UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ

Trabajo de titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico Automotriz

PROYECTO TÉCNICO:

"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CARROCERIA DE UN VEHÍCULO DE COMPETENCIA FORMULA SAE ELÉCTRICO"

AUTORES

GRANDA MOROCHO LUIS DARIO

TAPIA VIÑAN ERIK RENE

TUTOR

ING. PAÚL MÉNDEZ TORRES

CUENCA – ECUADOR

2018

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Luis Darío Granda Morocho con C.I: 1104879356 y Erik Rene Tapia Viñan con C.I: 1900697655, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales del trabajo de titulación **"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CARROCERIA DE UN VEHÍCULO DE COMPETENCIA FORMULA SAE ELÉCTRICO"**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de **Ingeniero Mecánico Automotriz**, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestras condiciones de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, febrero del 2018

Luis Dario Granda Morocho

C.I: 1104879356

Erik Rene Tapia Viñan

C.I: 1900697655

CERTIFICACIÓN

Yo declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación **"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CARROCERIA DE UN VEHÍCULO DE COMPETENCIA FORMULA SAE ELÉCTRICO"**, realizado por autores Luis Darío Granda Morocho y Erik Rene Tapia Viñan obteniendo el Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, febrero del 2018

Ing. Paúl Méndez Torres

CI. 0102455789

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Luis Darío Granda Morocho con C.I: 1104879356 y Erik Rene Tapia Viñan con C.I: 1900697655, autores del trabajo de titulación **"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CARROCERIA DE UN VEHÍCULO DE COMPETENCIA FORMULA SAE ELÉCTRICO"**, certificamos que el total contenido de este **Proyecto Técnico**, son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, febrero del 2018

Luis Darío Granda Morocho

C.I: 1104879356

Erik Rene Tapia Viñan

C.I: 1900697655

AGRADECIMIENTO

A Dios, por permitirme seguir adelante con mi vida y mis sueños, a mis padres por apoyarme en cada momento pese a todas las dificultades, a cada miembro de mi familia que siempre estuvieron en los momentos más significativos de mi vida.

Así mismo, agradezco a cada una de las autoridades y docente de la Universidad Politécnica Salesiana quienes me supieron guiar y de manera muy especial al Msc. Jonatan Pozo y Roberto Sacoto, por su tiempo y apoyo durante y fuera del proyecto.

Finalmente, al Ing. Paul Méndez quien nos guio durante el desarrollo de este proyecto.

Luis Darío Granda Morocho

DEDICATORIA

Este proyecto va dedicado a mis padres por su tiempo, sacrificio, sudor y cansancio que permitieron que pueda primeramente ejercer la carrera y realizar este proyecto, porque pese a todas las dificultades siempre estuvieron presentes para saber guiarme.

Luis Darío Granda Morocho

AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento especial a mis padres y familia que siempre me aconsejaron en cada decisión tomada de mi vida y me han ayudado a superar cada obstáculo.

De igual forma a cada una de las autoridades de la Universidad Politécnica Salesiana por su apoyo al proyecto y al equipo y por permitirme ser partícipe del mismo.

Al Msc. Jonatán Pozo y Roberto Sacoto, quienes dedicaron tiempo a impartir su conocimiento para culminar con éxito el proyecto.

Finalmente, al Ing. Paul Méndez quien nos guio durante el desarrollo de este proyecto.

Erik Rene Tapia Viñan

DEDICATORIA

Este proyecto va dedicado principalmente a mis padres, los cuales han sido los pilares fundamentales en mi vida, me han ayudado y dado fortaleza día a día para cumplir cada meta que me he propuesto.

De la misma forma va dedicado a mi esposa e hijo los cuales se convirtieron en un pilar fundamental en mi vida.

A mi hermano, familia y amigos que han estado siempre pendientes de mí y han sabido darme un consejo y poder enmendar cada error que he cometido y poder crecer como persona.

