



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

REPOTENCIACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO DEL LABORATORIO DE AERODINÁMICA DE LA CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

Trabajo de titulación

Tipo: Propuesta Tecnológica

Presentado para optar el grado académico de:

INGENIERO AUTOMOTRIZ

AUTOR: CESAR PAUL QUINATOA CANDO

DIRECTOR: ING. VICTOR DAVID BRAVO MOROCHO

Riobamba – Ecuador

2020

© 2020, Cesar Paul Quinatoa Cando

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

Yo, Cesar Paul Quinatoa Cando, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
Riobamba, 01 de junio de 2020



CESAR PAUL QUINATOA CANDO
150068211-5

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación; tipo Propuesta Tecnológica, “**REPOTENCIACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO DEL LABORATORIO DE AERODINÁMICA DE LA CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**”, realizado por el señor: **CESAR PAUL QUINATO A CANDO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. José Francisco Pérez Fiallos PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	_____	2020-06-01
Ing. Víctor David Bravo Morocho DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN	_____	2020-06-01
Ing. Celin Abad Padilla Padilla MIEMBRO DEL TRIBUNAL	_____	2020-06-01

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación se lo dedico a Dios por haber permitido llegar a este momento y poderlo disfrutar con mis seres queridos.

También se la dedico a mi familia especialmente a mis padres y hermanos por acompañarme en los momentos buenos y malos y brindarme su apoyo incondicional.

Cesar

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la ESPOCH por haberme aceptado ser parte de ella especialmente a los docentes de la Carrera de Ingeniería Automotriz por los conocimientos impartidos a lo largo de mi formación como estudiante y su apoyo para cumplir este objetivo.

También agradezco a mis padres por ser los principales promotores de este sueño, gracias por siempre desear lo mejor para mí, gracias por los consejos y palabras de aliento que me guiaron a cumplir esta meta.

Cesar

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE ABREVIACIONES.....	xv
SIMBOLOGÍA.....	xvi
ÍNDICE DE ANEXOS	xvii
RESUMEN.....	xviii
ABSTRACT	xviii
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Justificación.....	3
1.3.1 <i>Justificación teórica</i>	<i>3</i>
1.3.2 <i>Justificación metodológica</i>	<i>3</i>
1.3.3 <i>Justificación práctica</i>	<i>3</i>
1.4 Objetivos.....	4
1.4.1 <i>Objetivo general</i>	<i>4</i>
1.4.2 <i>Objetivos específicos.....</i>	<i>4</i>
2 MARCO TEÓRICO	6
2.1 Aerodinámica	6
2.1.1 <i>Teorema de Bernoulli.....</i>	<i>6</i>
2.1.2 <i>Efecto Venturi</i>	<i>6</i>
2.2 Fuerzas aerodinámicas.....	7
2.2.1 <i>Resistencia al avance.....</i>	<i>8</i>

2.2.2	<i>Sustentación</i>	9
2.2.3	<i>Fuerza lateral</i>	10
2.2.4	<i>Número de Reynolds</i>	10
2.2.5	<i>Coefficientes de fuerzas aplicadas</i>	11
2.2.6	<i>Eficiencia aerodinámica</i>	12
2.3	Aerodinámica del automóvil	12
2.3.1	<i>Estudio del efecto suelo</i>	13
2.3.2	<i>Presiones sobre el vehículo</i>	13
2.3.3	<i>Carga aerodinámica y agarre</i>	13
2.3.4	<i>Sustentación de los automoviles</i>	14
2.3.4.1	<i>Spoilers</i>	15
2.3.4.2	<i>Spoilers posteiores</i>	15
2.3.4.3	<i>Spoilers delanteros</i>	17
2.3.4.4	<i>Spoilers laterales</i>	18
2.3.5	Alerones	18
2.4	Túnel de viento	18
2.4.1	Tipos de túneles de viento	19
2.4.1.1	<i>Túnel abierto</i>	19
2.4.1.2	<i>Túnel cerrado</i>	20
2.4.1.1	<i>Soplado o aspirado</i>	21
2.5	Software SolidWorks	21
2.5.1	<i>Solidworks Simulation</i>	21
2.5.2	<i>Solidworks Flow Simulation</i>	22
2.5.3	<i>CFD</i>	22
3	METODOLOGÍA	24
3.1	Proceso metodológico	24
3.2	Investigación bibliográfica	25
3.3	Evaluación y repotenciación del túnel de viento	25
3.3.1	<i>Repotenciación y optimización del túnel de viento</i>	26
3.3.2	<i>Electrónica del túnel aerodinámico</i>	26
3.3.2.1	<i>Diseño del circuito electrónico</i>	26

3.3.2.2	<i>Galgas extensiométricas</i>	26
3.3.2.3	<i>Anemómetro</i>	28
3.3.2.4	<i>Módulo micro SD</i>	30
3.3.2.5	<i>Microcontrolador</i>	30
3.3.2.6	<i>Pantalla Nextion 5''</i>	32
3.3.2.7	<i>Fuente de alimentación</i>	33
3.3.2.8	<i>Leds indicadores</i>	34
3.3.3	<i>Diseño y construcción de la placa del circuito</i>	35
3.3.3.1	<i>Construcción de la placa del circuito</i>	37
3.3.4	<i>Programación del circuito electrónico</i>	41
3.3.5	<i>Interface del circuito electrónico</i>	41
3.3.6	<i>Instalación del circuito electrónico</i>	42
3.4	Manual de uso	45
3.4.1	<i>Operación del túnel</i>	45
3.4.2	<i>Manual de mantenimiento</i>	46
3.5	Diseño y simulación	46
3.5.1	<i>Diseño del modelo de pruebas</i>	46
3.5.2	<i>Simulación aerodinámica</i>	47
3.5.2.1	<i>Resultados obtenidos de las simulaciones</i>	54
3.6	Análisis comparativo entre los resultados del equipo implementado con la simulación.	56
4	GESTIÓN DEL PROYECTO	57
4.1	Planificación	57
4.2	Cronograma de actividades	57
4.3	Recursos y materiales	58
4.3.1	<i>Recursos humanos</i>	58
4.3.2	<i>Recursos materiales</i>	59
4.3.3	<i>Recursos económicos</i>	59
4.3.4	<i>Presupuesto</i>	59
4.3.4.1	<i>Costos directos</i>	60
4.3.4.2	<i>Costos indirectos</i>	60

4.3.4.3 <i>Costos totales</i>	61
CONCLUSIONES	62
RECOMENDACIONES	63
GLOSARIO	
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2: Coeficiente de resistencia, respecto de fuerza de sustentación	17
Tabla 2-3: Modalidad, técnicas e instrumentos de la investigación.....	24
Tabla 3-3: Estados de los componentes del túnel de viento	25
Tabla 4-3: Características técnicas de la celda de carga de 3kg	27
Tabla 5-3: Especificaciones técnicas del anemómetro.....	28
Tabla 6-3: Características técnicas del motor eléctrico.....	29
Tabla 7-3: Especificaciones técnicas del módulo micro SD	30
Tabla 8-3: Especificaciones técnicas de la placa de Arduino Mega 2560.....	31
Tabla 9-3: Especificaciones técnicas de la placa de Arduino Mega 2560.....	32
Tabla 10-3: Características técnicas del LM471.....	33
Tabla 11-3: Funciones de los leds.....	34
Tabla 12-3: Resultados de la simulación a 20 m/s.....	54
Tabla 13-3: Resultados de la simulación a 30 m/s.....	55
Tabla 14-3: Resultados obtenidos de la simulación a 40 m/s	55
Tabla 15-4: Planificación de actividades	57
Tabla 16-4: Materiales y equipos	59
Tabla 17-4: Costos directos	60
Tabla 18-4: Costos indirectos	61
Tabla 19-4: Costos totales	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2: Efecto Venturi	7
Figura 2-2: Fuerzas incidentes en un cuerpo.....	8
Figura 3-2: Movimiento del viento según la forma del objeto	9
Figura 4-2: Fuerza de presión según la velocidad de viento	10
Figura 5-2: Resistencia aerodinámica de una formula 1	12
Figura 6-2: Spoilers posteriores.....	15
Figura 7-2: Spoilers del Volkswagen Golf GTI MK7	16
Figura 8-2: Spoiler Honda Civic 2012.....	16
Figura 9-2: Flujo de aire en spoiler delantero	17
Figura 10-2: Partes del alerón	18
Figura 11-2: Túnel de viento cerrado	19
Figura 12-2: Túnel abierto	20
Figura 13-2: Túnel cerrado.....	20
Figura 14-2: Simulación aerodinámica de un Formula 1	23
Figura 15-3: Proceso metodológico.....	24
Figura 16-3: Diagrama de las celdas de carga.....	27
Figura 17-3: Aspas del anemómetro.....	29
Figura 18-3: Diagrama del anemómetro	29
Figura 19-3: Diagrama del módulo micro SD.....	30
Figura 20-3: Diagrama del microcontrolador.....	32
Figura 21-3: Diagrama pantalla Nextion 5''	33
Figura 22-3: Datasheet de las fuentes	34
Figura 23-3: Diagrama de los leds indicadores	34
Figura 24-3: Diseño del circuito electrónico.....	35
Figura 25-3: Diseño de las pistas del circuito electrónico	36
Figura 26-3: Impresión del circuito	36
Figura 27-3: Circuito impreso sobre una placa de cobre	37
Figura 28-3: Circuito impregnado en la placa de cobre.....	37
Figura 29-3: Inmersión del circuito	38
Figura 30-3: Secado de la baquelita.....	38
Figura 31-3: Vista frontal del circuito	39
Figura 32-3: Vista frontal del circuito	39
Figura 33-3: Circuito electrónico ensamblado	39
Figura 34-3: Cubierta del circuito electrónico.....	40

Figura 35-3: Ensamblaje del circuito.....	40
Figura 36-3: Circuito electrónico armado	40
Figura 37-3: Interface de bienvenida	41
Figura 38-3: Interface de registro de datos.....	41
Figura 39-3: Desmontaje de la zona de pruebas	42
Figura 40-3: Galga extensiométrica de 5 kg.....	42
Figura 41-3: Galga extensiométrica de 1 kg.....	43
Figura 42-3: Montaje del anemómetro	43
Figura 43-3: Conexión del circuito.....	43
Figura 44-3: Comprobación del circuito.....	44
Figura 45-3: Calibración del circuito.....	44
Figura 46-3: Visualización de las gráficas	45
Figura 47-3: Modelo 3D del BMW M5	47
Figura 48-3: Creación del proyecto	47
Figura 49-3: Configuración de unidades.....	48
Figura 50-3: Configuración de la superficie, tiempo de simulación y gravedad.....	48
Figura 51-3: Selección del fluido de la simulación	49
Figura 52-3: Ingreso de la presión atmosférica local y velocidad del ensayo.	49
Figura 53-3: Configuración del dominio del fluido.....	50
Figura 54-3: Selección de parámetros de análisis.....	50
Figura 55-3: Configuración del mallado.....	51
Figura 56-3: Configuración de los parámetros de calculo	51
Figura 57-3: Corriendo la simulación.....	52
Figura 58-3: Resultados de la presión relativa y velocidad en el plano	52
Figura 59-3: Resultados de la vorticidad en el plano.....	53
Figura 60-3: Resultados de la velocidad por medio de trayectorias dinámicas	53
Figura 61-3: Resultados de la presión por medio de trayectorias dinámicas	54
Figura 62-4: Diagrama de Gantt.....	58

INDICE DE GRAFICOS

Grafico 1-2: Potencia absorbida por la resistencia aerodinámica	14
Grafico 2-3: Fx y Fz valores calculados, Fx' y Fz' datos obtenidos por la simulación.....	57

ÍNDICE DE ABREVIACIONES

CAD	Diseño asistido por computadora
CFD	Dinámica computacional de fluidos
HMI	Interface hombre-máquina
PCB	Placa de circuito impreso
MDF	Tablero de fibras de densidad media
PLA	Ácido poliláctico

SIMBOLOGÍA

v	Velocidad del viento	m/s
ρ	Densidad del fluido	kg/m^3
C_x	Coeficiente de resistencia al avance	
C_y	Coeficiente de empuje lateral	
C_z	Coeficiente sustentación	
S	Área	m^2
D	Resistencia al avance	N
L	Sustentación	N
Y	Fuerza lateral	N
Re	Número de Reynolds	

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: MAQUETA DEL VEHICULO BMW M5 2012

ANEXO B: PROGRAMACIÓN EN ARDUINO

RESUMEN

El presente trabajo de titulación tuvo como objetivo repotenciar y optimizar el túnel de viento del laboratorio de aerodinámica de la Carrera de Ingeniería Automotriz mediante la digitalización de la fuerza de arrastre y sustentación en tiempo real durante el desarrollo de las pruebas aerodinámicas en el túnel de viento. Para lo cual, se inició revisando la bibliografía respectiva para comprender mejor los principios de funcionamiento del túnel para luego pasar a implementar la instrumentación necesaria que permitan monitorear las pruebas en el banco a través de una pantalla. La programación respectiva del circuito electrónico y el diseño de la interfaz del usuario se realiza mediante el software Arduino y Nextion Editor respectivamente. A continuación, se realizó las pruebas en una maqueta de vehículo a escala con el fin de analizar la eficiencia aerodinámica del mismo. Los resultados calculados, son relacionados con los obtenidos por medio del estudio aerodinámico en el software SolidWorks para validar el estudio. Así se pudo determinar que mientras el vehículo tenga un mejor coeficiente aerodinámico las fuerzas que actúan sobre disminuyen por lo consiguiente son más ecológicos. Por último, se realizó la actualización del manual de operación y mantenimiento del túnel. Por tanto, se concluyó que la implementación de nueva instrumentación al túnel de viento permitió digitalizar los datos en tiempo real y facilitó la comprensión del efecto del aire sobre la carrocería de un automóvil. Por lo que se recomienda realizar las pruebas aerodinámicas con un prototipo para determinar su eficiencia antes de implementar cualquier modificación al vehículo respectivo.

Palabras clave: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <TÚNEL AERODINÁMICO>, <VEHÍCULOS A ESCALA>, <PRUEBAS AERODINÁMICAS>, <ESTUDIO AERODINÁMICO>, <TRANSFORMACION DIGITAL>, <ARDUINO (SOFTWARE)>, <SOLIDWORKS (SOFTWARE)>.



12-10-2020
0360-DBRAI-UPT-2020

ABSTRACT

This degree work was designed to re-enhance and optimize the wind tunnel at the aerodynamics laboratory of the Automotive Engineering career by digitizing the drag and real-time support during the development of aerodynamic test in the wind tunnel. For this purpose, the relevant literature was begun to better understand the operating principles of the tunnel and then implement the necessary instrumentation to monitor tests in the test section through a screen. The corresponding programming of the electronic circuit and the user interface design was done using the Arduino and Nextion Editor software respectively. Thereafter, tests were carried out on a scale vehicle model in order to analyze its aerodynamic efficiency. The calculated results are related to those obtained by aerodynamic study in the SolidWorks software to validate the study. Thus, it was possible to determine that while the vehicle has a better aerodynamic coefficient, the forces that act upon decline are therefore more ecological. Finally, the updating of the operation manual and maintenance of the tunnel was carried out. Therefore, it is concluded that the implementation of new instrumentation to the wind tunnel allows the digitization of data in real time and generating a better understanding of the effect of the air on the vehicle body. It is therefore recommended that aerodynamic tests be performed with a prototype to determine its efficiency before implementing any modifications to the respective vehicle.

Keywords: < ENGINEERING SCIENCE AND TECHNOLOGY >, < AERODYNAMIC WIND TUNNEL >, <MODEL SCALE VEHICLES>, < AERODYNAMIC TESTS>, < AERODYNAMIC STUDIO >. <DIGITAL TRANSFORMATION>, <ARDUINO (SOFTWARE) >, <SOLIDWORKS (SOFTWARE)>.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El primer túnel de viento fue construido en 1871 por Francis Herbert Wenham miembro del Consejo de la Sociedad Aeronáutica de Gran Bretaña, el cual estaba diseñado para los aviones donde se aplicaron los primeros principios de la aerodinámica. (Landázuri, 2016 pág. 13)

Por lo cual tuvo que transcurrir más de un siglo para que estos principios se apliquen a los automóviles. Así en 1960 se comenzó a desarrollar los primeros túneles de viento relacionados con el campo automotriz incursionado primero en los autos de carrera. (Landázuri, 2016 pág. 13)

Dado que en las competencias automovilísticas se buscaba alcanzar una velocidad punta más alta mediante la reducción de la resistencia al aire. (Edgar, 2013)

Lograron su objetivo por medio de la reducción del área frontal de los vehículos; pero a pesar de tener velocidades más altas los tiempos de vuelta no se lograban reducir debido a que las distancias de frenado y la velocidad en curvas tenía que ser mucho menor, y al modificar de esta manera los vehículos, lo que produjeron fue sustentación lo que en rectas tenían una velocidad mayor pero en curvas debían reducir casi al mínimo la velocidad para circular, aumentando el riesgo de accidentes. (Padilla, 2015)

Para combatir este efecto los fabricantes de vehículos de competencia se tomaron muy en serio la idea de crear lo contrario a la sustentación y mejorar el agarre. (Gil, 2006)

Al hacer esto la velocidad punta disminuyó, pero se consiguió mejorar los tiempos de vuelta, debido a que la velocidad en curva era superior y que la distancia de frenado se había reducido rotundamente, a partir de ese momento comenzaron a aparecer los vehículos con alerones para crear apoyo aerodinámico. (McBeath, 2011)

Con estos antecedentes un ingeniero/piloto Jim Hall apareció con alerones montados en su vehículo con la idea de que, si los aviones generan tanta sustentación para permanecer en el aire, al invertirlos se puede crear fuerza aerodinámica que empuje a los autos hacia el piso. (Padilla, 2015 pág. 12)

De esta manera empezó una revolución en el diseño de los vehículos, para competencias que se debía equilibrar correctamente la adherencia producida por el aire para no afectar mucho a la velocidad final. (Padilla, 2015, p. 13)

Así se vio que esto también debería aplicarse a los autos comunes, entre las marcas de autos estaban Lotus, Citroën y Porsche, quienes ya lo aplicaban a sus coches de alta gama. Luego vino Citroën a cambiar todo esto al realizar pruebas en el túnel de viento para autos comunes de ciudad. (Landázuri, 2016 pág. 13)

Con los vehículos de producción en serie se ha buscado generar una baja resistencia al aire que permita reducir los consumos de combustible haciéndolos más eficientes a los modelos de vehículos cada año. (Gil, 2006)

Por tanto, al momento de diseñarlos se consideran su forma, rugosidad superficial, el área de contacto con el aire y sobre todo la velocidad relativa entre éste y el aire. (Olivares de Jodar, 2011)

Todo esto se traduce en que, sobre cada punto de la superficie del automóvil, estén presentes un par de fuerzas, una fuerza de presión, normal a la superficie del cuerpo, debido a la velocidad relativa entre ambos y una fuerza de rozamiento, tangente a la superficie del cuerpo, debida a la viscosidad del aire. (Olivares de Jodar, 2011)

Por lo que, la fuerza aerodinámica es generada cuando una corriente de aire fluye sobre y por debajo de este. Por tanto, la fuerza aerodinámica es la resultante de dos fuerzas que desempeñan un papel importantísimo la sustentación y la resistencia al avance. (Frajia B, 2006)

En a la actualidad el flujo de aire sobre el vehículo es fundamental ya que produce diferentes fenómenos como la estabilidad y la adherencia al piso. Lo que se convierte en más o menos consumo de combustible. (Curicama, y otros, 2013 pág. 53)

De ahí nace la importancia de construir un túnel de viento para la Carrera de Ingeniería Automotriz. El cual es tipo abierto y está diseñado para probar maquetas a escala. Dado que estos tipos de túneles son más fáciles de fabricar y no muy costosos.

Debido al avance tecnológico de las computadoras siendo cada vez más robustas, ha ido creciendo el uso de métodos computacionales como el CFD ya que es más económico. Para estimar los valores de fuerzas y momentos, los cuales usualmente se obtienen en un túnel de viento y de esta manera tener una idea de la resistencia al avance y sustentación de un vehículo.

