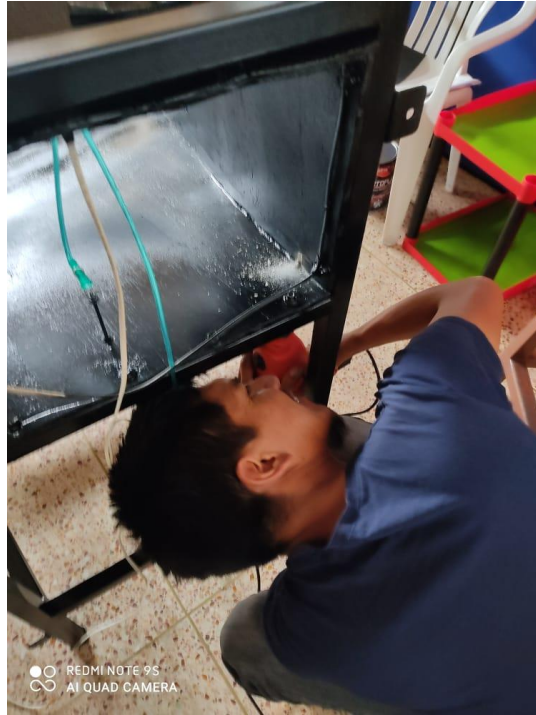


Figura AI.4. Conexiones de sensores



Figura AI.5. Conexiones eléctricas y electrónicas

ANEXO II
DIAGRAMA GENERAL DE CONEXIONES DE LA PLACA

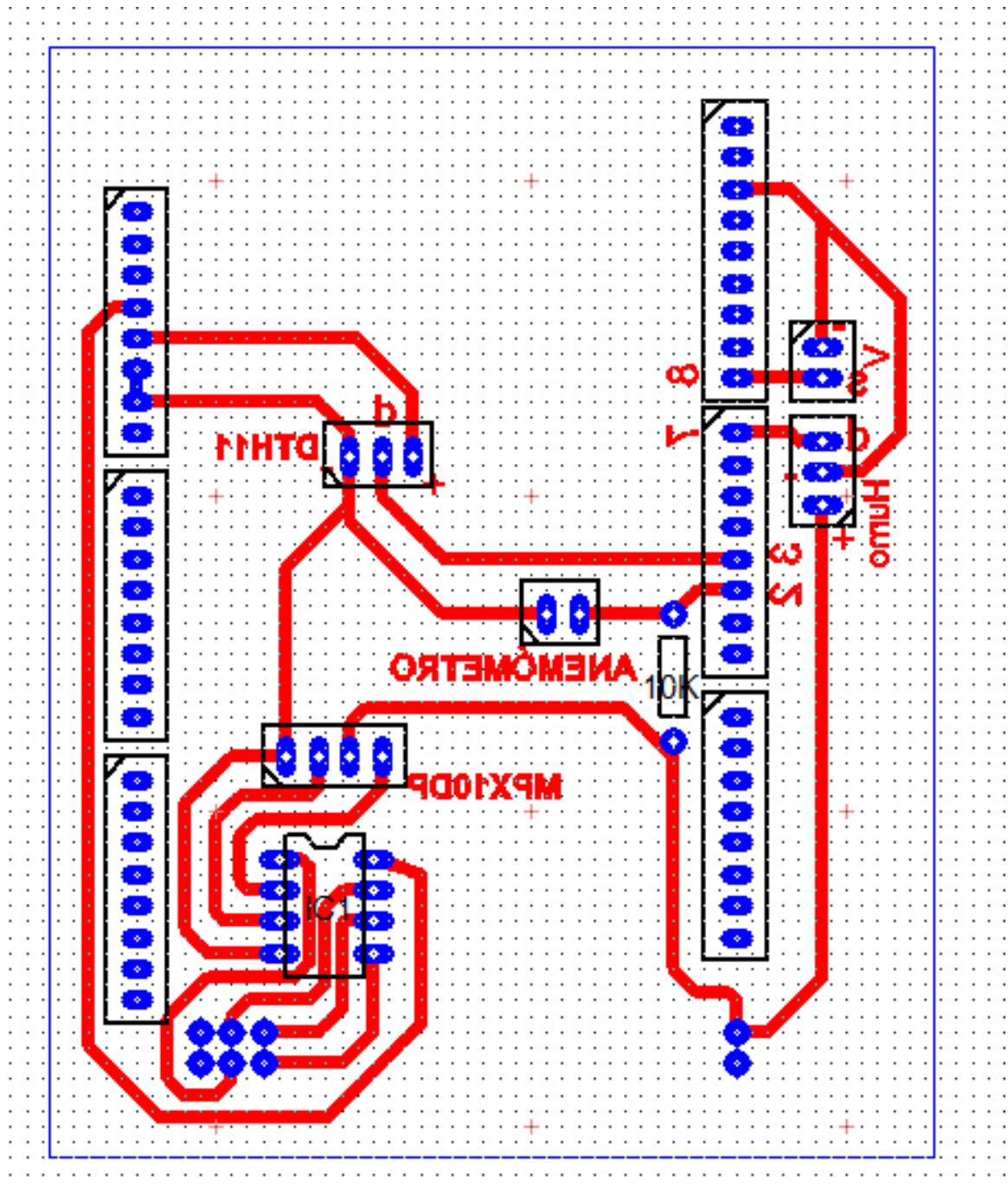


Figura AII.1. Esquema eléctrico de la placa

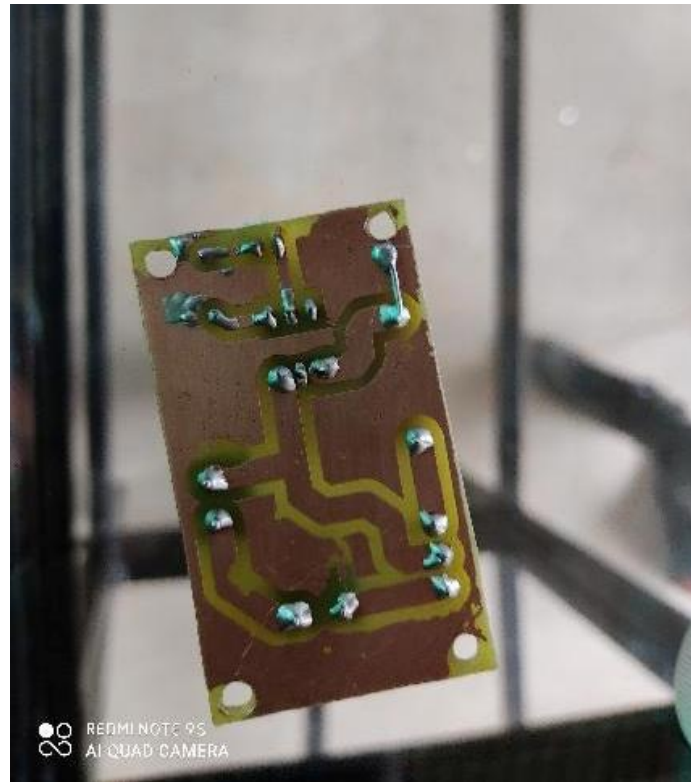


Figura AII.2. Circuito realizado en baquelita

ANEXO III

PROTOTIPO DE TÚNEL DE VIENTO A ESCALA 1:18



Figura AIII.1. Túnel de viento