Erik Rene Tapia Viñan

RESUMEN

En este documento se presenta el diseño aerodinámico y el proceso de construcción, de una carrocería para un vehículo de competencia Fórmula SAE Eléctrico, de acuerdo al reglamento 2017.

En primer lugar, se revisará el fundamento teórico sobre aerodinámica en libros, artículos científicos, informes técnicos, foros, etc.
Como proceso inicial de diseño se selecciona la configuración aerodinámica a utilizar y modela la carrocería en un software de diseño CAD, de acuerdo al reglamento Fórmula SAE y los criterios de diseño para vehículos de competencia tipo Fórmula. Para el modelado de la misma se requiere de subsistemas del vehículo como: el chasis, suspensión y ubicación de elementos del sistema eléctrico.

Posterior al diseño CAD, se realizan simulaciones CFD a diferentes velocidades para calcular los coeficientes aerodinámicos y determinar la eficiencia de cada modelo de la carrocería. Con cada simulación lograda a través de este paso, se estudia el comportamiento aerodinámico de la carrocería del vehículo y se realizan mejoras en el diseño del mismo.

Para la selección del diseño final a construir se realizan comparaciones entre las simulaciones de los cuatro tipos de diseños diferentes, en los cuales se varía la forma de partes como los pontones, nariz, tapa posterior, etc. Posterior a ello se selecciona el modelo más eficiente y se realizan las simulaciones CFD con la mayor parte de los subsistemas que influyen en la aerodinámica del vehículo. Luego se selecciona el proceso para la construcción de la carrocería, se construye y se realizan pruebas de montaje y funcionamiento en el vehículo, además se comprueban los valores de los coeficientes mediante pruebas dinámicas.

Finalmente se presenta los resultados obtenidos, conclusiones, recomendaciones para futuras investigaciones que permitan mejorar el desempeño en pista del vehículo tipo Formula SAE de la Universidad Politécnica Salesiana.

ABSTRACT

This document presents the aerodynamic design and the construction process of an electric Formula SAE competition vehicle body, according to the 2017 regulations.

In first place, the theoretical fundaments about aerodynamics in books, scientific articles, technical reports, forums, etc. will be reviewed.

As an initial process of the design the aerodynamic configuration to be used is selected and the body is modeled in a CAD design software, according to the Formula SAE regulations and the design criteria for formula style competition vehicles. For the modeling, it is required of subsystems of the vehicle like the chassis, suspension and the location of electrical system elements.

After the CAD design, CFD simulations are performed at different speeds to calculate the different aerodynamic coefficients and to determinate the efficiency of each model of the body. With every performed simulation through this step, the vehicle body aerodynamic behavior is studied and some design improvements are made.

For the final design selection to be constructed, some comparisons between the four different types of design simulations are made, in which the shape of parts, such as the pontoons, nose, back cover, etc. are varied. After that, the most efficient model is selected and CFD simulations are carried out with most of the subsystems that influence the vehicle's aerodynamics. Then the vehicle body construction process is selected and built and mounting and functioning tests are performed. Also, the coefficients values are checked through dynamic tests.