Mediante los estudios aerodinámicos se va logrando construir autos cada vez más rápidos y estables a altas velocidades. Por lo tanto, un buen estudio de los mismos dará como resultado coches más ecológicos, seguros y eficientes.

1.2 Planteamiento del problema

El túnel de viento a escala del laboratorio de aerodinámica de la Carrera de Ingeniería Automotriz es de tipo soplado con circulación abierta. Debido a que la electrónica implementada en el mismo

es ineficiente porque no permite monitorear las pruebas aerodinámicas en tiempo real. Es decir, no se puede digitalizar el efecto del aire sobre el vehículo a través de una pantalla. Así también, que las mediciones tomadas por las galgas extensiométricas en la zona de pruebas poseen mucha variación debido a las que las galgas instaladas son de alta resistencia y no son las adecuadas. Por esas razones es necesario realizar una reingeniería de la electrónica del túnel con el fin de mejorar la precisión de los resultados.

1.3 Justificación

1.3.1 Justificación teórica

La tendencia de las industrias de automóviles busca que sus vehículos cada vez sean más rápidos manteniendo la estabilidad del mismo. El método ampliamente usado por las empresas o escuderías es analizar la eficiencia aerodinámica del auto empleando un túnel de viento. Por esta razón se hizo la repotenciación y optimización del túnel del laboratorio aerodinámica de la Carrera de Ingeniería Automotriz realizado como un trabajo de titulación para mejorar toma de datos de las pruebas aerodinámicas de maquetas de vehículos con una escala 1:18. Así permitiendo conocer el principio de funcionamiento del mismo.

1.3.2 Justificación metodológica

Para elaborar el presente trabajo de titulación tipo propuesta tecnológica primero se procedió con la investigación bibliográfica para conocer los principios de funcionamiento del túnel de viento, luego se pasó a instalar la instrumentación y para gestionar el procesamiento de los datos se hizo la programación del software con Arduino para visualizar los datos en la pantalla con el fin de monitorear las pruebas aerodinámicas. Después se realizó pruebas en el banco para analizar la eficiencia aerodinámica de maquetas a escala de vehículos para luego hacer una comparación de los resultados obtenidos mediante el análisis aerodinámico CFD a través del software SolidWorks para validar el estudio. Por último, se actualiza el manual de operación y mantenimiento del túnel de viento para las respectivas prácticas.

1.3.3 Justificación práctica

La importancia del túnel de viento es que tiende a ser amigable con el ambiente ya que se puede realizar las pruebas de eficiencia aerodinámica con modelos de vehículos a escala para luego llevarlo a la práctica en un automóvil real y así cumplir con las normativas vigentes respecto a las emisiones que cada vez son más estrictas.

En la actualidad la mayoría de las personas tienden a modificar el aspecto de la carrocería y las características técnicas de sus automóviles haciéndolo exclusivos y personalizados a los gustos de los propietarios. Pero no todo es positivo porque estos cambios pueden afectar la estabilidad del vehículo a altas velocidades pudiendo llegar a producir accidentes debido a la deficiencia aerodinámica que presenta.

Dado que cuando el auto se mueve ha de hacerse desplazando el aire en su entorno. Por tanto, de la calidad con que desarrolle este desplazamiento influirá en el consumo de combustible, ruido, potencia desarrollada por el motor, estabilidad a altas velocidades. De ahí la importancia de la forma final de la carrocería debido a que las fuerzas aerodinámicas que interactúan con la misma se elevan o disminuyen en función de su coeficiente de arrastre. Lo cual se puede determinar mediante un túnel de viento ya que simula las condiciones meteorológicas de la carretera. Lo que permite estudiar cómo se comporta un determinado diseño haciendo posible saber cuánta velocidad puede alcanzar determinado vehículo.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Repotenciar y optimizar el túnel de viento de la Carrera de Ingeniería Automotriz para realizar pruebas aerodinámicas de maquetas de vehículos a una escala 1:18.

1.4.2 Objetivos específicos

- Hacer una revisión bibliográfica del principio de funcionamiento del túnel de viento y análisis aerodinámico mediante ordenador.
- Implementar instrumentación para la digitalización de los coeficientes de arrastre, sustentación y velocidad del viento.
- Digitalizar en tiempo real el efecto del aire en las fuerzas de sustentación y arrastre.
- Mejorar la visualización de las líneas de flujo.

- Actualizar el manual de operación y mantenimiento del túnel de viento.
- Validación y/o verificación de la instrumentación mediante un análisis comparativo con un software de simulación.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Aerodinámica

La aerodinámica es la parte de la mecánica de fluidos que estudia el movimiento del aire y su interacción con los objetos que se mueven. Tiene como principal objetivo el análisis del comportamiento del aire (o diferentes masas de gases) en torno a elementos u objetos que entran en movimiento. (Olivares de Jodar, 2011)

2.1.1 Teorema de Bernoulli

El matemático y físico holandés Daniel Bernoulli enuncia; que se produce una disminución de la presión de un fluido (líquido o gas) en movimiento cuando aumenta su velocidad. (Tipler, 2005)

Dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{v^2 \rho}{2} + P + \rho g z = k$$

Donde:

ρ : Densidad

P : Presión

v : Velocidad

k : Constante

g : Aceleración gravitatoria

z : Altura en la dirección de la gravedad desde un punto de referencia.

El teorema afirma que la energía total de un sistema de fluidos con flujo uniforme permanece constante a lo largo de la trayectoria de flujo, se puede demostrar que, como consecuencia de ello, el aumento de velocidad del fluido debe verse compensado por una disminución de su presión. (Mott, 2006)

2.1.2 Efecto Venturi

Es una de las aplicaciones de mayor interés práctico del teorema de Bernoulli y de las consecuencias derivadas de su ecuación de balance energético, provocado por el principio según el cual en los estrechamientos de un conducto por el que circula un líquido en régimen estacionario se produce un descenso de la presión hidrostática. (Padilla, 2015 pág. 4)

La causa fundamental de esta reducción en la presión es el incremento de la velocidad del líquido, provocado a su vez por la disminución del espesor de la línea de sección y de la incompresibilidad, es decir, las partículas de un fluido que pasan a través de un estrechamiento aumentan su velocidad, con lo cual disminuye su presión. (Padilla, 2015 pág. 4)

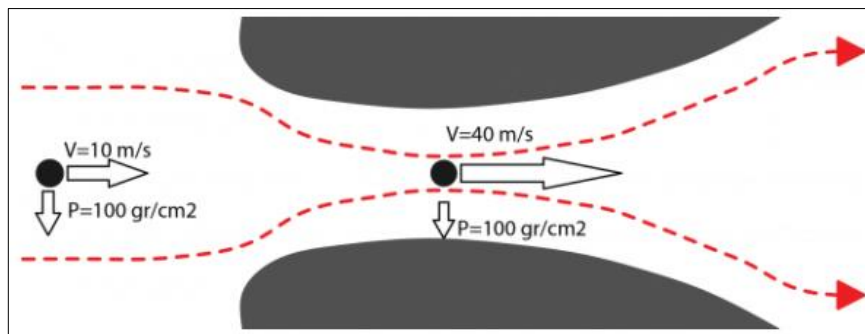


Figura 1-2: Efecto Venturi

Fuente: (IMechE, 2014)

2.2 Fuerzas aerodinámicas

Cuando un proceso mecánico interactúa dos sólidos, las fuerzas se aplican y transmiten en el punto de contacto. Pero cuando un sólido interactúa con el aire, en las moléculas del aire próximas al mismo se produce una distorsión, comenzando a moverse alrededor del sólido. (Olivares de Jodar, 2011)

El aire cambia de forma, fluyendo alrededor del sólido y manteniendo un contacto físico en todos sus puntos. Por ello, el “punto de contacto” de las fuerzas aerodinámicas generadas son todos y cada uno de los puntos de la superficie del cuerpo. (Olivares de Jodar, 2011)

La magnitud de dichas fuerzas va a depender tanto del aire como del sólido, en nuestro caso el automóvil. Dos son las propiedades fundamentales del aire a tener presentes: la viscosidad y su densidad o lo que es lo mismo, su compresibilidad. (Olivares de Jodar, 2011)

Ya sea un avión de pasajeros, un automóvil o una simple pelota, las fuerzas que experimentan son las mismas y en resumen podemos mencionar las siguientes: resistencia al avance y sustentación. (Padilla, 2015 pág. 6)

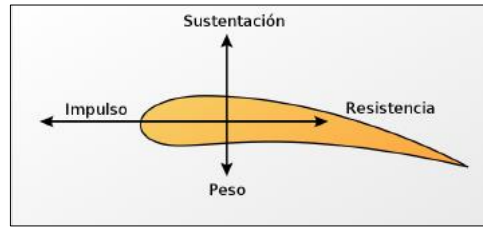


Figura 2-1: Fuerzas incidentes en un cuerpo

Fuente: (Engineers, 2009)

En la solución de un problema aerodinámico normalmente se hace necesario el cálculo de varias propiedades del fluido, como pueden ser velocidad, presión, densidad y temperatura, en función de la posición del punto estudiado y el tiempo. (Padilla, 2015 pág. 6)

2.2.1 Resistencia al avance

Se denomina resistencia al avance, a la fuerza que sufre un cuerpo al moverse a través de un fluido, y en particular a la componente de esa fuerza en la dirección de la velocidad relativa del cuerpo respecto del medio. (Hucho, 2013)

La aerodinámica y su respectiva resistencia aerodinámica son uno de los condicionantes a la hora de diseñar y construir un vehículo. Debido a este fenómeno podemos observar diferencias aparentes sobre un mismo modelo de vehículo, siempre en función de la velocidad, es decir, cuanto más aerodinámico es un vehículo, mejor incide en el medio. (Olivares de Jodar, 2011)

Dicha fuerza está dada por la ecuación:

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 C_d S \quad (2-2)$$

Donde:

D : Resistencia al avance

ρ : Densidad del fluido

V : Velocidad

C_d : Coeficiente de resistencia

S : Área

En la figura 3-2 se visualiza los movimientos de las líneas de viento dependiendo de la forma de los cuerpos, al chocar el viento con una superficie plana se puede ver como las líneas de aire se

rompen formando turbulencia, en cambio el otro cuerpo no rompe las líneas de aire, no se crea turbulencia. (Padilla, 2015 pág. 7)

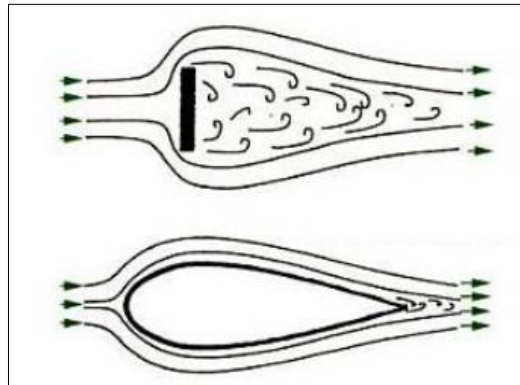


Figura 3-2: Movimiento del viento según la forma del objeto

Fuente: (Gil, 2006)

2.2.2 *Sustentación*

La sustentación es la fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido. (McBeath, 2011)

Tiene dirección perpendicular respecto a la velocidad de la corriente incidente. Esta se produce cuando el aire que pasa por debajo de un objeto pasa más lentamente y por lo tanto a mayor presión que el que fluye por encima, este efecto permite que el objeto venza la fuerza de la gravedad, y como su propio nombre indica, se sustente en dicho fluido e incluso se eleve aún más. (Padilla, 2015 pág. 8)

Esta dada por la ecuación:

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 C_l S \quad (2-3)$$

Donde:

L : Sustentación

ρ : Densidad del fluido

V : Velocidad

C_l : Coeficiente de sustentación

S : Área

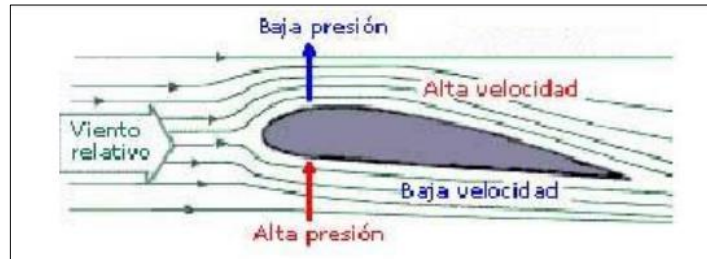


Figura 4-2: Fuerza de presión según la velocidad de viento

Fuente: (McBeath, 2011)

De la figura 4-2 (que hace una curva convexa) se llama "extrados", y la inferior (con curva cóncava) se llama "intrados". La parte más importante es el "extrados", y lo que hace con el aire, pues genera una cierta succión hacia arriba de toda el ala (mientras que el "intrados" puede ser recto). Este principio es el utilizado por las alas de los aviones para funcionar. (Padilla, 2015 pág. 9)

2.2.3 Fuerza lateral

Es la fuerza provocada por el viento según la dirección perpendicular al plano de simetría del cuerpo. (Tremayne, 2009), dada por la ecuación:

$$Y = \frac{1}{2} \rho V^2 C_y S \quad (2-4)$$

Donde:

Y : Fuerza lateral

ρ : Densidad del fluido

V : Velocidad

C_y : Coeficiente de sustentación

S : Área

Existen muchas variables que pueden influir en la resistencia y sustentación del aire, las cuales se dan por el diseño del objeto y condiciones climáticas. Entre las cuales se pueden mencionar a la densidad del aire, la velocidad relativa del cuerpo respecto al aire, y la viscosidad.

2.2.4 Número de Reynolds

El número de Reynolds (Re) es un número adimensional que relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo en una expresión adimensional, que interviene en numerosos problemas de dinámica de fluidos. (Mott, 2006)

Para valores de $Re < 2100$ el flujo se mantiene estacionario y se comporta como si estuviera conformado por laminas delgadas, a este flujo se lo conoce como laminar, para valores de Re entre 2100 y 3000 el fluido pierde estabilidad formándose pequeñas ondulaciones pequeñas en el tiempo, y para valores superiores a 3000 tiende a difundirse todo el flujo lo que es llamado turbulencia. (Bonner, 2012)

2.2.5 *Coefficientes de fuerzas aplicadas*

Los coeficientes aerodinámicos son números adimensionales que se utilizan para el estudio aeronáutico o aerodinámico de las fuerzas y momentos que sufre un cuerpo cualquiera en movimiento en el seno del aire (Olivares de Jodar, 2011). Algunos de los coeficientes más conocidos son:

- El coeficiente de sustentación C_l .
- El coeficiente de resistencia C_d .
- El coeficiente de penetración C_x .

En la automoción también se utilizan estos coeficientes para el estudio aerodinámico; sin embargo, suele utilizarse una notación diferente a la utilizada en aeronáutica, utilizando como subíndices los ejes de referencia del vehículo (X en sentido longitudinal, Y en sentido transversal y Z en sentido vertical). (Olivares de Jodar, 2011)

- El coeficiente de resistencia aerodinámica suele simbolizarse como C_x , en vez de C_d . Habitualmente se utiliza como superficie de referencia el área frontal del vehículo. (Olivares de Jodar, 2011)
- El coeficiente de empuje lateral aerodinámico suele simbolizarse como C_y , igual que en aeronáutica. Habitualmente se utiliza como superficie de referencia el área frontal del vehículo. (Olivares de Jodar, 2011)
- El coeficiente de sustentación suele simbolizarse como C_z , en vez de C_l . No obstante, también se utiliza su opuesto, el coeficiente de antisustentación, que relaciona la fuerza de antisustentación (componente en sentido descendente de la fuerza aerodinámica) y el producto de la presión dinámica del aire por el área característica. Habitualmente se utiliza como superficie de referencia el área frontal del vehículo, aunque a veces también se utiliza el área de la proyección en planta. (Olivares de Jodar, 2011)

- El Coeficiente de arrastre, es una medida común en el diseño de automóviles pertenecientes a la aerodinámica efectos. Como la resistencia aerodinámica aumenta con el cuadrado de la velocidad, un valor bajo es preferible a uno alto. Con un 60% de la potencia necesaria para navegar a velocidades de carretera se utilizan para superar los efectos aerodinámicos minimizar traduce directamente en una mejora de arrastrar la eficiencia del combustible. (Olivares de Jodar, 2011)
- Por esa misma razón son una preocupación creciente para los diseñadores de camiones, donde la mayor área de superficie presenta importantes ahorros potenciales en costos de combustible. (Olivares de Jodar, 2011)

2.2.6 Eficiencia aerodinámica

Se denomina eficiencia aerodinámica a la relación entre el coeficiente de sustentación y el coeficiente de resistencia aerodinámica (C_l/C_d o C_z/C_x). (Olivares de Jodar, 2011)

2.3 Aerodinámica del automóvil

En aerodinámica y diseño de carrocerías, existe un coeficiente de resistencia al avance que se denomina (C_x). El objetivo consiste en mejorar este coeficiente gracias a diseños más eficientes sin perjudicar la estética, para aprovechar cada caballo de fuerza producido por el motor, logrando velocidades superiores, y obteniendo mejores índices en consumo de combustible.

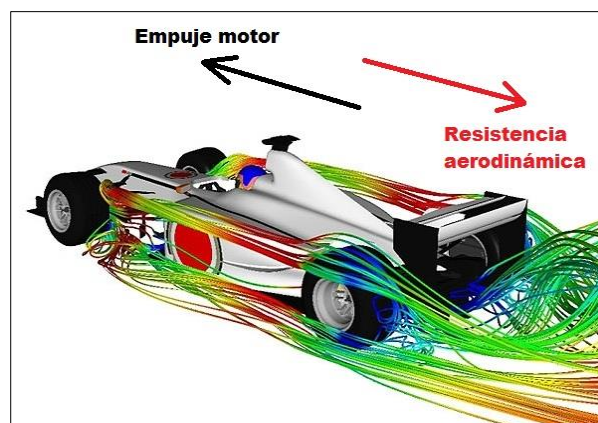


Figura 5-2: Resistencia aerodinámica de una formula 1

Fuente: (Oriol, 2018)

Por otra parte, en el mundo de las carreras, se sacrifica mucho la resistencia al avance para lograr fuerzas descendentes que presionen al vehículo contra el pavimento. Es por eso que es muy común ver en deportivos y autos de pista, varios tipos de alerones que generan "Downforce". Esta fuerza al igual que el Cx, resulta exponencial a la velocidad, lo cual es muy conveniente en carreras ya que aumenta la adhesión al piso a altas velocidades. Aunque un alerón influye negativamente sobre la resistencia al avance (los vehículos de carrera compensan esta pérdida al equipar motores con mucha potencia y caballos de fuerza adicionales).