Finally, the results obtained, conclusions, recommendations for future investigations that allow improving the track performance of the Formula SAE single-seat vehicle of the Salesiana Polytechnic University are presented.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN IX
ABSTRACT X
INDICE DE FIGURAS XVI
INDICE DE TABLAS XIX
INTRODUCCIÓN XX
PROBLEMA XXI
OBJETIVOS XXII
OBJETIVO PRINCIPAL XXII
OBJETIVOS ESPECIFICOS XXII
1. INTROCUCCIÓN AL DISEÑO 1
1.1. Reconocimiento de la necesidad del diseño 1
1.2. Concepción del diseño 2
1.2.1. Criterios importantes para el diseño 3
1.2.1.1. Criterios estéticos 3
1.2.1.2. Criterios mecánicos 3
1.2.1.3. Criterios de seguridad 3
1.2.1.4. Eficiencia Aerodinámica 4
1.3. Requerimiento para el diseño 5
1.4. Etapas del diseño. 6
1.4.1. Etapa de diseño aerodinámico 7
1.4.2. Etapa de selección de material 7
1.4.3. Etapa de construcción de moldes 8
1.4.4. Etapa final de construcción y montaje 8
1.4.5. Etapa de pruebas 8
1.5. Aerodinámica de vehículos de competencia 9
1.5.1. Introducción a la aerodinámica 9
1.5.1.1. Resistencia al movimiento de un vehículo R_T 9
1.5.1.2. Importancia de la aerodinámica en un vehículo 10
1.5.2. Fundamentos de la aerodinámica 12
1.5.2.1. Fluido de estudio 12
1.5.2.2. Propiedades del aire 12
1.5.2.3. Flujo de aire y capa límite 13

1.5.2.4. Resistencia al avance 15
1.5.2.5. Principio de Bernoulli 16
1.5.2.6. Presión en el punto de estancamiento. 19
1.5.2.7. Distribución de la presión 20
1.5.2.8. Kammback 20
1.5.2.9. Área de un vehículo para el estudio aerodinámico 21
1.5.2.10. Fuerzas y momentos aerodinámicos 22
1.5.2.11. Coeficientes aerodinámicos. 25
1.5.2.12. Potencia necesaria para vencer la resistencia aerodinámica 26
1.5.3. Análisis computacional de fluidos CFD 26
1.5.3.1. El proceso de la dinámica de fluidos computacional 27
1.5.3.2. Etapas de un análisis CFD 28
1.5.3.3. Reparación de superficies para el análisis. 29
1.5.3.4. Creación del dominio computacional 29
1.5.3.5. Generación de la malla 30
1.5.3.6. Tipo de rejilla 30
1.6. Aspectos de diseño y construcción de carrocerías de vehículos de competencia tipo Formula 31
1.6.1. Configuración del vehículo para una competencia tipo Fórmula 31
1.6.2. División de la carrocería 33
1.6.2.1. División por la influencia en el vehículo 33
1.6.2.2. División por partes de la carrocería 34
2. DISEÑO DEL MODELO Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO 36
2.1. Selección de la configuración aerodinámica 36
2.1.1. Descripción de las secciones de la carrocería. 39
2.1.1.1. Primera sección 40
2.1.1.2. Segunda sección 40
2.1.2. Influencia y necesidad de los subsistemas del monoplaza 41
2.1.2.1. Distribución de los subsistemas del vehículo 42
2.2. Diseño de la carrocería 44
2.2.1. Primeros bosquejos de la carrocería 44
2.2.1.1. Influencia y selección la nariz 44
2.2.1.2. Influencia y selección de los pontones 46
2.3. Diseño CAD y simulaciones CFD de la carrocería 47

2.3.1. Parámetros de simulación CFD 47
2.3.2. Primer diseño CAD de la carrocería 48
2.3.3. Segundo modelo CAD de la carrocería 51
2.3.4. Tercer modelo CAD de la carrocería 54
2.3.5. Cuarto modelo CAD de la carrocería 57
2.4. Comparación de resultados obtenidos de los diferentes modelos de la carrocería. 60
2.4.1. Comparación de la fuerza de arrastre generada 60
2.4.2. Comparación de la Presión dinámica generada por modelo 61
2.4.3. Comparación del coeficiente aerodinámico de arrastre 63
2.4.4. Selección del modelo de la carrocería 64
2.5. Estudio Aerodinámico del vehículo con sus subsistemas 70
2.5.1. Distribución de presión 72
2.5.2. Velocidades del fluido a lo largo del vehículo 74
2.5.3. Fuerza y coeficientes de arrastre y sustentación 77
2.5.4. Potencia necesaria para vencer la fuerza aerodinámica 79
2.6. Descripción aerodinámica del vehículo 80
3. FABRICACION DE LA CARROCERIA 82
3.1. Introducción 82
3.2. Selección del Material 82
3.3. Materiales más utilizados en carrocerías para vehículos Formula SAE 82
3.3.1. Fibra de Vidrio 82
3.3.2. Fibra de carbono 84
3.3.3. Matriz de selección 85
3.4. Diagramas de Procesos 87
3.5. Construcción del Exoesqueleto 89
3.5.1. Selección de planos 89
3.5.2. Proceso de corte de planos 90
3.5.3. Proceso de Armado del exoesqueleto 90
3.6. Proceso de Fabricación de Moldes (Nariz) 92
3.6.1. Primer Negativo - Molde Base 92
3.6.1.1. Aplicación de paneles 92
3.6.1.2. Aplicación de espuma de Poliuretano 92
3.6.1.3. Pulido y acabado del Molde Base 93
3.6.2. Primer Positivo - Molde Principal 95