2.3.1 Estudio del efecto suelo

En el automovilismo se busca crear una zona de alta presión por encima del vehículo y una de baja presión por debajo. La diferencia de presiones provoca una succión que "aplasta" al vehículo contra el suelo, mejorando el agarre, lo que se traduce en la posibilidad de trazar curvas a mayor velocidad. (Olivares de Jodar, 2011)

2.3.2 Presiones sobre el vehículo

La distribución de presión estática es resultado del mecanismo básico explicado en el anterior punto. Una presión negativa se desarrolla en la punta frontal del capó cuando el flujo que sube de la parte frontal intenta seguir la forma horizontal del capó. El gradiente de presión adverso en este punto tiene el potencial de atascar el flujo de capa límite creando arrastre en esta área. (Olivares de Jodar, 2011)

2.3.3 Carga aerodinámica y agarre

La carga aerodinámica y el agarre están dados básicamente por la fuerza de fricción que existe entre todo cuerpo que se encuentra en movimiento sobre una superficie sin importar cuál sea esta. (Wagstaff, 2011)

La fuerza normal es la fuerza perpendicular que es ejercida por el cuerpo sobre la superficie, es decir el peso del cuerpo. (Padilla, 2015 pág. 15)

El coeficiente de fricción esta dado según la naturaleza del cuerpo, y la superficie sobre la que se encuentra. (Padilla, 2015 pág. 15)

Por ejemplo: podemos encontrar un coeficiente de fricción muy bajo entre la navaja de unos patines de hielo y el hielo, por el contrario unos neumáticos que se utilicen para carreras de drag son muy anchos y de un material sumamente áspero que permita mover el vehículo instantáneamente sin hacer patinar las ruedas a pesar de toda la fuerza y torque generado por el motor. (Padilla, 2015 pág. 16)

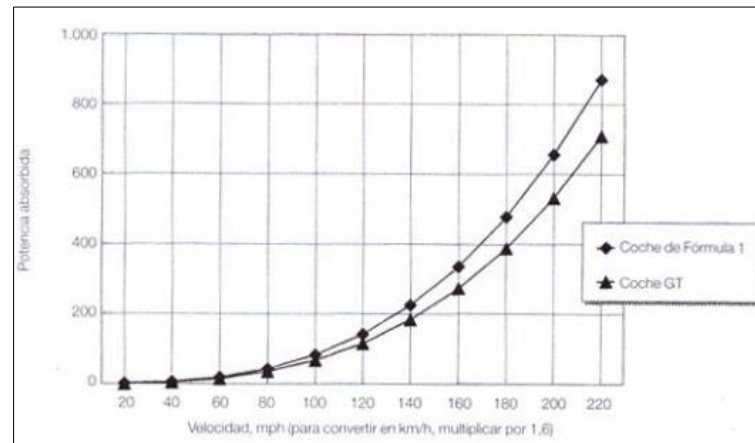


Gráfico 1-2: Potencia absorbida por la resistencia aerodinámica

Fuente: (Engineers, 2009)

La fuerza de fricción dependiendo su origen, es la que influye en el agarre o sustentación de un automóvil, la única fuerza que se puede modificar es la normal, ya que el coeficiente de fricción es una constante entre 2 superficies. (Padilla, 2015 pág. 16)

Pensar en modificar una fuerza que trabaja con la gravedad parece algo imposible y de hecho en cualquier otro planeta o astro es algo imposible, pero eso podemos conseguir en nuestro planeta gracias al aire, en este punto entra en juego la aerodinámica, ya que por medio de apéndices aerodinámicos se puede modificar la fuerza normal para aumentarla o disminuirla según requiera el automotor. (Padilla, 2015 pág. 16)

Para un auto ecológico y que quiera tener consumos bajos de combustible, lo que se va a buscar es en lo posible disminuir la resistencia al avance, buscando la menor fuerza de fricción posible. (Padilla, 2015 pág. 16)

Al contrario de lo que se busca en un vehículo de competencias para circuito que su objetivo es crear carga y agarre especialmente en curvas para así mejorar el tiempo de vuelta, donde los consumos de combustible y emisiones contaminantes pasan a segundo plano. (Padilla, 2015 pág. 16)

2.3.4 *Sustentación de los automoviles*

Conforme el tiempo ha pasado los diseños de los vehículos han ido evolucionando de formas rectas y retrogradas hasta, formas con curvas muy pronunciadas que tienen como objetivo reducir el coeficiente C_x de resistencia aerodinámica, para mejorar la eficiencia del automóvil, aumentando la autonomía del combustible para brindar mayores distancias recorridas a cambio de menores consumos de combustible y por ende reducir las emisiones contaminantes. (Engineers, 2009)

Al tener un coeficiente C_x bajo se produce sustentación positiva aerodinámica ya que los vehículos intentan o suponen una forma de ala de avión, el objetivo de esto es aminorar la presión en la parte superior del automóvil. (Gutiérrez, 2012)

2.3.4.1 Spoilers

Entre las ventajas principales de los spoilers esta que no aumenta la resistencia al aire (Gil, 2006). Los spoilers son apéndices aerodinámicos que tienen como función reducir la sustentación.

2.3.4.2 Spoilers posteriores

El error más común al momento de instalar spoilers en vehículos hatchback es su mala ubicación que genera peso sin obtener ningún beneficio. (Padilla, 2015 pág. 19)



Figura 6-2: Spoilers posteriores

Fuente: (Padilla, 2015 pág. 20)

La posición correcta es la que se muestra en la figura 8-2, donde se puede notar que interrumpe el flujo de aire que pasa por el vehículo lo que aumenta la presión en la parte posterior generando mayor estabilidad sin comprometer la resistencia aerodinámica.



Figura 7-2: Spoilers del Volkswagen Golf GTI MK7

Fuente: (Padilla, 2015 pág. 20)

Los spoilers pueden variar su diseño de acuerdo a tamaño y ángulo en el que se fabriquen, el tamaño normalmente puede ir entre 50mm y 100mm y los ángulos van desde 10° a 60° . En la tabla 1-2 se indica como la fuerza de sustentación es directamente proporcional al coeficiente de resistencia aerodinámica. (Padilla, 2015 pág. 20)

Los sedanes no están muy propensos a estos errores al tener la parte posterior alargada como se puede observar en la figura 8-2, que este vehículo tiene de fábrica un spoiler que aumenta su eficiencia y su estética. (Padilla, 2015 pág. 20)



Figura 8-2: Spoiler Honda Civic 2012

Fuente: (Pickup 4x4, 2020)

Tabla 1-2: Coeficiente de resistencia, respecto de fuerza de sustentación

ΔC_L (Coeficiente de resistencia aerodinámica)	Fuerza de sustentación (kg)
0,1	29
0,15	43,6
0,2	58,2
0,25	72,2
0,3	87,3
0,35	101,8
0,4	116,3

Fuente: (McBeath, 2011)

Realizado por: Quinatoa C, 2020

2.3.4.3 Spoilers delanteros

El spoiler delantero (figura 9-2) va ubicado en la parte inferior del parachoques frontal su función principal aumentar le velocidad del aire que pasa por debajo del vehículo para que de esta manera la presión disminuya en esta parte y aumente en la superficie del mismo y así lograr una mayor adherencia del automóvil a la carretera. (McBeath, 2011)

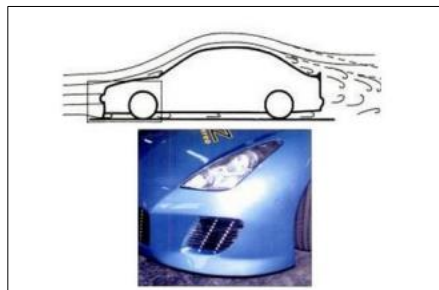


Figura 9-2: Flujo de aire en spoiler delantero

Fuente: (Gil, 2006)

Todo esto se consigue sin aumentar la resistencia aerodinámica, lo que se traduce en mejores prestaciones en cuanto a estabilidad y por lo tanto la seguridad activa del vehículo sin aumentar el consumo de combustible. (Padilla, 2015 pág. 22)

2.3.4.4 Spoilers laterales

Los spoilers laterales tienen como objeto permitir que el aire que fluye en la parte inferior del automóvil sea uniforme y también de evitar el ingreso de aire a la parte inferior del vehículo por los lados. (Gil, 2006)

2.3.5 Alerones

Como la palabra mismo lo indica, alerón viene de “ala”, procedente directamente de la aeronáutica y de los aviones, este es un cuerpo con tal forma que sea capaz de crear fuerza de sustentación o carga aerodinámica sin causar resistencia excesiva. (McBeath, 2011)

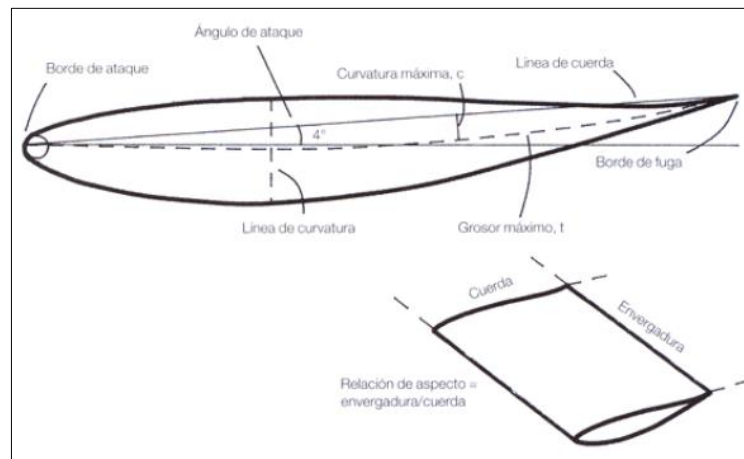


Figura 10-2: Partes del alerón

Fuente: (Gil, 2006)

Entre los cuales se puede encontrar vehículos con alerones de uno, dos o más elementos así también alerones múltiples.

2.4 Túnel de viento

El túnel de viento es una instalación experimental que tiene como objetivo permitir el estudio de cómo actúa el viento al incidir sobre objetos de distintas formas y naturaleza. (Barnard, 2009)

Estos estudios permiten predecir las fuerzas generadas cuando estos cuerpos se desplazan en el seno del aire. (Padilla, 2015 pág. 25)

Tienen como principal función, observar los cambios que tiene el flujo de viento en el coche, está constituido por turbinas las cuales generan un flujo continuo de aire, los cuales tiene algunas clasificaciones véase la figura 11-2. (Landázuri, 2016 pág. 22)



Figura 11-2: Túnel de viento cerrado

Fuente: (García, 2015)

En el ámbito automotriz es una herramienta muy importante de desarrollo y simulación, y es usada en conjunto con el CFD (computational fluid dynamics) 26 para demostrar conceptos aerodinámicos y nuevos componentes durante el proceso de desarrollo y diseño de los vehículos. Generalmente la prueba de túnel de viento es utilizada para demostrar y afinar conceptos que han sido evaluados con anterioridad en el CFD. (Tremayne, 2009)

Por medio de esta herramienta se estudia las líneas de flujo que se generan al hacer incidir el aire sobre varios modelos de vehículos, y así se puede observar la formación de flujos turbulentos en las zonas donde la aerodinámica del modelo es menos favorable. (Padilla, 2015 pág. 26)

2.4.1 Tipos de túneles de viento

Para (Wagstaff, 2011) existen túneles de viento de diferentes tipos según su estructura:

2.4.1.1 Túnel abierto

Estos túneles son los más fáciles de fabricar, el aire ingresa desde el exterior hacia la sección de prueba luego hacia el exterior, existen dos tipos de circulación abierta: la una es aspirada y la otra es soplada obsérvese la figura 12-2. (Landázuri, 2016 pág. 23)

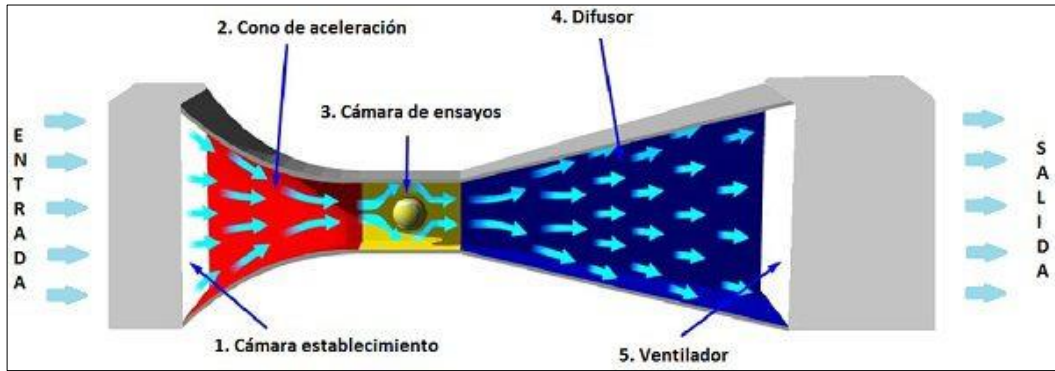


Figura 12-2: Túnel abierto

Fuente: (Flaldia, 2010)

2.4.1.2 Túnel cerrado

Este ciclo de túnel cerrado tiene características, como la salida está conectada directamente en la entrada formando un lazo, su construcción es más difícil y son más largos, también debe de ver la fluidez del aire en su interior, los ventiladores deben ser axiales, se colocan compresores en algunas partes del túnel para obtener velocidades muy fuertes véase la figura 13-2. (Landázuri, 2016 pág. 24)

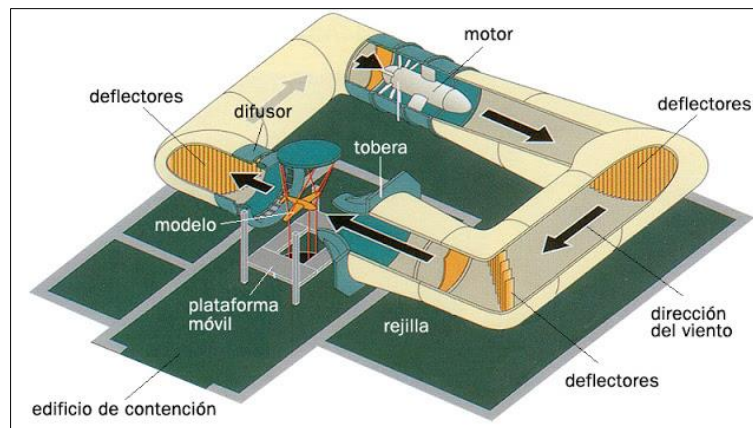


Figura 13-2: Túnel cerrado

Fuente: (Reflexiones Prohibidas, 2012)

2.4.1.1 *Soplado o aspirado*

Por la disposición de los ventiladores dentro del túnel se diferencia entre el túnel soplado con el aspirado, el que tiene el grupo de ventiladores antes de la cámara de ensayos es el soplado y el que tiene el grupo de ventiladores después de la cámara de ensayos es el aspirado.

Las dos configuraciones tienen ventajas e inconvenientes, depende del uso que se va a dar al túnel de viento. La mejor disposición para un túnel de viento es el de túnel aspirado que, aunque proporciona menor velocidad de aire que el soplado produce mejor uniformidad del flujo y su configuración permite que el flujo sea regular y uniforme. (Padilla, 2015 pág. 29)

2.5 **Software SolidWorks**

Es un software de diseño CAD 3D (diseño asistido por computadora) para modelar piezas y ensamblajes en 3D y planos en 2D. El software que ofrece un abanico de soluciones para cubrir los aspectos implicados en el proceso de desarrollo del producto. Sus productos ofrecen la posibilidad de crear, diseñar, simular, fabricar, publicar y gestionar los datos del proceso de diseño. (Solid Business Intelligence, S.L., 2020)

De los productos que ofrece el Software SolidWorks el que nos interesa para llevar a cabo este estudio es uno de los módulos de análisis, cálculo y validación del producto SolidWorks Simulation más específicamente hablando del módulo Solidworks Flow Simulation.

2.5.1 *Solidworks Simulation*

El software de cálculo y validación SOLIDWORKS Simulation, somete los diseños a condiciones idénticas que experimentaría en la realidad, aumentando la calidad de los productos al tiempo que reduce el coste de sus prototipos. (Solid Business Intelligence, S.L., 2020)

Los productos asociados a SOLIDWORKS Simulation son los siguientes:

- Solidworks Simulation con tres paquetes disponibles: Simulation Standard, Professional y Premium. (Solid Business Intelligence, S.L., 2020)

- Solidworks Flow Simulation dedicado a la dinámica de fluidos.
- Solidworks Plastics dedicado a la simulación de moldes y piezas de plástico con tres paquetes disponibles: Solidworks Plastics Standard, Professional y Premium. (Solid Business Intelligence, S.L., 2020)

2.5.2 *Solidworks Flow Simulation*

Esta herramienta puede simular con eficacia el flujo de fluidos, así como la transferencia de calor y las fuerzas de esos fluidos fundamentales para realizar un diseño exitoso. (Dassault Systemes, 2020)

Cumple el objetivo de eliminar la complejidad de la dinámica de fluidos computacional (CFD). Así, los ingenieros y diseñadores podrán aprovechar los datos de la CFD y tomar unas decisiones técnicas más enfocadas a la ingeniería en la que están trabajando. (Dassault Systemes, 2020)

Entre las ventajas que ofrece este módulo tenemos:

- Dinámica de fluidos computacional (CFD). - Simula rápida y eficazmente el flujo de los fluidos y la transferencia de calor implicada en tus diseños. (Dassault Systemes, 2020)
- Factores de confort térmico. - Gracias a este análisis podrás evaluar la comodidad térmica de los diferentes entornos que comprenden tu diseño. (Dassault Systemes, 2020)
- Visualización de simulaciones. - Podrás barajar las diferentes alternativas de diseño y tomar decisiones que ayuden a reducir el número de costosos prototipos. (Dassault Systemes, 2020)
- Análisis de flujo de fluidos. - Podrás saber qué impacto tendrán los gases o líquidos a lo largo del proceso de diseño. (Dassault Systemes, 2020)
- Gestión térmica de dispositivos electrónicos. - Gracias a la posibilidad de incorporar placas de circuito impreso y dispositivos electrónicos podrás realizar análisis térmicos de los componentes. (Dassault Systemes, 2020)
- Análisis térmico de fluidos. - Podrás analizar qué consecuencias traerán los cambios en las temperaturas del componente, saber cuál es el movimiento de los fluidos dentro y fuera del diseño.

2.5.3 *CFD*

El CFD (Computational Fluid Dynamics) es una herramienta informática utilizada para entender y predecir el comportamiento de un fluido en unas condiciones determinadas. (Caro, 2020)

Este comportamiento se podría estudiar en cada punto del fluido con las ecuaciones de Navier-Stokes, pero son demasiado complejas y por eso se recurre a las simulaciones. (Caro, 2020)

Hay varios tipos de CFD, pero el más utilizado es el de volúmenes finitos, basado en dividir el fluido en pequeños bloques y simular el comportamiento en los vértices de cada uno. Es decir, en vez de tratar las infinitas moléculas del fluido, se tratarán un número finito. (Caro, 2020)

El fluido puede ser cualquier líquido o gas. Los más habituales son aire (gas) en estudios de aerodinámica y agua (líquido) en estudios de hidrodinámica. (Caro, 2020)

Sobre ese fluido, el comportamiento que se busca comprender se basa en el movimiento, velocidad, presión y transferencia de calor, aunque también hay otros parámetros que se pueden estudiar. Es fundamental saber que cuando se realiza un estudio aerodinámico de un vehículo véase la figura lo más importante es la velocidad relativa entre aire y el objeto no de quien se mueva contra el otro. (Caro, 2020)

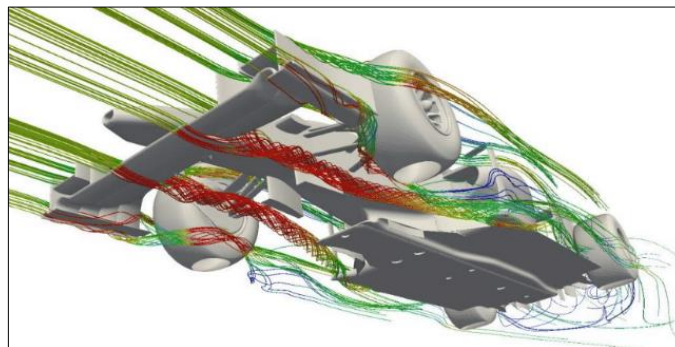


Figura 14-2: Simulación aerodinámica de un Fórmula 1

Fuente: (Caro, 2020)

3 METODOLOGÍA

3.1 Proceso metodológico

Se procedió de acuerdo con el siguiente esquema para desarrollar el presente estudio, el cual esta ordenado por fases.