3.6.2.1. Recorte de la Fibra de Vidrio 95
3.6.2.2. Aplicación de Cera Desmoldante 95
3.6.2.3. Aplicación de la Fibra de Vidrio 95
3.6.2.4. Desmolde del Molde Principal 96
3.6.3. Segundo Positivo – Pieza Final 96
3.6.3.1. Pulido y acabado del Molde Principal 96
3.6.3.2. Recorte de la Fibra de Vidrio 96
3.6.3.3. Aplicación de Cera Desmoldante 96
3.6.3.4. Aplicación de la Fibra de Vidrio 97
3.6.3.5. Desmolde de la Pieza Final 98
3.7. Proceso de Fabricación de Moldes (Cuerpo y Pontones) 99
3.7.1. Primer Negativo - Molde Base 99
3.7.1.1. Aplicación de paneles 99
3.7.1.2. Aplicación de espuma de poliuretano 100
3.7.1.3. Pulido y acabado del Molde Base 100
3.7.2. Primer Positivo - Molde Principal 102
3.7.2.1. Recorte de Fibra de Vidrio 102
3.7.2.2. Aplicación de Cera Desmoldante 102
3.7.2.3. Aplicación de Fibra de Vidrio 103
3.7.2.4. Desmolde del Molde Principal 103
3.7.3. Segundo Positivo – Pieza Final 103
3.7.3.1. Pulido y acabado del Molde Principal 103
3.7.3.2. Recorte de la Fibra de Vidrio 103
3.7.3.3. Aplicación de Cera Desmoldante 103
3.7.3.4. Aplicación de la Fibra de Vidrio 104
3.7.3.5. Desmolde de la Pieza Final 105
3.7.3.6. Proceso de Pintura 106
3.8. Anclaje al chasis 108
3.9. Costos de manufactura 109
3.9.1. Costos directos 109
3.9.2. Costos Indirectos 110
3.9.3. Costo Total 111
4. Aplicación de resultados 112
4.1. Peso de la carrocería 112
4.2. Prueba de lluvia 113

4.3. Validación de datos 114
4.3.1. Determinación de formulas 115
4.3.2. Determinación del coeficiente aerodinámico de arrastre 116
4.3.3. Descripción Final 117
5. CONCLUSIONES 118
6. RECOMENDACIONES 119
7. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA 119
ANEXOS 122
ANEXO I. Reglamento Fórmula SAE 2017 122
ANEXO II. Tabla de coeficientes aerodinámicos de un monoplaza con diferente configuración 125