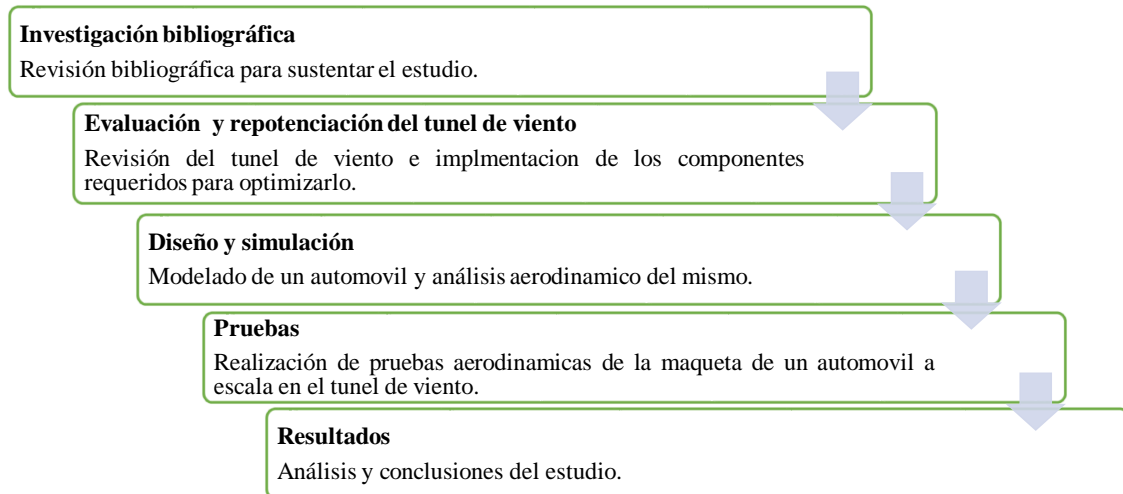


Figura 15-3: Proceso metodológico

Fuente: Quinatoa C, 2020

Dado que este estudio se trata de una investigación con un diseño no experimental, de tipo aplicada y transversal; a nivel exploratorio de carácter cuántico, usando el método deductivo y analítico con ayuda de la teoría del fenómeno de estudio, utilizando la observación directa e indirecta como instrumento para recolectar información. Así también empleando la estadística descriptiva para el ordenamiento y análisis de los datos. Es decir que la metodología de la investigación busca cuantificar mediante datos la eficiencia aerodinámica de un automóvil real a través de modelos a escala.

La modalidad de la investigación, técnicas e instrumentos que fueron empleados se muestran en la tabla 2-3:

Tabla 2-3: Modalidad, técnicas e instrumentos de la investigación

MODALIDAD DE INVESTIGACIÓN	TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN	INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN
Investigación bibliográfica	Análisis documental	Datasheets Tesis de grado

		Manuales Fichas técnicas
Investigación aplicada	Observación Análisis CFD Pruebas aerodinámicas	SolidWorks Proteus 8 Arduino Túnel de viento

Fuente: Quinatoa C, 2020

3.2 Investigación bibliográfica

Todas las bases teóricas necesarias para el desarrollo de este estudio se describieron en el capítulo 2 de este documento para las cuales se recurrió a libros, artículos científicos, páginas web, tesis de grado con temas relacionados para extraer la información pertinente.

3.3 Evaluación y repotenciación del túnel de viento

Al realizar la respectiva revisión de los elementos del túnel viento del laboratorio de aerodinámica de la Carrera de Ingeniería Automotriz se pudo verificar que casi todos los componentes de este, están en perfectas condiciones y funcionando por lo que no necesitan reparación; no más allá de su respectivo mantenimiento a excepción de la electrónica.

Por tanto, obsérvese la tabla 3-3 donde se indican el estado en que se encontraron los diferentes componentes del túnel de viento.

Tabla 3-3: Estados de los componentes del túnel de viento

Componentes	Estado	Avería
Bancada	Bueno	No
Motor trifásico ABB Motors de 1hp	Bueno	No
Cámara de humo Italy audio modelo Z 600	Bueno	No
Variador de frecuencia Siemens	Bueno	No
Túnel	Bueno	No
Ventilador de 1 hp	Bueno	No
Cámara de pruebas	Bueno	No
Electrónica	Deficiente	No

Fuente: Quinatoa C, 2020

Al finalizar la inspección se pudo notar que la electrónica del mismo es deficiente. Dado que las galgas extensiométricas no están calibradas por lo que las mediciones tomadas no son las reales. Además, de que las galgas instaladas de 5 kg presentan alta resistencia a deformarse y por tanto son menos sensibles a los cambios en el flujo de aire en la zona de pruebas.

3.3.1 *Repotenciación y optimización del túnel de viento*

Como en el presente estudio se busca digitalizar los datos a través de una pantalla en tiempo real, lo cual no es posible en la tesis anterior. Por tanto, se trabaja en la electrónica del túnel aerodinámico. Las demás piezas, se dejan tal cual se montaron anteriormente ya que no hubo la necesidad de modificarlas.

3.3.2 *Electrónica del túnel aerodinámico*

La electrónica es la parte más importante del túnel aerodinámico ya que es la encargada de procesar todas las señales provenientes de los diferentes componentes electrónicos y mostrarlos en la pantalla.

Las variables a ser medidas son la velocidad del viento, la resistencia al avance y la sustentación, ya que son imprescindibles en la aerodinámica del automóvil. (Curicama, y otros, 2013 pág. 53)

Para poder mostrar estas señales en tiempo real hubo la necesidad de diseñar, programar y construir un nuevo circuito electrónico que gestione las señales provenientes de la zona de pruebas. Así también implementar los componentes necesarios para cumplir dicho propósito.

3.3.2.1 *Diseño del circuito electrónico*

Para diseñar el circuito electrónico se requirió de los siguientes componentes electrónicos:

3.3.2.2 *Galgas extensiométricas*

Las galgas extensiométricas (celdas de carga) son sensores de peso o tensión cuya resistencia varía en función de la fuerza aplicada. Es decir que, al aplicarse una carga sobre esta, el cambio resultante en su longitud (deformación), se refleja en un cambio de su resistencia eléctrica, el cual

puede ser medido. Por tanto, se utiliza una celda de carga de 3 kg, sus características respectivas se detallan en la tabla 4-3 y su diagrama en la figura 16-3.

Tabla 4-1: Características técnicas de la celda de carga de 3kg

Descripción	Datos
Rango de carga:	3kg
Salida nominal:	$1,0 \pm 0.15\text{mV} / \text{V}$
Repetibilidad:	0,03% FS
Efecto de la temperatura en la salida:	$0,01\% \text{ F.S} / ^\circ \text{C}$
Efecto de la temperatura sobre cero:	$0.05\% \text{ F.S} / ^\circ \text{C}$
Cero:	$\pm 0.1000 \text{ mV} / \text{V}$
Impedancia de entrada:	$1115 -10\% \Omega$
Impedancia de salida:	$1000 - 10\% \Omega$
Resistencia de aislamiento:	$> = 1000 \text{ M}\Omega$
Tasa Sobrecarga segura:	150% FS
Tasa de sobrecarga final:	200% FS
Rango de temperatura:	$-20 - 60 ^\circ \text{C}$
Voltaje de funcionamiento:	3VDC ~ 14 VDC
Material:	Aleación de aluminio
Grado de protección:	IP65
Cable:	$\varnothing 0.8 \times 25 \text{ cm}$
Tamaño:	$4.5 \times 0.9 \times 0.6\text{cm}$
Cableado	
Rojo:	Alimentación
Negro:	Fuente –
Verde:	Señal
Blanco:	Señal –

Fuente: (AV Electronics , 2020)

Realizado por: Quinatoa C, 2020

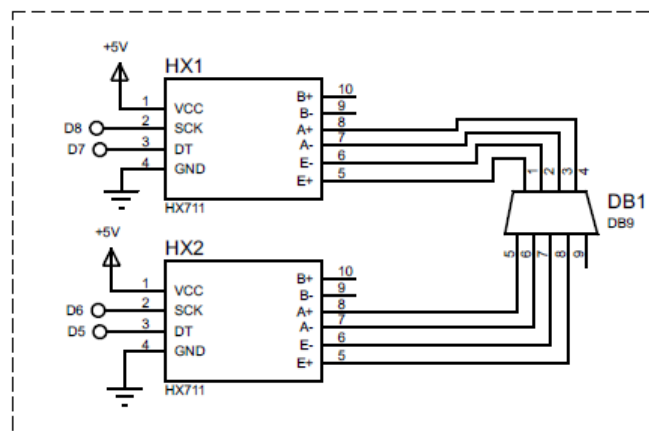


Figura 16-3: Diagrama de las celdas de carga

Fuente: Quinatoa C, 2020

3.3.2.3 Anemómetro

Como en la tesis anterior solo se utiliza el anemómetro Krestel 2400 para medir las condiciones meteorológicas especialmente para conocer la velocidad de ensayo durante el desarrollo de las pruebas en el túnel dado que esto se lo hacía manualmente ingresando el instrumento en la zona de pruebas. Las especificaciones técnicas del mismo se muestran en la tabla 5-3.

Tabla 5-3: Especificaciones técnicas del anemómetro

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

Fuente: (Curicama, y otros, 2013 pág. 54)

Realizado por: Quinatoa C, 2020

Con el fin de omitir este trabajo al operario en este nuevo estudio se busca mostrar la velocidad de ensayo en la pantalla. Para ello, se recurrió a un motor eléctrico de 9V con unas aspas en su extremo. Las cuales se modelaron en el software SolidWorks 2019 (figura 17-3) para luego manufacturarlas mediante una impresora 3D usando PLA.

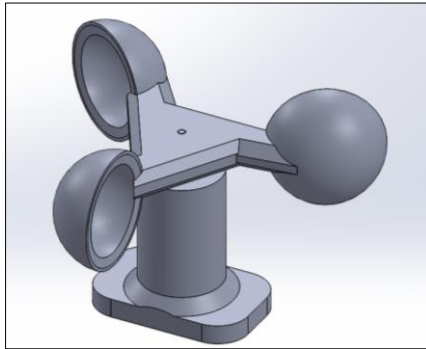


Figura 17-1: Aspas del anemómetro

Fuente: Quinatoa C, 2020

Las características técnicas del motor eléctrico se ilustran en la tabla 6-3.

Tabla 6-3: Características técnicas del motor eléctrico

Descripción	Datos
Tipo:	Brushles
AC/DC:	DC
Voltaje nominal:	9V
Torque:	0.006 Nm (0.0044 ft.lb)
Potencia:	8 W (0.011 hp)
Velocidad de rotación:	14,684 rpm, 14,884 rpm, 15,150 rpm, 15,816 rpm (92,262.29 rad.min-1)
Diámetro:	16 mm (0.63 in)

Fuente: (Shenzhen Vishan Technology Co.,Ltd., 2020)

Realizado por: Quinatoa C, 2020

Por tanto, a medida que las aspas giran se va generando en el motor una señal eléctrica en función del viento generado por el ventilador del túnel. Debido a que esta señal emitida es muy pequeña para poderla utilizar se requirió usar un amplificador operacional como puede observarse en la figura 18-3.

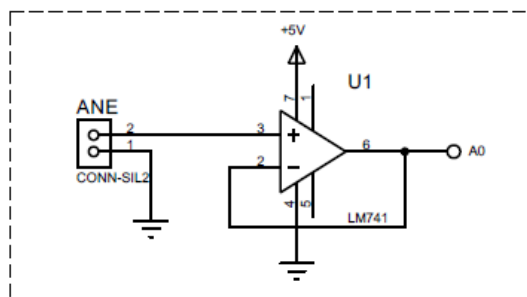


Figura 18-3: Diagrama del anemómetro

Fuente: Quinatoa C, 2020

3.3.2.4 Módulo micro SD

Debido a la gran cantidad de datos que debe tomar el circuito y así mismo tener la posibilidad de exportarlos a otro software. Se implementó un módulo micro SD para almacenar la información en conjunto con un Arduino Nano como se observa en la figura 19-3, ya que el módulo por sí solo no soportaba la velocidad de transmisión de los datos. Las especificaciones del mismo se indican en la tabla 7-3.

Tabla 7-3: Especificaciones técnicas del módulo micro SD

Descripción	Datos
Soporta:	Tarjetas micro SD y micro SDHCDC
Modelo:	MOD-MSDC
Voltaje de operación:	3.3V-5V
Interface:	SPI
Pines:	MOSI, MISO, SCK, CS
Uso:	Permite almacenar grandes cantidades de datos en memorias SD utilizando Arduino o PIC

Fuente: (Naylamp Mechatronics, 2020)

Realizado por: Quinatoa C, 2020

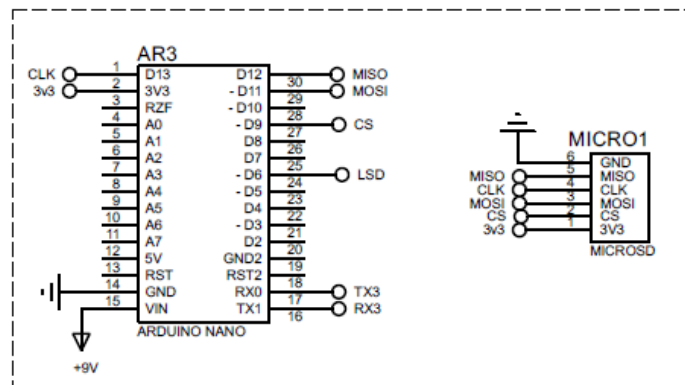


Figura 19-3: Diagrama del módulo micro SD

Fuente: Quinatoa C, 2020

3.3.2.5 Microcontrolador

Para el microcontrolador del circuito electrónico se emplea una placa de Arduino Mega 2560, las características técnicas del mismo se indican en la tabla.

Tabla 8-3: Especificaciones técnicas de la placa de Arduino Mega 2560

Descripción	Datos
Microcontrolador	ATmega2560
Tensión de funcionamiento	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (límite)	6-20V
Pines de E / S digitales	54 (de los cuales 15 proporcionan salida PWM)
Pines de entrada analógica	16
Corriente CC por pin de E / S	20 mA
Corriente DC para Pin de 3.3V	50 mA
Memoria flash	256 KB de los cuales 8 KB utilizados por el gestor de arranque
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidad de reloj	16 MHz
LED_BUILTIN	13
Longitud	101,52 mm
Anchura	53,3 mm
Peso	37 g

Fuente: (Arduino, 2020)

Realizado por: Quinatoa C, 2020

Dado que Arduino es una marca mundialmente conocida y se encuentra disponible en nuestro medio y la placa es lo suficiente robusto para soportar todo el procesamiento de datos de las pruebas aerodinámicas. EL diagrama de conexión del microcontrolador se ilustra en la figura 20-3.

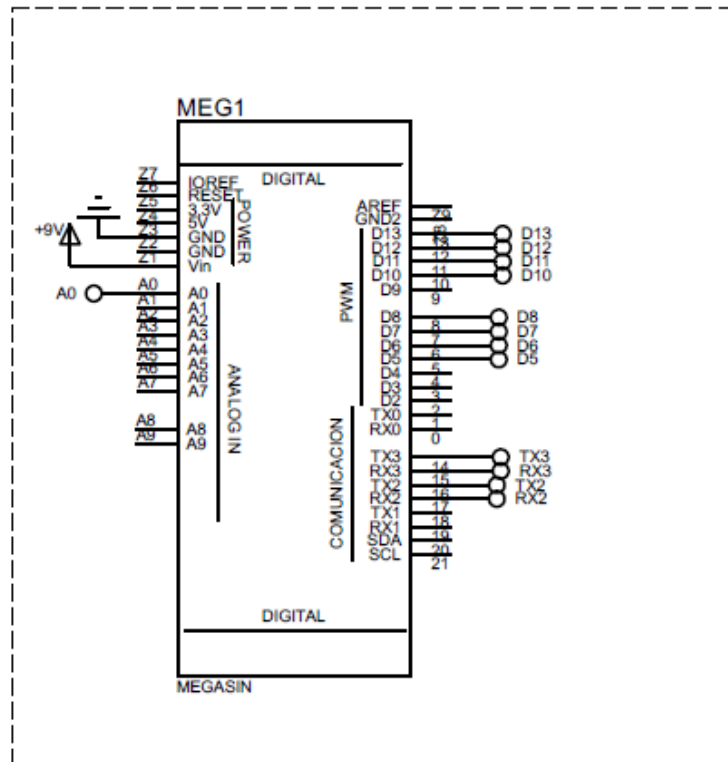


Figura 20-3: Diagrama del microcontrolador

Fuente: Quinatoa C, 2020

3.3.2.6 Pantalla Nextion 5''

Es una interface hombre-máquina (HMI) que integra un procesador y una pantalla táctil con el software Nextion Editor que facilita el desarrollo de proyectos mediante la cual se puede desarrollar rápidamente la interface gráfica de usuario. Además de ser compatible con las placas de Arduino. Por tanto, en la tabla 8-3 se detallan sus características técnicas.

Tabla 9-3: Especificaciones técnicas de la placa de Arduino Mega 2560

Descripción	Datos
Compatibilidad	Raspberry Pi A+, B+, Raspberry Pi 2 y Arduino
Resolución	800×480 pixel
Pantalla	TFT con interfaz TTL
Consumo de energía	5V y 410mA.
Área visual	108mm (L) × 64.80mm (A).
Memoria flash	16 MB
Peso	174 g
Corriente DC para Pin de 3.3V	50 mA
Interfaz	4 pines para cualquier host serie TTL

Tarjeta	Micro SD interna para actualización de firmware
Brillo ajustable	0 ~ 230 nit, el intervalo de ajuste es 1%

Fuente: (ITEAD STUDIO, 2011)

Realizado por: Quinatoa C, 2020

El respectivo diagrama de conexión se visualiza en la figura 21-3.

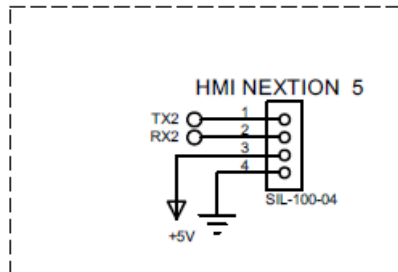


Figura 21-3: Diagrama pantalla Nextion 5''

Fuente: Quinatoa C, 2020

3.3.2.7 Fuente de alimentación

Dado que el circuito electrónico trabaja con 5V y 9V se integra al mismo un circuito convertidor de voltaje para usar la red eléctrica domiciliaria de 110V de corriente alterna. Para lo cual, se utiliza un amplificador operacional IC LM741, las características técnicas del mismo se detallan a continuación;

Tabla 10-3: Características técnicas del LM471

Características técnicas del LM741 Op-Amp IC
LM741 tiene solo un amplificador operacional en el interior.
Provisto de protección contra cortocircuitos y sobrecargas.
Bajo consumo de energía.
Gran relación de rechazo de modo común (CMRR) y rangos de voltaje diferencial.
No se requiere compensación de frecuencia externa.
Evite el enclavamiento cuando se excede el rango de modo común.
El consumo de energía mín., normal y máx. es $\pm 10v$, $\pm 15v$ y $\pm 22v$ respectivamente.
La temperatura de funcionamiento debe ser de -50 a 125 °C.
Corriente de suministro - 1.7 a 2.8mA.
Temperatura del pin de soldadura 260 °C (durante 10 s - prescrito)
TO-99 y CDIP - 300 °C (durante 10 s - prescrito)
Paquetes disponibles: TO-99, CDIP y PDIP.

Fuente: (Components101, 2020)

Realizado por: Quinatoa C, 2020

En la figura 22-3 se ilustra el diagrama de conexión respectivo del circuito conversor de voltaje

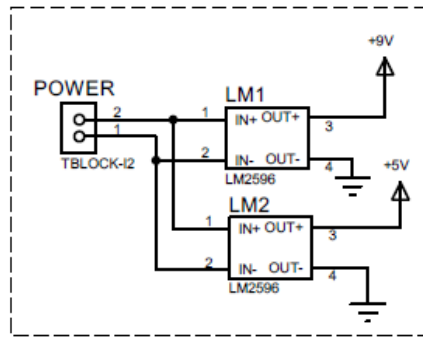


Figura 22-3: Datasheet de las fuentes

Fuente: Quinatoa C, 2020

3.3.2.8 Leds indicadores

Con el propósito de monitorear el circuito electrónico se instala 5 leds para verificar el correcto funcionamiento del mismo o si presenta alguna falla o avería.

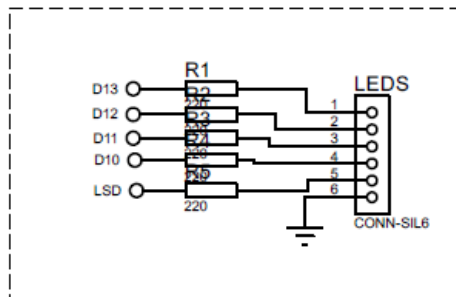


Figura 23-3: Diagrama de los leds indicadores

Fuente: Quinatoa C, 2020

Cada uno de los leds desempeña una función, la cual se indica en la tabla 4-3.