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Monoplaza de un Formula SAE 2
Figura 2.1 Bosco 1.0 de la Universidad Politécnica Salesiana 39
Figura 2.2 Nariz de un monoplaza FSAE 40
Figura 2.3 Recubrimiento en la zona posterior 41
Figura 2.4 Ensamble de los subsistemas del vehículo E.B. 2017 42
Figura 2.5 Distribución frontal de los subsistemas 42
Figura 2.6 Distribución posterior de subsistemas del vehículo E.B. 2017 43
Figura 2.7 Distribución de los elementos eléctricos 43
Figura 2.8 Primer bosquejo de la nariz de la carrocería 45
Figura 2.9 Primer bosquejo de la nariz vista superior 45
Figura 2.10 Bosquejo de los pontones vista lateral 46
Figura 2.11 Bosquejo de los pontones vista superior 46
Figura 2.12 Primer modelo de la carrocería 48
Figura 2.13 Parámetros de simulación 49
Figura 2.14 Variables a calcular en la simulación 49
Figura 2.15 Zonas de mayor presión vistas sobre la superficie de la carrocería 50
Figura 2.16 Zonas de mayor presión 50
Figura 2.17 Formas delanteras e influencia sobre el Cx 52
Figura 2.18 Modificación de la nariz 52
Figura 2.19 Modificación de los pontones y tapa posterior 53
Figura 2.20 Distribución de presión superficial del segundo modelo a elevadas velocidades 53
Figura 2.21 Modificación de la nariz. 55
Figura 2.22 Modificación de los pontones y la tapa posterior 55
Figura 2.23 Distribución superficial de la presión en el tercer modelo 56
Figura 2.24 Modificación de la geometría de la nariz 57
Figura 2.25 Modificación en la geometría de los pontones y tapa posterior 58
Figura 2.26 Distribución superficial de la presión del cuarto modelo de la carrocería 59
Figura 2.27 Comparación de la fuerza de arrastre generada por modelo 61
Figura 2.28 Comparación de la presión dinámica generada por cada modelo 62
Figura 2.29 Comparación del coeficiente aerodinámico de cada modelo 64
Figura 2.30 Vista frontal del segundo y cuarto modelo 65

Figura 2.31 Comparación de la sección en el arco frontal de la nariz de cada modelo 66
Figura 2.32 Cambios de geometría en la unión de los paneles laterales de la nariz y los pontones 67
Figura 2.33 Vista lateral de los pontones del segundo y cuarto modelo 68
Figura 2.34 Vista superior del segundo y cuarto modelo de la carrocería 69
Figura 2.35 Modelo seleccionado para la construcción 69
Figura 2.36 Vista lateral del diseño para la simulación 70
Figura 2.37 Vista frontal del diseño a simular 71
Figura 2.38 Vista superior del diseño a simular 71
Figura 2.39 Resultados de presiones obtenidas en la simulación 72
Figura 2.40 Distribución superficial de presión 73
Figura 2.41 Puntos frontales de estancamiento y alta presión 74
Figura 2.42 Trayectorias de presión en el punto de estancamiento de la nariz 74
Figura 2.43 Zonas de baja velocidad a lo largo del vehículo 75
Figura 2.44 Distribución de la velocidad en el plano medio del vehículo 75
Figura 2.45 Distribución de la velocidad del aire en los neumáticos 76
Figura 2.46 Distribución de la velocidad en vista superior con un plano a la altura de la nariz 76
Figura 2.47 Resultados de las fuerzas de arrastre y sustentación simuladas 77
Figura 2.48 Ensamble final del vehículo FSAE E.B. 2017 80
Figura 3.1 Valores de Propiedades para Fibra de Carbono 85
Figura 3.2 División de la parte delantera 89
Figura 3.3 División de la parte posterior (Pontones) 90
Figura 3.4 Base del Exoesqueleto 90
Figura 3.5 Exoesqueleto (Parte Frontal) 91
Figura 3.6 Exoesqueleto (Cuerpo y Pontones) 91
Figura 3.7. Aplicación de espuma de poliuretano 92
Figura 3.8. Aplicación de Masilla (Parte Frontal) 93
Figura 3.9. Pulido de la Superficie 94
Figura 3.10. Molde base (Nariz) 94
Figura 3.11. Aplicación de Gelcoat en la cara lateral de la pieza 97
Figura 3.12. Aplicación de capas de fibra de vidrio en la cara superior 98
Figura 3.13. Parte Frontal (Nariz) 98
Figura 3.14. Anclaje de paneles por medio de retazos de alambre 99
Figura 3.15. Aplicación Espuma De Poliuretano 100

Figura 3.16. Primera capa de Masilla..... 101
Figura 3.17. Inspección visual derecha de la pieza..... 101
Figura 3.18. Molde Base (Pontones)..... 102
Figura 3.19. Aplicación de Gelcoat en la parte lateral (Pontones)..... 104
Figura 3.20. Aplicación de Gelcoat en la parte central (Pontones)..... 104
Figura 3.21. Secado de la primera capa de fibra de vidrio..... 105
Figura 3.22. Secado de la segunda capa de Fibra de vidrio..... 105
Figura 3.23. Pontones..... 106
Figura 3.24. Aplicación de La base de Pintura (Pontones)..... 106
Figura 3.25. Aplicación de La base de Pintura (Parte Frontal)..... 107
Figura 3.26. Piezas Terminadas..... 107
Figura 3.27. Sujetador de 1/4 de vuelta con expulsión automática (5/16 Diam x 0.92 de longitud)..... 108

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Descripción de los monoplaza de algunos equipos 37
Tabla 2.3 Valores de velocidades a simular. 47
Tabla 2.4 Parámetros de simulación 48
Tabla 2.5 Resultados aerodinámicos del modelo 1 51
Tabla 2.6 Resultados aerodinámicos del modelo 2 54
Tabla 2.7 Resultados aerodinámicos del tercer modelo 56
Tabla 2.8 Resultados aerodinámicos del cuarto modelo de la carrocería. 59
Tabla 2.9 Resultados de la fuerza de arrastre por cada modelo 60
Tabla 2.10 Resultados de la presión dinámica por cada modelo 62
Tabla 2.11 Resultados del coeficiente aerodinámico por cada modelo 63
Tabla 2.12 Resultados teóricos y simulados de las fuerzas y coeficientes aerodinámicos 79
Tabla 2.13 Valores aerodinámicos del vehículo a 80 km/h 81
Tabla 3.1 Especificaciones técnicas de la fibra de vidrio 83
Tabla 3.2 Propiedades de Fibras de Vidrio Seleccionadas 83
Tabla 3.3 Propiedades del Aluminio 84
Tabla 3.4 Matriz de Decisión 86
Tabla 3.5. Lista de Materiales 109
Tabla 3.6. Equipos y Asesoría 110
Tabla 3.7. Costos indirectos 110
Tabla 3.8. Costo Total 111
Tabla 4.1. Peso del Vehículo eléctrico 112
Tabla 4.2. Peso del vehículo a combustión 113
Tabla 4.3. Peso de vehículos participantes 113
Tabla 4.4. Tabla de velocidades obtenidas en pruebas 114
Tabla 4.5. Datos referentes al cálculo 116
Tabla 4.6. Transformación de unidades 116

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto muestra el diseño y construcción de una carroceria aerodinámica bajo la normativa vigente de la competencia formula student 2016 para un prototipo de vehículo monoplaza tipo formula Sae. Además de evidenciar la manufactura y el uso de la materia prima con la finalidad de obtener una excelente resistencia y menor peso en la carroceria del vehículo.

Para iniciar con el diseño, se parte del estudio de los efectos del aire sobre las superficies de los vehículos con el fin de poder aprovechar las corrientes del flujo en el desempeño del vehículo. El análisis aerodinámico del vehículo nos permite determinar las curvas en el perfil del vehículo que nos ayudaran a direccionar el flujo de aire hacia los componentes aerodinámicos como son: los pontones, nariz o trompa y la estructura de todo el vehículo mediante un software de simulación CFD.