Tabla 11-3: Funciones de los leds

LEDS	FUNCIÓN
Verde	Circuito electrónico encendido
Rojo	Error (mal funcionamiento)
Amarillo	El circuito está funcionando correctamente
Azul	Opcional
Blanco	Indicador de la tarjeta SD

Fuente: Autor

Realizado por: Quinatoa C, 2020

3.3.3 *Diseño y construcción de la placa del circuito*

Para diseñar la placa de circuito impreso (PCB) se utiliza del software Proteus 8 Profesional para ordenar todos los componentes del circuito electrónico (figura 24-3) y graficar las respectivas pistas (figura 25-3).

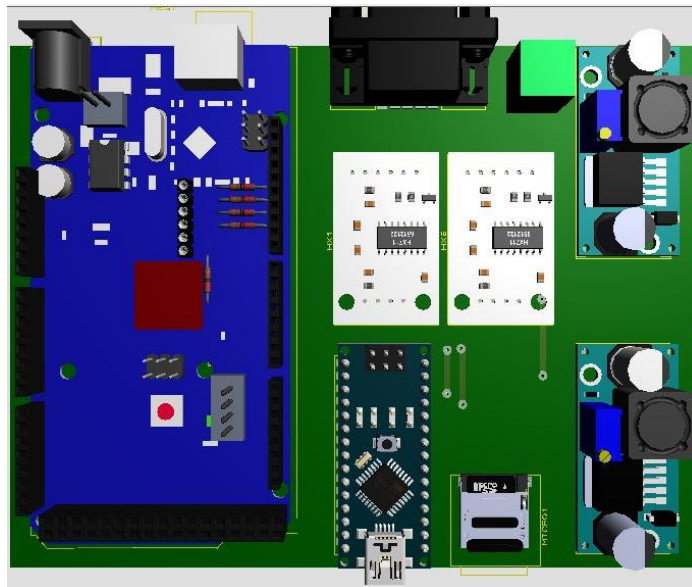


Figura 24-3: Diseño del circuito electrónico

Fuente: Quinatoa C, 2020

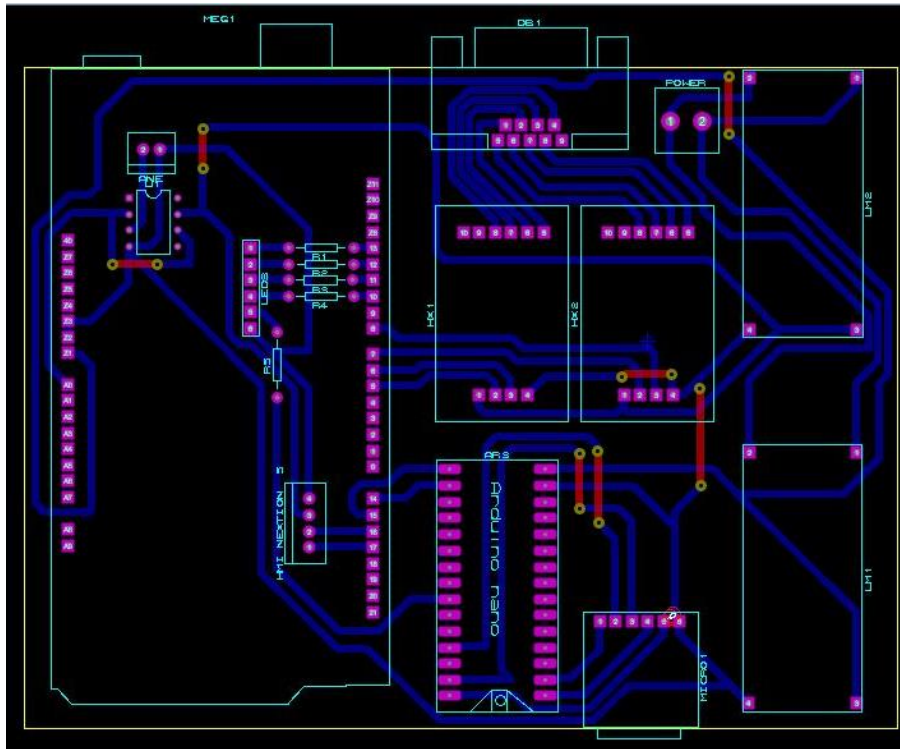


Figura 25-3: Diseño de las pistas del circuito electrónico

Fuente: Quinatoa C, 2020

A continuación, se imprime las pistas del circuito con una impresora láser como se observa en la figura 26-3.

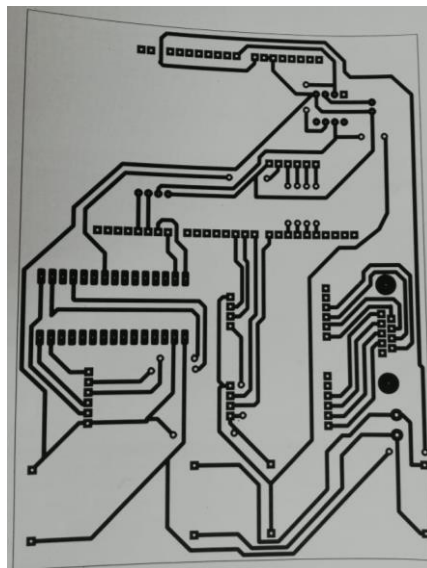


Figura 26-3: Impresión del circuito

Fuente: Quinatoa C, 2020

3.3.3.1 Construcción de la placa del circuito

Se empieza colocando el papel con el circuito impreso sobre una placa cobre.

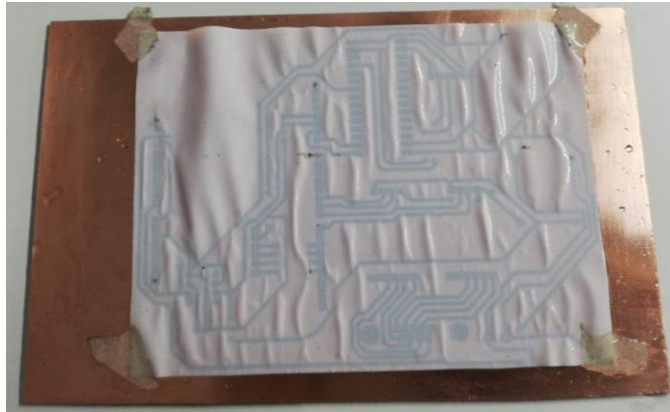


Figura 27-3: Circuito impreso sobre una placa de cobre

Fuente: Quinatoa C, 2020

Luego se remueve el papel de la placa de cobre aplicando thinner para que las pistas del circuito queden impregnadas en la misma, obsérvese la figura 28-3.

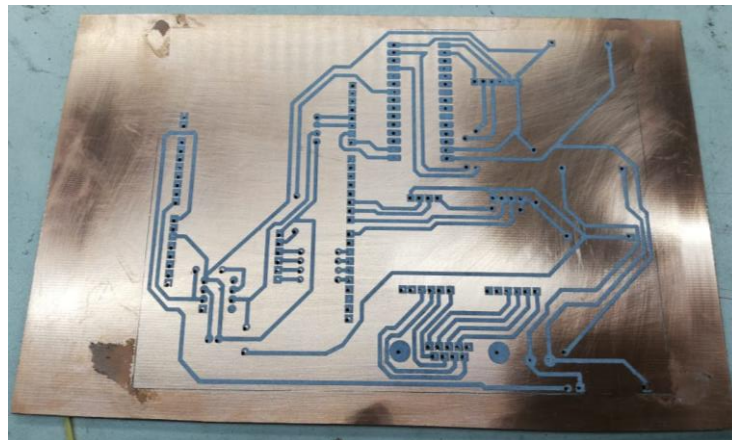


Figura 28-3: Circuito impregnado en la placa de cobre

Fuente: Quinatoa C, 2020

A continuación, se separa las pistas impregnadas de la placa de cobre y se colocan sobre una placa de baquelita. Para luego sumergirlo todo el conjunto en una solución de ácido sulfúrico por un tiempo como se ve en la figura 29-3.



Figura 29-3: Inmersión del circuito

Fuente: Quinatoa C, 2020

Después, se extrae la baquelita de la solución para que se destile véase la figura 30-3.

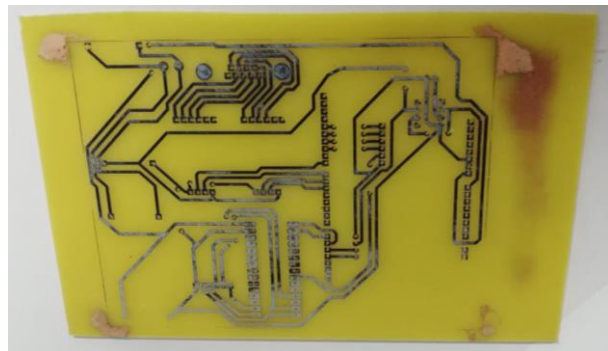


Figura 30-3: Secado de la baquelita

Fuente: Quinatoa C, 2020

Posteriormente se remueve el adhesivo que contenía las pistas del circuito de la baquelita como se observa en las figuras 31-3 y 32-3, y queda lista para montar los componentes.

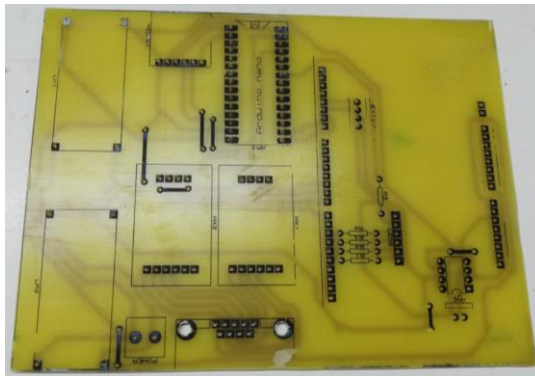


Figura 31-3: Vista frontal del circuito

Fuente: Quinatoa C, 2020

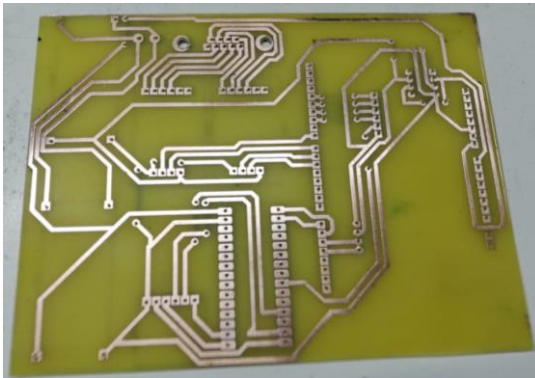


Figura 32-3: Vista frontal del circuito

Fuente: Quinatoa C, 2020

Por último, se hace los respectivos agujeros sobre las pistas de la baquelita para montar y soldar los pines de todos los componentes electrónicos del circuito. El ensamblaje final del mismo se puede observar en la figura 33-3.

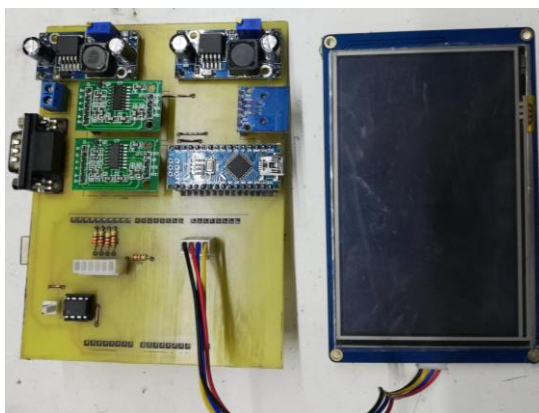


Figura 33-3: Circuito electrónico ensamblado

Fuente: Quinatoa C, 2020

También se diseña la respectiva cubierta del circuito a través del software SolidWorks 2019 (figura 34-3) para seguridad y protección del mismo. Para construirla se usa una cortadora laser utilizando MDF de 3 mm y se realiza el ensamblaje, el cual se ilustra en la figura 35-3.

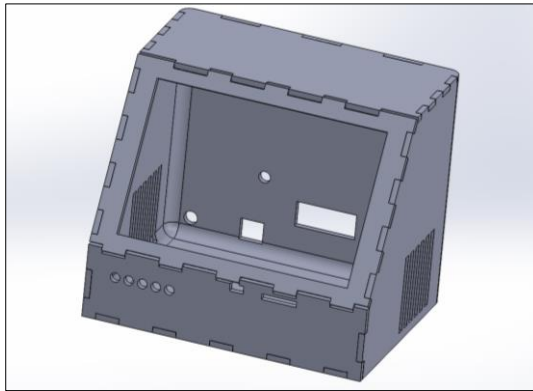


Figura 34-3: Cubierta del circuito electrónico

Fuente: Quinatoa C, 2020

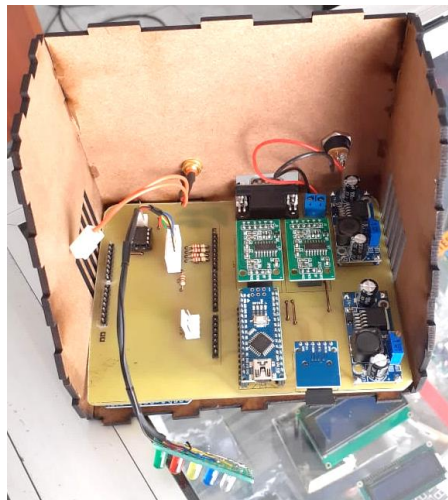


Figura 35-3: Ensamblaje del circuito

Fuente: Quinatoa C, 2020

En la figura 36-3 se puede observar todo el circuito electrónico montado.



Figura 36-3: Circuito electrónico armado

Fuente: Quinatoa C, 2020

3.3.4 Programación del circuito electrónico

La programación del circuito se realiza con el software Arduino que luego se quema en la placa de Arduino Mega. Para mayor detalle de la programación véase el ANEXO B.

3.3.5 Interface del circuito electrónico

La interface de usuario del circuito se desarrolla con el software Nextion Editor, lo cual se puede visualizar en las figuras 37-3 y 38-3.



Figura 37-3: Interface de bienvenida

Fuente: Quinatoa C, 2020



Figura 38-3: Interface de registro de datos

Fuente: Quinatoa C, 2020

3.3.6 *Instalación del circuito electrónico*

Se empieza desmontando la zona de pruebas del túnel para instalar la nueva galga extensiométrica, obsérvese la figura 40-3.



Figura 39-3: Desmontaje de la zona de pruebas

Fuente: Quinatoa C, 2020

Ya que para mejorar la precisión de los datos tomados para graficar la fuerza de sustentación y arrastre en comparación al trabajo anterior. Se reemplaza la galga extensiométrica de 5 kg (figura 39-3), las cuales no son las adecuadas por galgas de 3 kg (figura41-3).

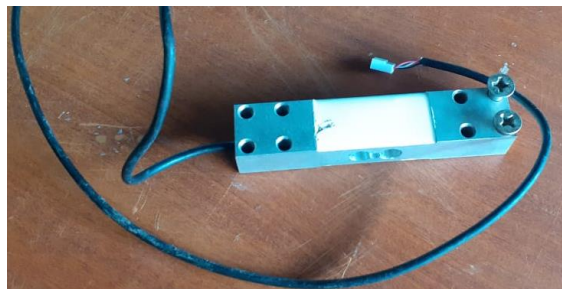


Figura 40-3: Galga extensiométrica de 5 kg

Fuente: Quinatoa C, 2020



Figura 41-3: Galga extensiométrica de 3 kg

Fuente: Quinatoa C, 2020

A continuación, se instala el anemómetro como se indica en la figura 42-3.



Figura 42-3: Montaje del anemómetro

Fuente: Quinatoa C, 2020

Luego se realiza la conexión del anemómetro y las galgas al circuito eléctrico como se visualiza en la figura 43-3.

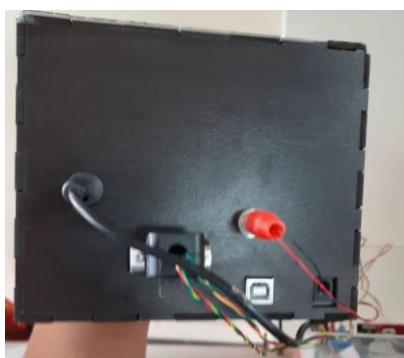


Figura 43-3: Conexión del circuito

Fuente: Quinatoa C, 2020

Después se pasa a encender el circuito para comprobar su funcionamiento véase la figura 44-3.



Figura 44-3: Comprobación del circuito

Fuente: Quinatoa C, 2020

Posteriormente se enciende el túnel de viento con el fin de calibrar el circuito para que la toma de mediciones de las galgas y el motor eléctrico sean confiables mediante un anemómetro digital como se visualiza en la figura 45-3.



Figura 45-3: Calibración del circuito

Fuente: Quinatoa C, 2020

Por último, en la figura 46-3 se observa que la interface de registro de datos del circuito electrónico está graficando los datos provenientes de la zona de pruebas. En el cual, la gráfica de color rojo representa a la fuerza de arrastre y la de color azul a la fuerza de sustentación.

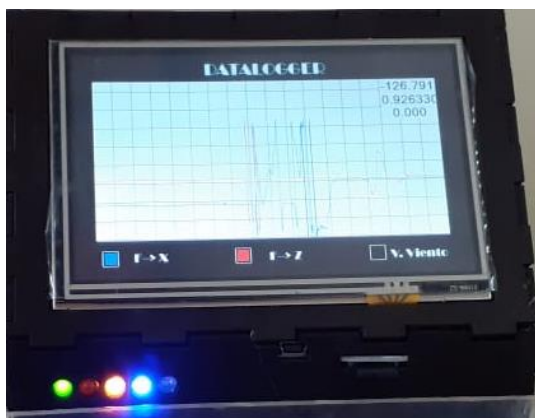


Figura 46-3: Visualización de las gráficas

Fuente: Quinatoa C, 2020

3.4 Manual de uso

En esta sección se detalla el proceso para una correcta operación del túnel de viento. Así también el mantenimiento preventivo del banco aerodinámico para que se mantenga en perfectas condiciones.

3.4.1 Operación del túnel

Para operar correctamente el túnel de viento y realizar las pruebas aerodinámicas se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Se debe realizar el montaje del modelo de pruebas en la zona de pruebas del túnel de viento.
2. La máquina de humo debe ser la primera en encenderse ya que tiene un calentamiento de 5 minutos. Pero antes de ser conectada hay que fijarse que el depósito de líquido de humo haya suficiente para que la máquina trabaje.
3. Una vez conectado el circuito electrónico a la corriente eléctrica este se enciende y queda preparado para tomar los datos.
4. Cuando la máquina de humo esté lista se debe encender el variador de frecuencia por consiguiente el túnel de viento está listo para realizar las pruebas. Si el usuario desea conocer la función de cada del variador revísese el trabajo anterior.

5. Luego solo se configura el variador de frecuencia para obtener la velocidad de ensayo requerida y los resultados en tiempo real se ira mostrando en la pantalla del circuito. Si lo requiere luego de las pruebas puede exportar los datos mediante la tarjeta micro SD.

3.4.2 *Manual de mantenimiento*

Se debe realizar el mantenimiento preventivo del túnel de viento cada 10 horas de trabajo. Ya que tiene un sistema trabajo sencillo su mantenimiento no tiene complejidad.

Las actividades a realizar son las siguientes:

- Reajuste de componentes, los cuales se puede aflojar por la vibración de generada de sus componentes.
- Revisar y/o llenar el líquido de la máquina de humo para que este se encuentre en el nivel requerido. Si se va a realizar un cambio del mismo se debe limpiar el depósito.
- Limpieza del polvo y demás impurezas que puedan depositarse en el túnel de viento.
- Revisión de las conexiones eléctricas del túnel y del circuito electrónico.

3.5 *Diseño y simulación*

Para diseñar y simular el modelo de pruebas en el que se realiza el estudio aerodinámico se utiliza el software SolidWorks 2019.