La manufactura se basa en el uso de la materia prima, por lo que se optó por utilizar la fibra de vidrio en la carroceria. En los resultados finales del análisis se tiene el criterio del diseño para la manufactura de la carroceria y se toma en cuenta el área del vehículo que será cubierta por la carroceria. Además, en dicho proceso se considera reducir los pesos de cada una de las partes de la carroceria.

Finalmente la prueba en pista del vehículo nos permite aproximar los valores del coeficiente de arrastre del vehículo en la misma velocidad que se realizó las simulaciones en el software anteriormente, con la finalidad de validar la teoría implementada en el diseño de la carroceria.

PROBLEMA

En el desarrollo del proyecto del vehículo de competencia formula SAE eléctrico, surge la necesidad de diseñar y construir una carrocería con la finalidad que sea funcional estético y aerodinámico bajo las condiciones a la que estará sometido el vehículo. Además, se necesita que el sistema se acople a las exigencias del reglamento FSAE.

La carrocería tiene la función principal de ayudar al funcionamiento del vehículo bajo los efectos aerodinámicos y estéticos, además cumple funciones en la protección del piloto refrigeración y protección de elementos mecánicos y eléctricos.

Durante las pruebas eléctricas se constata los componentes eléctricos y su correcto funcionamiento mediante la prueba de lluvia en la cual se pulveriza agua hacia todo el vehículo, el diseño de la carrocería debe garantizar el correcto funcionamiento de los elementos durante dicha prueba.

OBJETIVOS

OBJETIVO PRINCIPAL

Diseñar y construir una carrocería en fibra de vidrio para el vehículo de competencia formula SAE eléctrico.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar una investigación del fundamento teórico y del estado del arte del diseño y construcción de carrocerías para la obtención de conocimientos en aerodinámica de los vehículos monoplaza.
- Diseñar la carrocería mediante un software de ingeniería para el mejoramiento de la eficiencia aerodinámica del vehículo.
- Construir la carrocería mediante procesos de manufactura y maquinas industriales para su completo acople al chasis y protección de los componentes mecánicos y electrónicos.
- Realizar pruebas de funcionalidad de la carrocería construida para la determinación del margen de error entre datos simulados y reales.

1. INTROCUCCIÓN AL DISEÑO

1.1. Reconocimiento de la necesidad del diseño

Indiscutiblemente podemos afirmar que un cambio en la aerodinámica de un vehículo no representa cambios en la concepción de diseños de vehículos. Pero se puede asegurar que el desarrollo y modificación de ciertas partes aerodinámicas pueden llegar a verse en el aprovechamiento de la potencia del motor, así como del consumo. Además, la mejora de la aerodinámica puede representar lo que en una competencia realmente importa que es la reducción de tiempo en pista.

Como en cualquier cuerpo que se traslada en cierta dirección y velocidad en relación con un fluido, las generaciones de cargas fluidodinámicas en el movimiento dinámico del mismo configuran la distribución de cargas estáticas del cuerpo. Esto ocurre generalmente en cuerpos que se trasladan a velocidades elevadas tal es el caso de automóviles y aeronaves, en donde las distribuciones de dichas cargas llegan a favorecer o percudir al cuerpo permitiendo su desplazamiento, como agarre en pista, o despegue de la misma. (Meseguer, 2010)

Inicialmente, la construcción de carrocerías en el desarrollo de vehículos fue un aspecto estético. No fue hasta el año 1914, en el que se desarrolló, bajo estudios fluidodinámicos, el vehículo *Rumpler Trofenwagen*, seguido del *Alfa* Ricotti. Con dichos estudios se determinó que los segundos iban de mano con la aerodinámica del vehículo [1]. No hay seguramente otro aspecto de la tecnología de los coches de competición que haya tenido una influencia mayor en el rendimiento, como el desarrollo de la aerodinámica. En todos los campeonatos automovilísticos del mundo, como los de Fórmula 1, KART y Fórmula 3, el factor aerodinámico es el elemento más importante en el rendimiento de los vehículos para mejorar las prestaciones. (McBeath, 2005)