3.5.1 *Diseño del modelo de pruebas*

Se selecciona como modelo de pruebas, la maqueta de un vehículo BMW M5 2012 a una escala 1:18. Para poderlo modelarlo en el software SolidWorks 2019, se usa planos 2D del vehículo (Anexo A). El cual se realiza generalmente utilizando la herramienta de superficies del software. El diseño completo del modelo de prueba se visualiza en la figura 47-3.

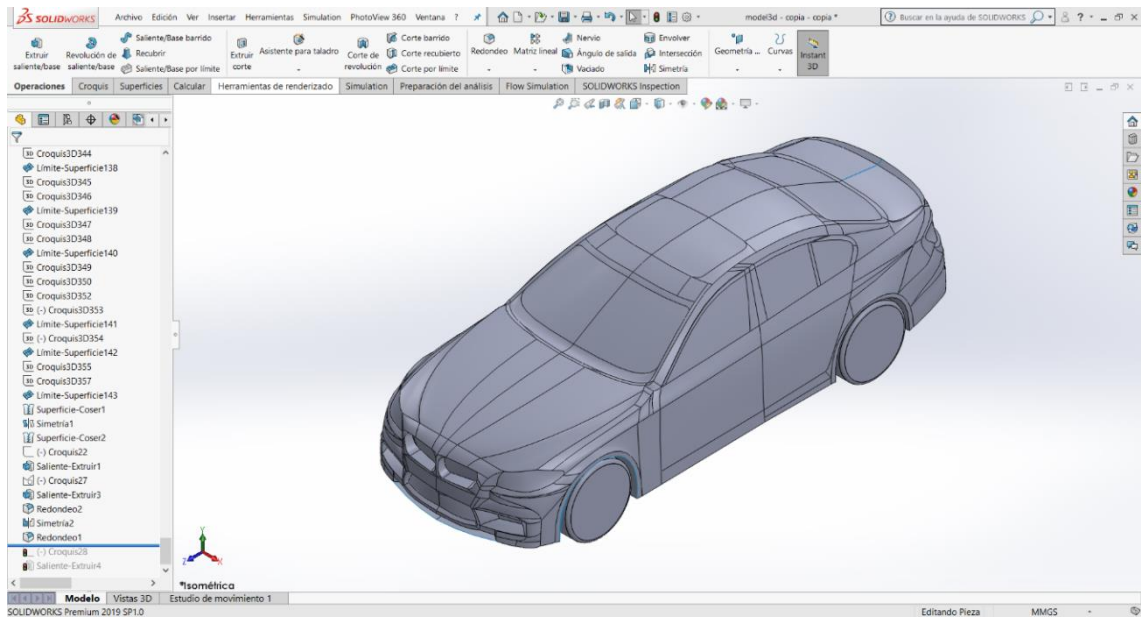


Figura 47-3: Modelo 3D del BMW M5

Fuente: Quinatoa C, 2020

3.5.2 Simulación aerodinámica

Para realizar el estudio aerodinámico del modelo de pruebas se utiliza el módulo SolidWorks Flow Simulation. Por tanto, se empieza creando un nuevo proyecto dando clic en Wizard como se ilustran en la figura 48-3.

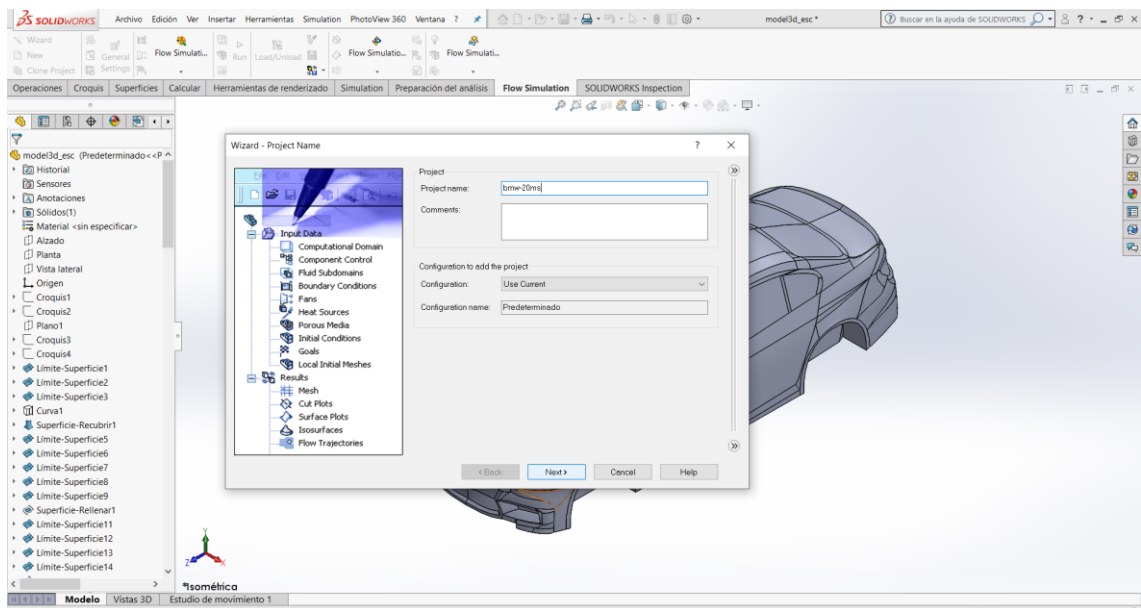


Figura 48-3: Creación del proyecto

Fuente: Quinatoa C, 2020

Luego se configura las unidades en el SI véase la figura 49-3.

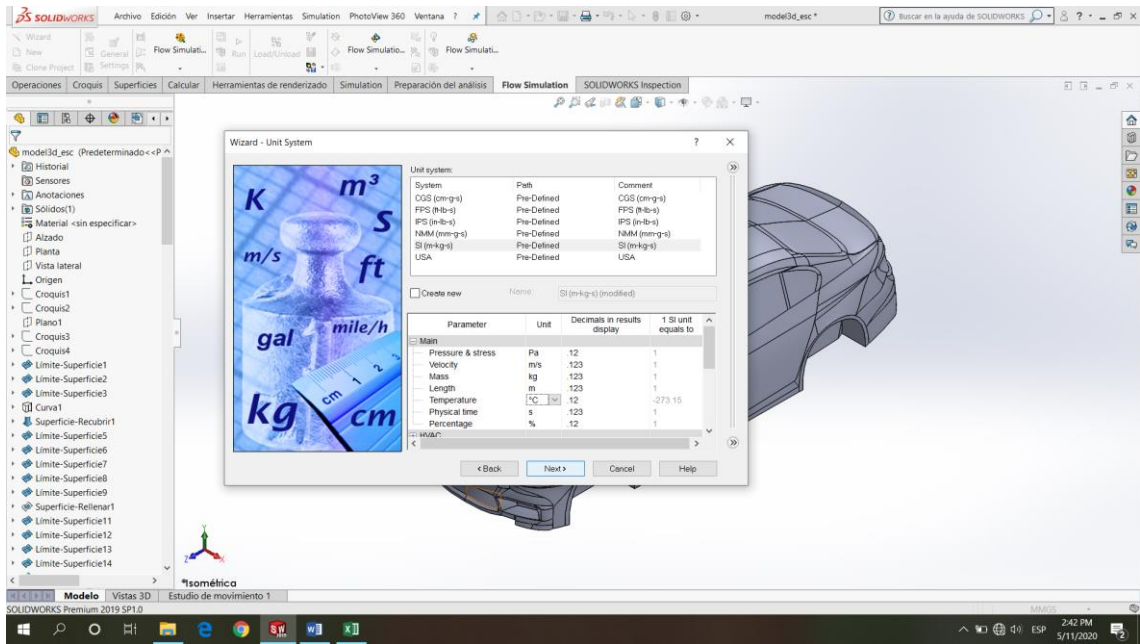


Figura 49-3: Configuración de unidades

Fuente: Quinatoa C, 2020

Dado que se requiere analizar la superficie externa del vehículo seleccionamos que va hacer un análisis tipo external. Además, indicamos la dirección de la gravedad y el tiempo de simulación como se indica en la figura 50-3.

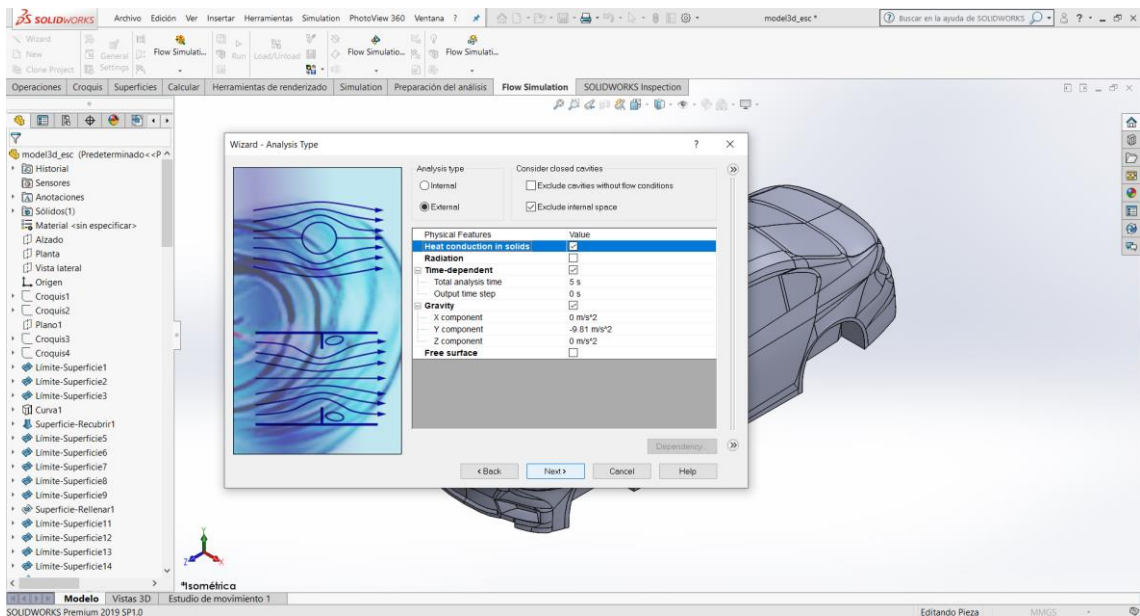


Figura 50-3: Configuración de la superficie, tiempo de simulación y gravedad

Fuente: Quinatoa C, 2020

Luego se añade el fluido a simular en este caso es el aire como se observa la figura 51-3.

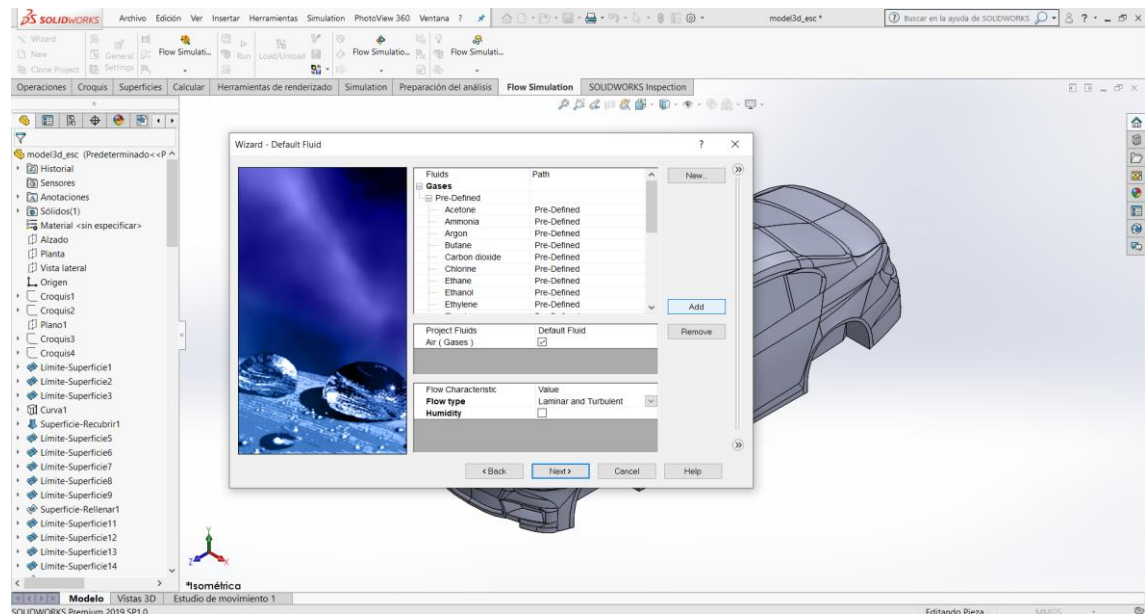


Figura 51-3: Selección del fluido de la simulación

Fuente: Quinatoa C, 2020

Después se ingresa el valor de la presión atmosférica local y velocidad como se indica en la figura 52-3.

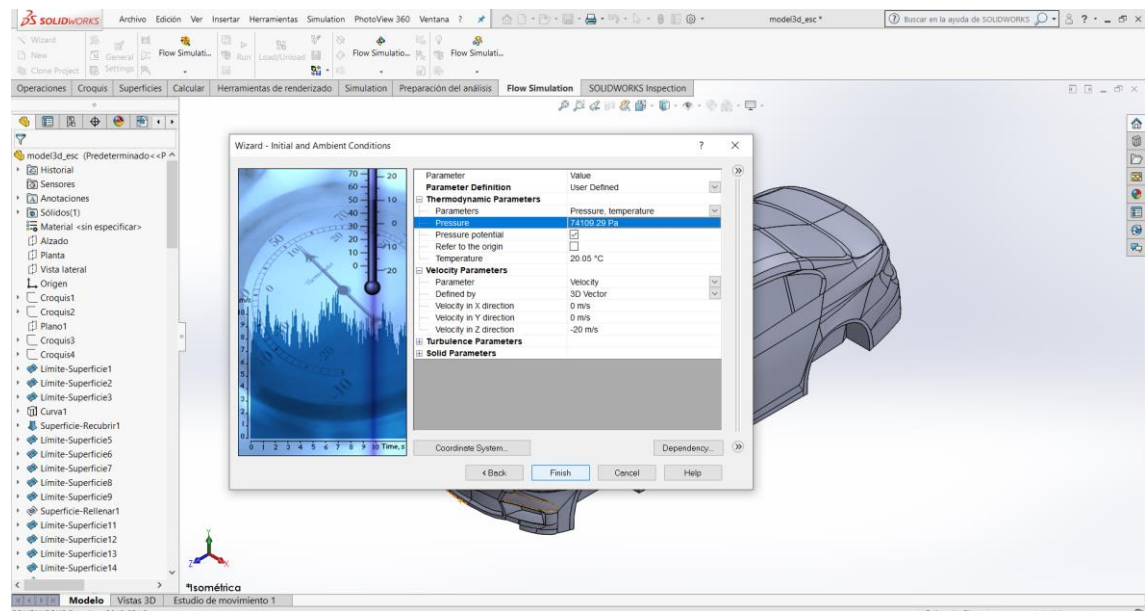


Figura 52-3: Ingreso de la presión atmosférica local y velocidad del ensayo.

Fuente: Quinatoa C, 2020

A continuación, se define los valores del dominio del fluido a simular es decir las dimensiones de la zona de pruebas del túnel, las cuales son: 0.55 m (ancho), 0.4 m (altura) y 0.75 m (largo) como se ve en la figura 53-3.

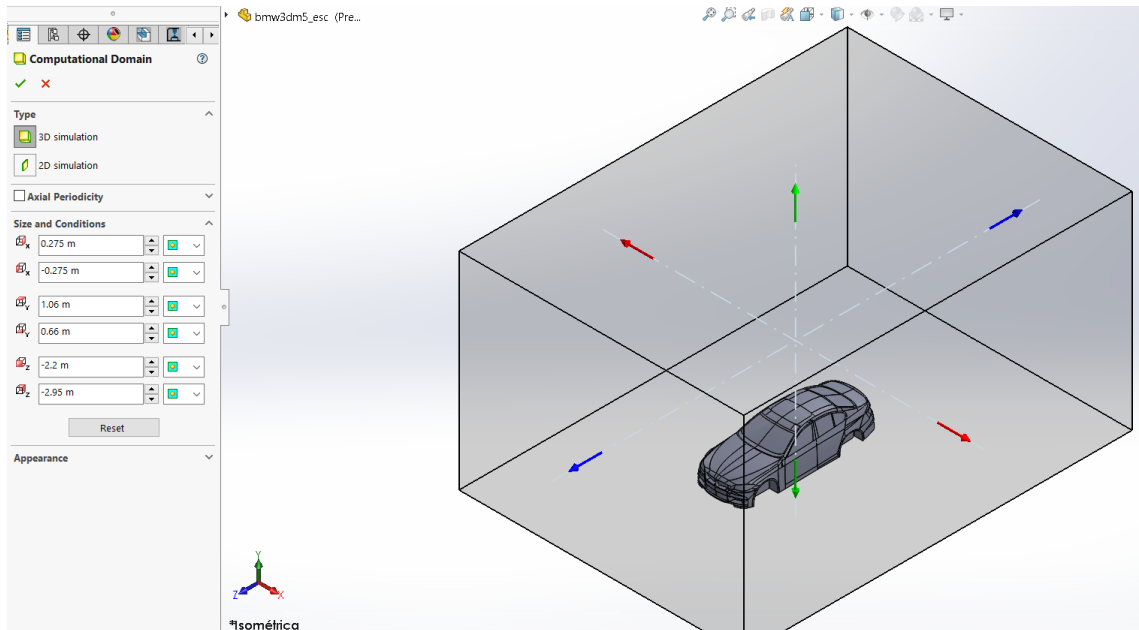


Figura 53-3: Configuración del dominio del fluido

Fuente: Quinatoa C, 2020

Luego se selecciona los parámetros que queremos analizar para ello se ingresa a goals como se indica en la figura 54-3.

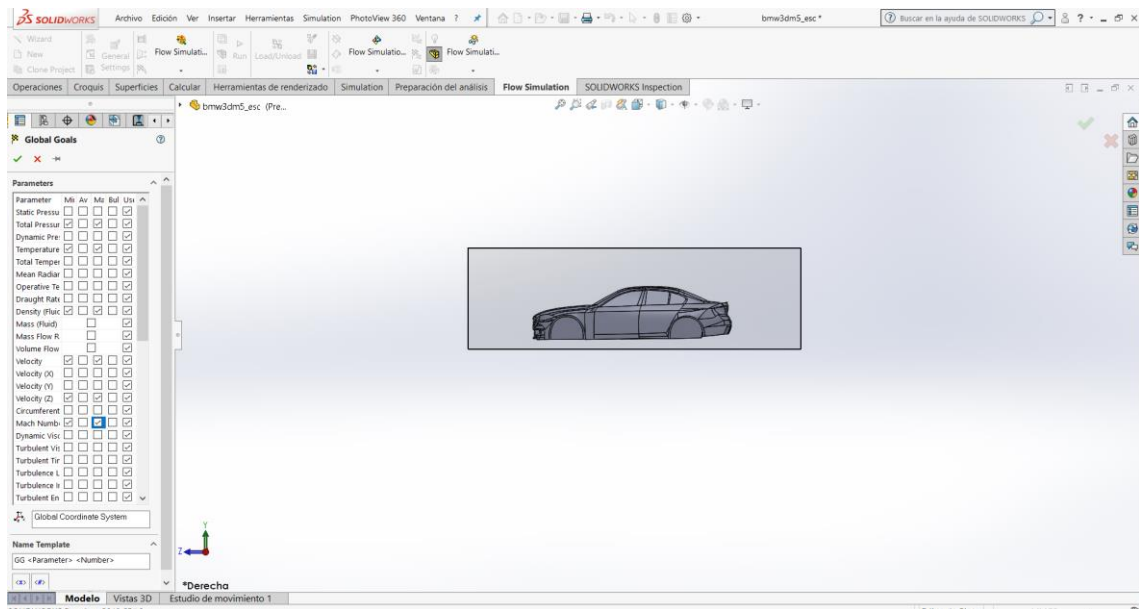


Figura 54-3: Selección de parámetros de análisis

Fuente: Quinatoa C, 2020

Posteriormente se define un mallado apropiado para obtener resultados confiables véase la figura 55-3.

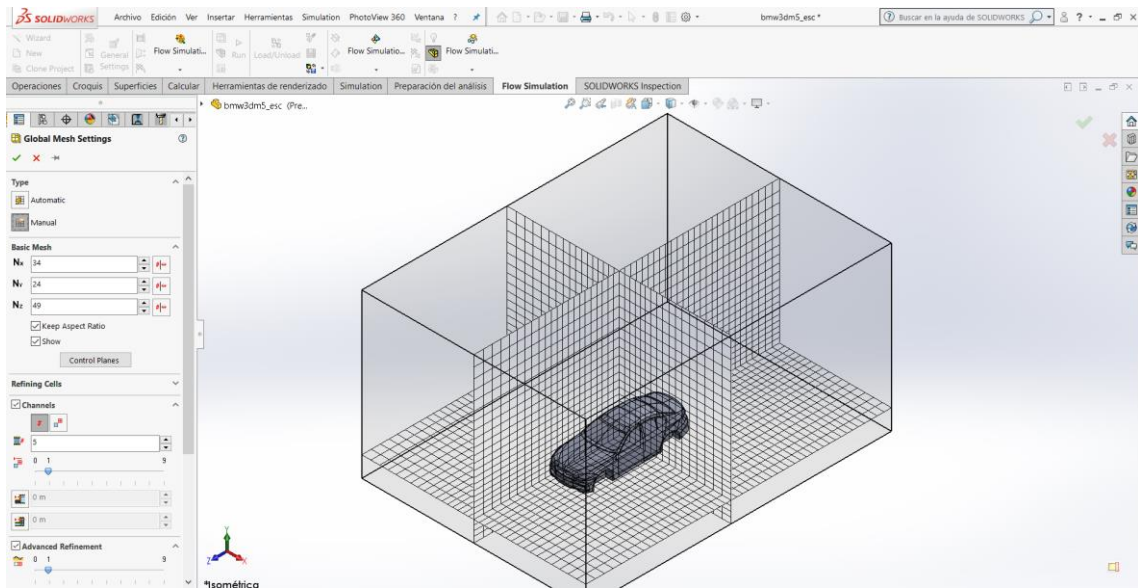


Figura 55-3: Configuración del mallado

Fuente: Quinatoa C, 2020

Luego se configura los controles de cálculo para obtener una mejor visualización de los resultados como se visualiza en la figura 56-3.

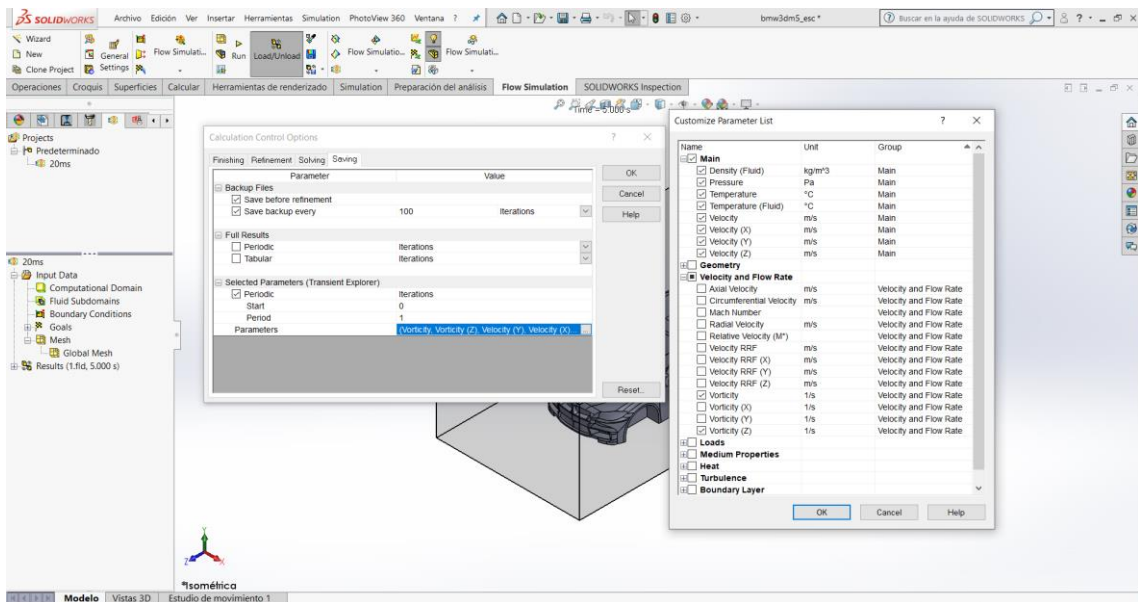


Figura 56-3: Configuración de los parámetros de calculo

Fuente: Quinatoa C, 2020

Ahora se manda a correr la simulación dando clic en run y se espera a que termine la misma.

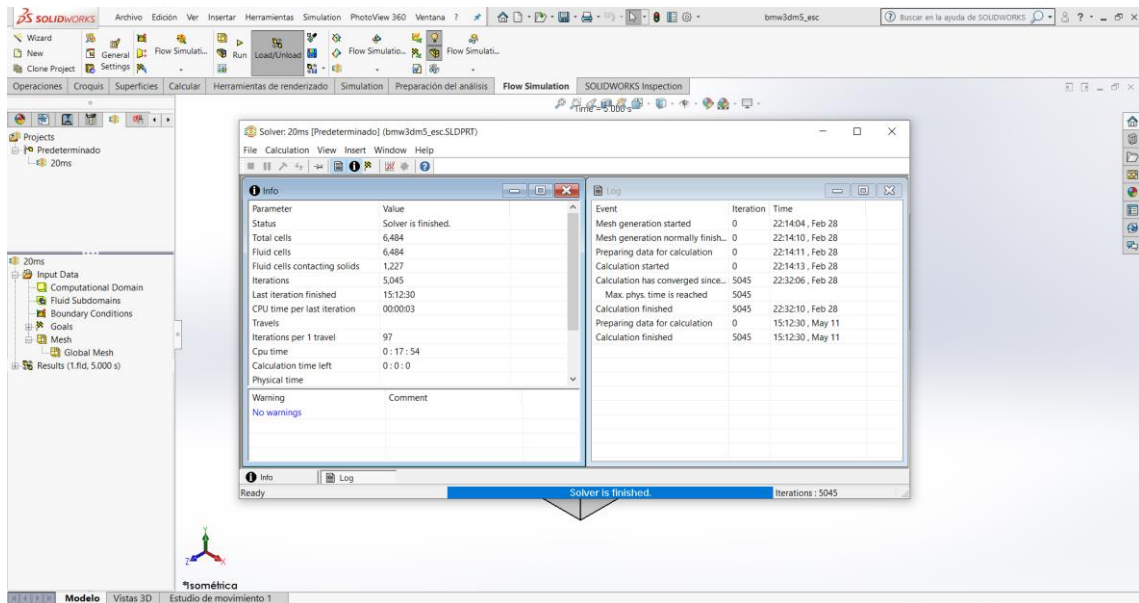


Figura 57-3: Corriendo la simulación

Fuente: Quinatoa C, 2020

Por último, se analiza los resultados que arrojan el software, los cuales se muestran a continuación para simulación de 20 m/s:

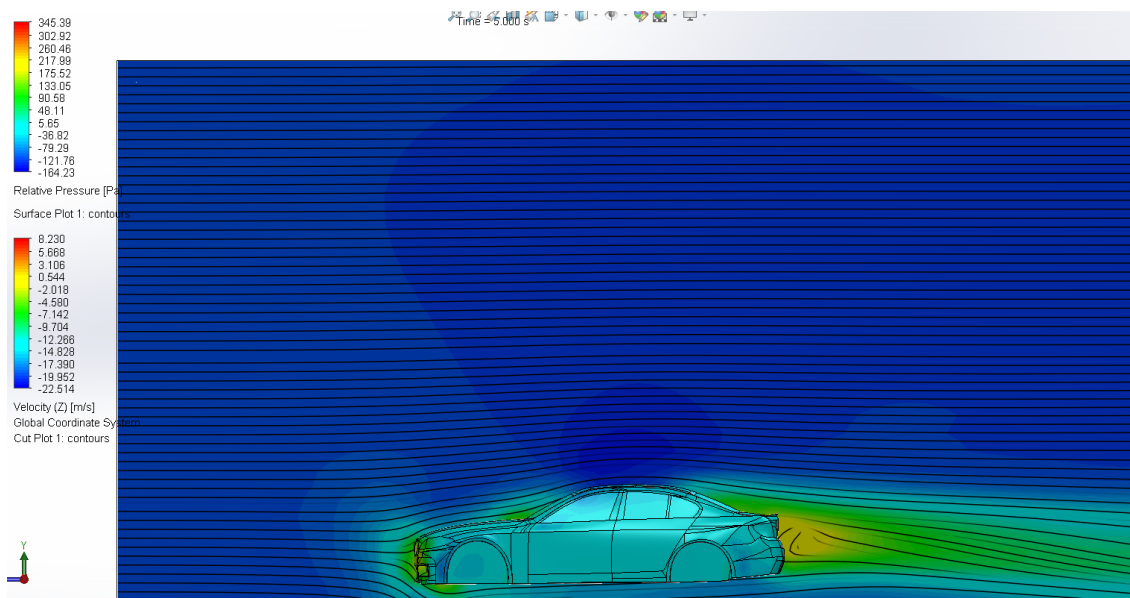


Figura 58-3: Resultados de la presión relativa y velocidad en el plano

Fuente: Quinatoa C, 2020

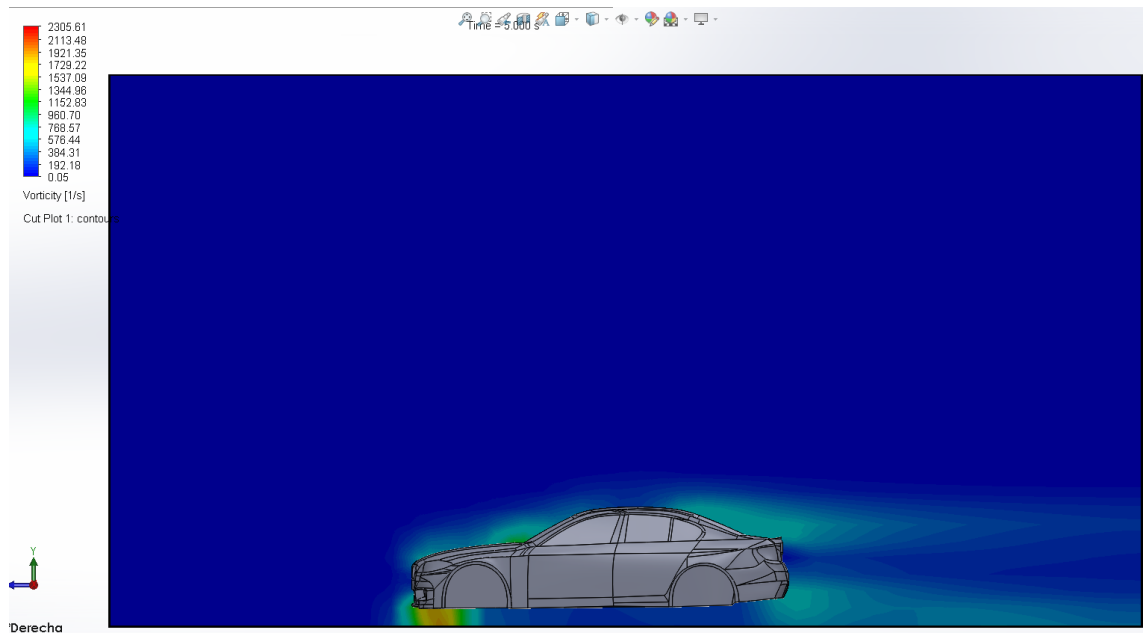


Figura 59-3: Resultados de la vorticidad en el plano

Fuente: Quinatoa C, 2020

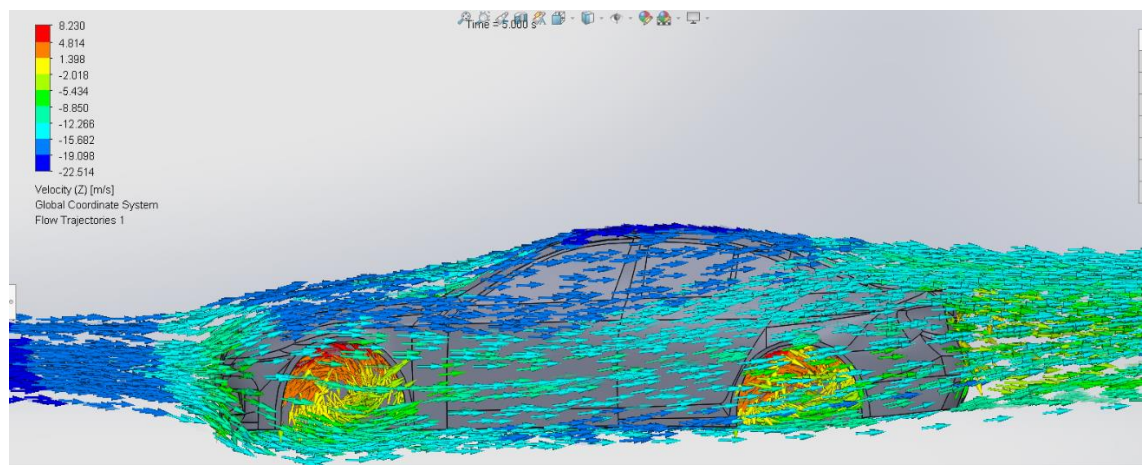


Figura 60-3: Resultados de la velocidad por medio de trayectorias dinámicas

Fuente: Quinatoa C, 2020

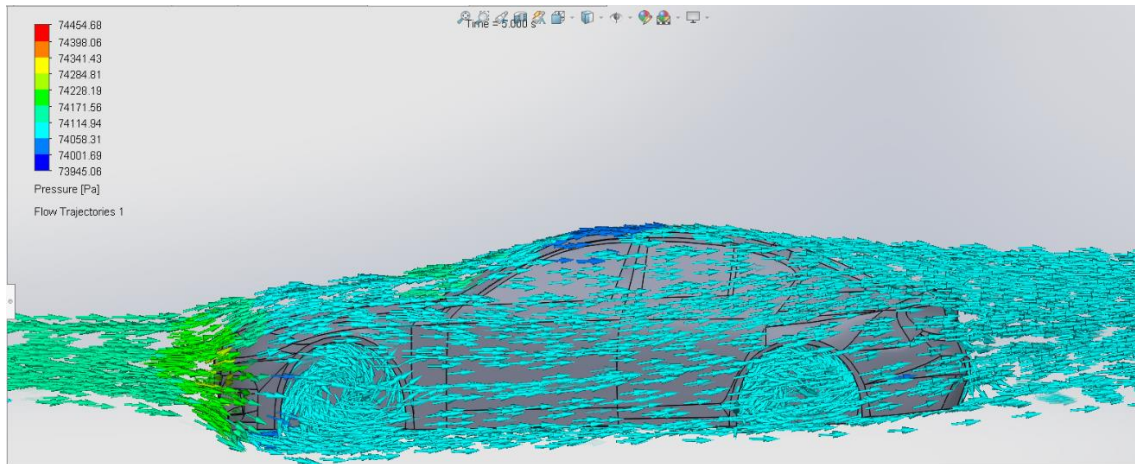


Figura 61-3: Resultados de la presión por medio de trayectorias dinámicas

Fuente: Quinatoa C, 2020

Como se observa en la figura 58-3 el fluido presenta un comportamiento laminar al pasar sobre la carrocería del vehículo. Por lo que este auto tiene un buen diseño aerodinámico. De acuerdo con la simulación la parte trasera del mismo es la zona más propensa a generarse turbulencia.

Todo el proceso descrito anteriormente se repite en las tres simulaciones variando la velocidad de ensayo.

3.5.2.1 Resultados obtenidos de las simulaciones

El modelo de prueba se evalúa con tres velocidades diferentes. Los resultados obtenidos con el software se detallan en las tablas 12-3, 13-3 y 14-3:

Tabla 12-3: Resultados de la simulación a 20 m/s

Goal Name	Unit	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value
GG Minimum Total Pressure 1	[Pa]	73944.32815	73939.03403	73950.92201
GG Maximum Total Pressure 1	[Pa]	74503.19974	74502.76932	74503.89207
GG Minimum Temperature (Fluid) 1	[°C]	19.99286234	19.99161718	19.99378695
GG Maximum Temperature (Fluid) 1	[°C]	20.24939663	20.24889109	20.24991335
GG Minimum Density (Fluid) 1	[kg/m ³]	0.877924889	0.87783012	0.878038994
GG Maximum Density (Fluid) 1	[kg/m ³]	0.883969174	0.883963754	0.883977814
GG Minimum Velocity 1	[m/s]	0	0	0
GG Maximum Velocity 1	[m/s]	22.69462838	22.65358406	22.74982689
GG Minimum Velocity (Z) 1	[m/s]	-22.66333735	-22.71850831	-22.62141826
GG Maximum Velocity (Z) 1	[m/s]	8.703200379	8.53800966	8.931328902
GG Minimum Mach Number 1	[]	0	0	0
GG Maximum Mach Number 1	[]	0.066138996	0.066019277	0.066300001
GG Force (Y) 1	[N]	0.378516021	0.37354017	0.390182848
GG Force (Z) 1	[N]	-0.53738469	-0.538432491	-0.535956834
GG Minimum Shear Stress 1	[Pa]	0	0	0
GG Maximum Shear Stress 1	[Pa]	2.768726215	2.754218464	3.235534057

Realizado por: Quinatoa C, 2020

Tabla 13-3: Resultados de la simulación a 30 m/s

Goal Name	Unit	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value
GG Minimum Total Pressure 1	[Pa]	73743.78999	73732.91406	73754.53534
GG Maximum Total Pressure 1	[Pa]	75008.58909	75007.72416	75009.22812
GG Minimum Temperature (Fluid) 1	[°C]	19.9194733	19.91676969	19.92129974
GG Maximum Temperature (Fluid) 1	[°C]	20.49983682	20.49905503	20.50056747
GG Minimum Density (Fluid) 1	[kg/m ³]	0.874923637	0.874705396	0.875145302
GG Maximum Density (Fluid) 1	[kg/m ³]	0.888556207	0.888545488	0.888563912
GG Minimum Velocity 1	[m/s]	0	0	0
GG Maximum Velocity 1	[m/s]	34.09986431	34.04591268	34.17961936
GG Minimum Velocity (Z) 1	[m/s]	-34.05355642	-34.13447009	-33.99921091
GG Maximum Velocity (Z) 1	[m/s]	13.21894611	13.00855263	13.46037071
GG Minimum Mach Number 1	[]	0	0	0
GG Maximum Mach Number 1	[]	0.099389677	0.099232118	0.099622593
GG Force (Y) 1	[N]	0.86626443	0.856403	0.889236849
GG Force (Z) 1	[N]	-1.205302276	-1.207439783	-1.20275879
GG Minimum Shear Stress 1	[Pa]	0	0	0
GG Maximum Shear Stress 1	[Pa]	5.084975242	5.071983528	5.101632987

Realizado por: Quinatoa C, 2020

Tabla 14-3: Resultados obtenidos de la simulación a 40 m/s

Goal Name	Unit	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value
GG Minimum Total Pressure 1	[Pa]	73455.25857	73064.95704	73476.3013
GG Maximum Total Pressure 1	[Pa]	75718.12911	75717.31729	75719.69086
GG Minimum Temperature (Fluid) 1	[°C]	19.81417362	19.81027022	19.81753762
GG Maximum Temperature (Fluid) 1	[°C]	20.84604597	20.84249481	20.8511456
GG Minimum Density (Fluid) 1	[kg/m ³]	0.870629747	0.866187298	0.871017195
GG Maximum Density (Fluid) 1	[kg/m ³]	0.894981108	0.894971207	0.894999285
GG Minimum Velocity 1	[m/s]	0	0	0
GG Maximum Velocity 1	[m/s]	45.54994184	45.47555295	45.63616053
GG Minimum Velocity (Z) 1	[m/s]	-45.4854798	-45.57186858	-45.41064378
GG Maximum Velocity (Z) 1	[m/s]	17.73420836	17.47816788	18.07705922
GG Minimum Mach Number 1	[]	0	0	0
GG Maximum Mach Number 1	[]	0.132786557	0.132568942	0.133038782
GG Force (Y) 1	[N]	1.598862344	1.572915971	1.630936373
GG Force (Z) 1	[N]	-2.16050756	-2.169205982	-2.142351584
GG Minimum Shear Stress 1	[Pa]	0	0	0
GG Maximum Shear Stress 1	[Pa]	7.839620759	7.816033977	7.863564478

Realizado por: Quinatoa C, 2020

Como se puede visualizar en las tablas los datos sombreados son los más importantes. Donde F_y y F_z representan a la fuerza de sustentación y avance respectivamente. Así en la simulación de 20 m/s se obtuvo que $F_y=0.38$ N y $F_z=0.54$ N, mientras que a 40 m/s se obtuvieron que $F_y=1.6$ N y $F_z=2.16$. Por tanto, se puede decir que estas fuerzas aerodinámicas incrementan su incidencia sobre el vehículo a medida que aumenta la velocidad del viento.

3.6 Análisis comparativo entre los resultados del equipo implementado con la simulación.

Una vez obtenido valores en la simulación como también mediante la ecuación $L = \frac{1}{2}\rho V^2 C_l S$, a una velocidad de viento ya estipulada para el análisis como es de 20, 30 y 40 m/s.

Materializamos la gráfica como se puede observar.

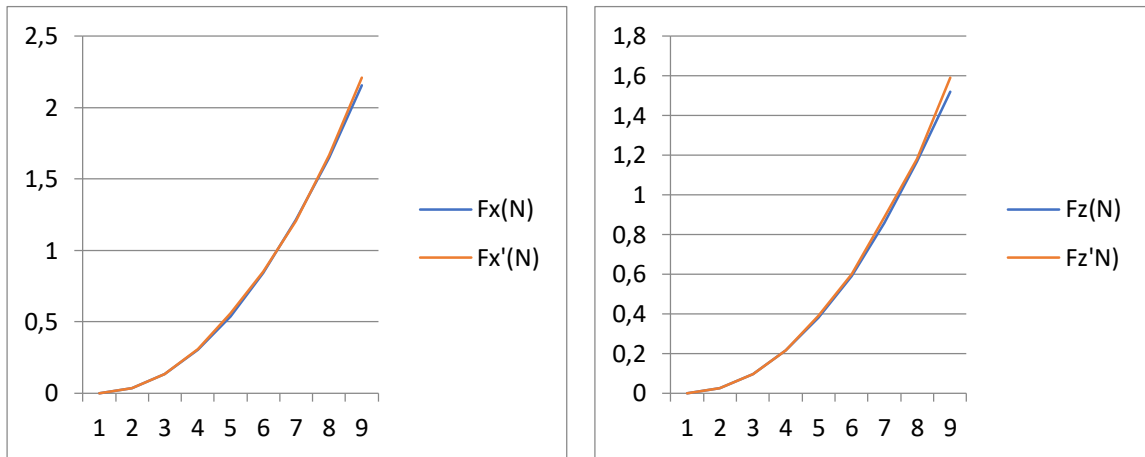


Gráfico 2-3: Fx y Fz valores calculados, Fx' y Fz' datos obtenidos por la simulación.

Fuente: Quinatoa C, 2020

Como se ha podido observar, las gráficas obtenidas tienen similitud pero mediante el análisis que se realizó existe un margen de error de 0,09. Es decir se encuentra entre los límites propuestos donde es menor a 1.

Por lo tanto, la repotenciación y optimización que se ha echo en el túnel de viento se encuentra apto para su utilización.

4 GESTIÓN DEL PROYECTO

4.1 Planificación

A continuación, en la tabla 15-4 se detalla la planificación de las actividades necesarias para desarrollar el presente estudio.

Tabla 15-4: Planificación de actividades

<i>ACTIVIDADES</i>	<i>TIEMPO ESTIMADO (EN SEMANAS)</i>	<i>OBSERVACIONES</i>
Revisión bibliográfica de los principios de funcionamiento del túnel de viento.	2	
Evaluación e implementación de la instrumentación necesaria para repotenciar el banco de pruebas.	3	
Programación de la tarjeta de adquisición de datos y interface del usuario mediante el software Arduino y Nextion Editor.	3	
Diseño y análisis aerodinámico de un vehículo a escala por medio del software SolidWorks.	3	
Realización de pruebas aerodinámicas con vehículos a escala en el túnel de viento.	1	
Análisis de los datos e informe de resultados obtenidos	1	
Redacción y revisión del presente estudio.	5	

Realizado por: Quinatoa C, 2020

4.2 Cronograma de actividades

El cronograma de actividades llevado a cabo para elaborar el presente estudio se describe en la figura 61-4.

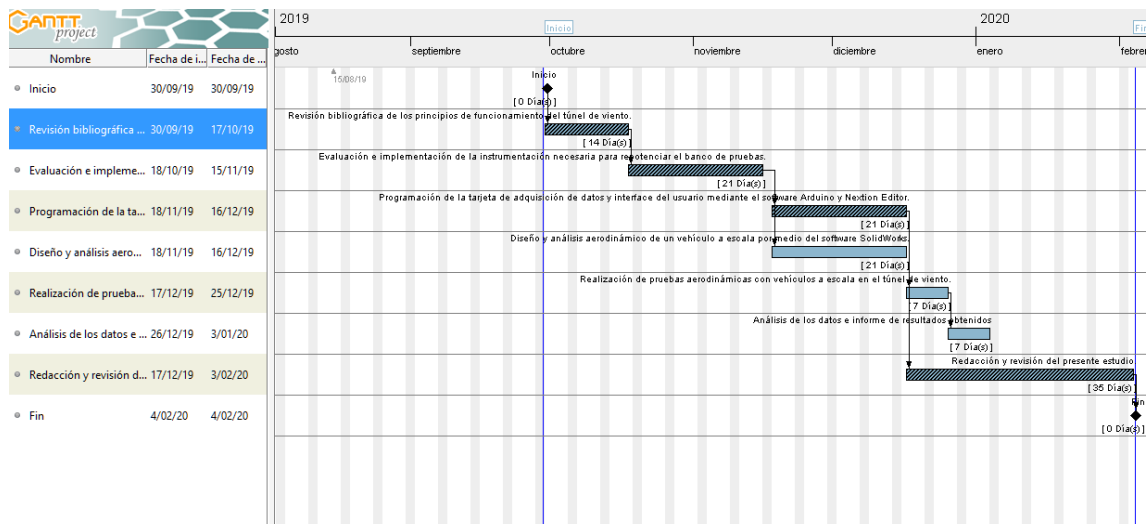


Figura 61-4: Diagrama de Gantt

Fuente: Quinatoa C, 2020

Según el cronograma de actividades el tiempo estimado de desarrollo del estudio fue de 91 días laborables equivalente a 4 meses.

4.3 Recursos y materiales

4.3.1 Recursos humanos

El talento humano del presente estudio aportó con sus conocimientos y experiencias para desarrollar y validar de la investigación.

El equipo de trabajo estuvo integrado por:

- Director.
- Miembro.
- Asesor externo.
- Técnico especializado en programación.
- Investigador.

4.3.2 Recursos materiales

Con el fin de realizar este estudio se tuvo la necesidad de adquirir ciertos recursos materiales, los cuales se muestran en la tabla 16-4.

Tabla 16-4: Materiales y equipos

MATERIALES	
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN
1	Estaño
1	Ácido sulfúrico
1	Plancha de MDF
2	Espráis negros
1	Implementos de oficina
1	Tarjeta de adquisición de datos
HERRAMIENTAS	
3	Juego de llaves
1	Juego de destornilladores
1	Soldadora de estaño
EQUIPOS	
1	Laptop
1	Impresora 3D
1	Cortadora e impresora laser
SOFTWARE	
1	Simplify 3D
1	SolidWorks 2019
1	Nextion Editor
1	Arduino

Realizado por: Quinatoa C, 2020

4.3.3 Recursos económicos

Todos los gastos que se llevó a cabo para realizar este estudio se financio por mis propios medios.

4.3.4 Presupuesto

4.3.4.1 Costos directos.

Son todos aquellos que afecta de forma directa en el desarrollo del presente estudio. Por tanto, se considera a los costos de materiales, mano de obra, equipos y transporte, las cuales se detallan en la tabla 17-4.

Tabla 17-4: Costos directos

COSTOS DIRECTOS			
CANT.	DESCRIPCIÓN	P. UNIT. (\$)	P. TOTAL. (\$)
1	Arduino Mega 2560 R3	18.00	18.00
1	Arduino Nano	8.00	8.00
2	Fuentes Step Down LM2596	3.50	7.00
1	Fuente 12V 2ª	6.00	6.00
1	HMI NEXTION 5"	450.00	450.00
1	Lector Micro SD	6.00	6.00
1	Micro SD	7.00	7.00
1	Galga de Peso 3Kg	13.00	13.00
1	Galga de Peso 5Kg	15.00	15.00
2	Modulo HX711	3.50	7.00
1	PCB	45.00	45.00
1	Motor DC 5V	2.50	2.50
1	Base para Galgas	75.00	75.00
1	Impresión 3D Anemómetro	15.00	15.00
1	Corte laser acrílico tapa caja	18.00	18.00
1	Impresión 3D caja dispositivo	60.00	60.00
1	Vehículo a escala BMW M5 2012	40.00	40.00
1	Cable	6.00	6.00
		TOTAL	\$ 798.50

Realizado por: Quinatoa C, 2020

Los costos directos totales estimados ascienden a \$ 798.50.

4.3.4.2 Costos indirectos

Son todos los gastos que no interviene directamente en la elaboración del estudio, pero son indispensables en su desarrollo. De los cuales se destacan los gastos imprevistos, los mismos se detallan en la tabla 18-4.

Tabla 18-1: Costos indirectos

COSTOS INDIRECTOS			
CANT.	DESCRIPCIÓN	P. UNIT. (\$)	P. TOTAL. (\$)
1	Gastos varios (transporte, pinturas, etc.)	300.00	300.00
1	Copias	120.00	120.00
1	Internet	30.00	30.00
TOTAL			\$ 450.00

Realizado por: Quinatoa C, 2020

El valor estimado para los gastos de imprevistos fue de \$ 450.00.

4.3.4.3 Costos totales

Es la suma de los costos directos e indirectos obsérvese la tabla 19-4. Es otras palabras representa el presupuesto total invertido en la elaboración del estudio.

Tabla 19-4: Costos totales

COSTO TOTAL	
DESCRIPCIÓN	COSTOS (\$)
Costos directos	798.50
Cotos indirectos	450.00
TOTAL	\$ 1,248.50

Realizado por: Quinatoa C, 2020

Así tenemos que el presupuesto total que se invierte en este estudio llego a un monto de \$ 1208.50.

CONCLUSIONES

Al revisar el estado del arte de estudio permitió comprender de mejor manera los conceptos del fenómeno de estudio. Así pudiendo tener una idea clara de que resultados se quiere obtener al repotenciar el túnel de viento de la Carrera de Ingeniería Automotriz.

Con la implementación de nueva instrumentación al túnel de viento se pudo representar los datos en la pantalla mediante gráficas en tiempo real por lo que se consiguió una excelente interacción usuario-máquina que facilita la comprensión de la aerodinámica del automóvil y como esta influye en el diseño de la carrocería y prestaciones del mismo.

Se pudo observar que durante las pruebas aerodinámicas los valores de la fuerza de sustentación y arrastre varían en función de la velocidad del viento. Así a 20 m/s se obtuvo que $F_y=0.38$ N y $F_z=0.54$ N, y a 40 m/s se obtuvieron que $F_y=1.6$ N y $F_z=2.16$ N. En función de estos resultados se puede decir que el efecto del aire sobre la carrocería del BMW M5 2012 es mayor a medida que aumenta la velocidad. Ya que se observa que las zonas más afectadas son las que se encuentran directamente contra el viento en este caso la parte frontal del BMW M5 2012 y la parte baja del parabrisas donde se generan mayor presión. Lo que se pudo ver reflejando en el incremento incidente de las fuerzas aerodinámicas anteriormente mencionadas. En general el BMW M5 2012 al circular a altas velocidades sigue manteniendo un fuerte agarre a la calzada, ya que cuenta con un buen diseño aerodinámico.

Mediante la optimización de la zona de pruebas del túnel de viento se mejora la visualización de las líneas de flujo del aire. Lo que permitió saber que la parte delantera del vehículo BMW M5 2012 es la zona mas susceptible a formarse vórtices. Por tanto, esto genera mayor resistencia al avance del automóvil.

Al actualizar el manual de uso y mantenimiento del banco se garantiza la fiabilidad y vida útil del túnel. Así también se capacita a los usuarios para que realicen las respectivas prácticas.

RECOMENDACIONES

Leer el manual de uso antes de realizar las respectivas prácticas en el banco y contar con las medidas de seguridad pertinentes.

Tener en cuenta al momento de conectar los componentes del túnel de viento a la corriente eléctrica. Dado que unos trabajan a 110V y 220V, antes de poner en funcionamiento el banco.

Revisar que no exista ningún tipo de objeto dentro del túnel y que entradas y salidas del viento no se encuentren obstruidas.

Utilizar el líquido de humo apropiado ya que la sustancia del mismo no es compatible con ciertos materiales y puede reducir la visibilidad del flujo de aire sobre el modelo de prueba.

La maqueta a escala del vehículo a ensayar debe ser de 1:18. Si se va a realizar alguna modificación es preferirle observar el comportamiento del vehículo en el modelo a escala.

Los usuarios deben leer el manual de uso para la realización de las prácticas en el túnel y contar con la respectiva supervisión.

GLOSARIO

Aminorar: minimizar la resistencia aerodinámica es una forma prometedora de reducir el consumo de combustible, el ruido y las emisiones (Publicaciones Dyna, 2006), 15

Extrados: a mayor curvatura del perfil mayor diferencia de velocidad entre las superficies superior e inferior del ala y por tanto mayor diferencia de presión, o lo que es igual mayor fuerza de sustentación (Muñoz, 2013), 10

Gradiente: produce zonas de presión o depresión y rozamiento viscoso con las paredes, lo que origina esfuerzos que influyen tanto en el avance del vehículo, ofreciendo una resistencia de naturaleza aerodinámica, como en las cargas sobre las ruedas y la estabilidad del automóvil (Blanco, 2011), 13

Incidir: El flujo de viento que genera el túnel hace que dicho flujo incida o realice una fricción en la parte exterior del vehículo (Campos, 2020), 20

BIBLIOGRAFÍA

OLIVARES DE JODAR, José. 2011. Estudio aerodinámico aplicado en el campo de la automoción [En línea] (Trabajo de titulación). (Ingeniería) Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona-España. 2011. pp. 15-34. [Consulta: 1 de septiembre 2020.] https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/14663/PFC_I.pdf?sequence=2&isAllowed=y.

ARDUINO. *arduino mega 2560*. [blog] 2020. [Consulta: 21 de Mayo 2020.]. Disponible en: <https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3>.

AV ELECTRONICS. *Sensor de Peso 3kg (Celda de Carga)*. [blog].2020. [Consulta: 25 de Mayo 2020.]. Disponible en: <https://avelectronics.cc/producto/sensor-de-peso-3kg/>.

CARO, Abel. *CFD (Computational Fluid Dynamics)*. [Blog] 2020. [Consulta: 14 de febrero 2020.]. Disponible en: <https://www.abelcaro.com/f1/aerodinamica/simulacion-cfd/>.

COMPONENTS101. *LM741 Op-amp IC*. [Blog] 2020. [Consulta: 22 de Mayo de 2020.]. Disponible en: <https://components101.com/lm741-op-amp-ic>.

CURICAMA, Ángel, & RUIZ, Hugo. Diseño y construcción de un túnel de viento para pruebas aerodinámicas en vehículos para la Escuela de Ingeniería Automotriz [En línea] (Tesis de Grado). (Ingeniería) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba-Ecuador. 2013. pp. 45-60. [Consulta: 17 septiembre 2020] <http://dspace.espace.edu.ec/bitstream/123456789/3045/1/65T00094.pdf>

DASSAULT SYSTEMES. *¿Cómo funciona SOLIDWORKS Flow Simulation?* [Blog] 2020. [Consulta: 08 de febrero 2020.]. Disponible en: <https://blogs.solidworks.com/solidworkslatamysp/solidworks-blog/simulacion/solidworks-flow-simulation/como-funciona-solidworks-flow-simulation/>.

F1ALDIA. *Túneles de viento (I)*. [Blog] 2010. [Consulta: 20 de febrero de 2020.]. Disponible en: <https://www.f1aldia.com/10650/tuneles-de-viento-i/>.

FRAIJA, I. "Estudio de la aerodinámica en los vehículos". redalyc.org[En línea], 2006, (Colombia) 4(2), pp. 66-70 [Consulta: 9 de enero 2020.]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=496251108011>.

GARCÍA, Noel. *Desarrollos del túnel de viento de Audi*. [Blog] 2015. [Consulta: 20 de febrero 2020.]. Disponible en: <https://www.lavanguardia.com/motor/actualidad/20150821/54434932020/aerodinamica-consumo-tunel-viento.html>.

ITEAD STUDIO. *NX8048T050*. [Blog] 2011. [Consulta: 21 de Mayo de 2020.]. Disponible en: <https://nextion.tech/datasheets/nx8048t050/>.

LANDÁZURI, Pablo. Diseño y construcción de un túnel de viento a escala (Tesis de Grado) (Ingeniería) Universidad san francisco, Quito-Ecuador. 2016. pp. 38-45

MCBEATH, S. *Competition Car Aerodynamics*. 1a. London: Haynes : s.n., 2011.

MOTT, R. *Mecánica de Fluidos*. 1a. México: Pearson : s.n., 2006.

NAYLAMP MECHATRONICS. *Módulo Micro SD Card*. [Blog] 2020. [Consulta: 21 de Mayo de 2020.]. Disponible en: <https://naylampmechatronics.com/modulos/104-modulo-micro-sd-card.html>.

PADILLA, Marcel. Creación de túnel de viento a escala 1:18 que indique flujo de aire sobre objetos, en especial vehículos, para fomentar el estudio de la aerodinámica (Tesis de Grado) (Ingeniería) Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito-Ecuador. 2015. pp. 32-42

PICKUP 4X4. *spoiler honda civic 2012 a 2015 30 léds negro (tg8030)*. [Blog] 2020. Disponible en: http://www.pickupcenter.com.uy/spoiler_honda_civic_2012_a_2015_30_1%C3%89ds_negro_15366.

REFLEXIONES PROHIBIDAS. *el túnel de viento, el gran desconocido*. [Blog] 2012. [Consulta: 20 de febrero de 2020.]. Disponible en: <http://reflexionesprohibidas.blogspot.com/2012/10/el-tunel-de-viento-el-gran-desconocido.html>.

SHENZHEN VISHAN TECHNOLOGY CO.,LTD. *dc motor / brushless / 6v / 9v*. [Blog] 2020. [Consulta: 20 de Mayo de 2020.]. Disponible en: <https://www.directindustry.com/prod/vishan-motor/product-190241-1867461.html>.

SOLID BUSINESS INTELLIGENCE, S.L. *Solidbi*. [Blog] 2020. [Consulta: 08 de Febrero de 2020.]. Disponible en: <https://solid-bi.es/solidworks/>.

TIPLER, P. *Física: para la Ciencia y Tecnología*. 1a. Barcelona: Reverté : s.n., 2005.

TREMAYNE, D. *The Science of Formula 1 Design*. 1a. London: Haynes : s.n., 2009.

WAGSTAFF, I. *Audi R8*. 1a. Dorchester: Veloce : s.n., 2011.