Figura 1.1 Monoplaza de un Formula SAE

Fuente: (E.V., 2017)

En una competencia Formula SAE, la carrocería es una parte esencial del monoplaza, debido a que esta da la forma geométrica del vehículo, que es la parte estética. Una buena aerodinámica favorece al desempeño en pista del vehículo, alcanzando mayores velocidades en rectas de un circuito, así como también en curvas por medio del incremento de la fuerza normal que ejerce este en la pista. Además, se puede utilizar un flujo de aire adicional para el sistema de refrigeración y con una buena geometría se puede evitar cambios de temperatura y turbulencias dentro de la cabina del conductor, así como proteger a los peatones en caso de colisión. Estas ventajas además de mejorar el vehículo en pista, se relacionan con la reducción del consumo de energía para el motor. En un monoplaza eléctrico la necesidad de diseñar y construir una carrocería ligera, rígida y totalmente hermética es de vital importancia para garantizar la seguridad del conductor.

1.2. Concepción del diseño

Para la carrocería de un vehículo Formula SAE eléctrico, además de la parte estética, la funcionalidad es el criterio más importante ya que cada parámetro de la reglamentación está enfocado en la seguridad que la misma debe garantizar para el conductor y peatones cercanos. Además, para el diseño se debe considerar ciertos criterios para obtener una buena eficiencia en pista.

1.2.1. Criterios importantes para el diseño

1.2.1.1. Criterios estéticos

Al ser la carrocería el elemento externo que recubre la mayor parte de sistemas del vehículo, la estética es un parámetro fundamental en la etapa de diseño. Para conseguir una buena estética se debe considerar todos los aspectos del diseño que son:

- Medidas del reglamento.
- Hermeticidad en el sistema eléctrico.
- Facilidad de manufacturar las piezas.
- Facilidad de acoplar y retirar las piezas del vehículo.
- Geometría para crear un flujo de aire adicional para la refrigeración.
- Aerodinámica eficiente.
- Buena visibilidad para el conductor.

1.2.1.2. Criterios mecánicos

La extracción de la carrocería es importante para ingresar de manera inmediata a ciertos elementos mecánicos y eléctricos, por lo que la facilidad de extraer la misma es un punto importante, tanto en el diseño como en la construcción. En el diseño se considera las secciones en la que la misma estará dividida, mientras que en la construcción se considera los elementos de sujeción para el montaje.

1.2.1.3. Criterios de seguridad

Este es un punto muy importante para la fase de diseño, ya que garantizar la seguridad del piloto y peatones cercanos, es tanto una función de los diferentes sistemas del vehículo como la carrocería. Las consideraciones del diseño y construcción a tomar para garantizar la seguridad son:

- Hermeticidad en la zona del sistema eléctrico, esta se verifica mediante una prueba de lluvia con el vehículo encendido.
- Todos los bordes dirigidos hacia delante deben tener un radio mínimo de 38 mm con una abertura mínima de 45º, Esto garantiza la diminución de

fracturas en los peatones en caso de existir una colisión. (International, 2017-18 Formula SAE Rules, 2016)

- El montaje debe ser lo más rígido posible al vehículo.
- Los materiales de construcción no deben ser inflamables en su acabado final para el montaje.
- No deben existir artistas afiladas cercanas a la cabina del conductor.
- Debe permitir que el conductor salga de la cabina sin ningún obstáculo en el menor tiempo posible.

Todos los puntos mencionados anteriormente se describen en el Anexo I, que es el reglamento Fórmula SAE 2017.

1.2.1.4. Eficiencia Aerodinámica

Una buena aerodinámica permite que el vehículo tenga ciertas ventajas, que influyen directamente en la diminución del tiempo en pista. Para el diseño se busca disminuir el coeficiente de arrastre aerodinámico Cx, el cual influye en la potencia necesaria por el motor para vencer la fuerza de arrastre ahorrando la energía de las baterías. Además, la geometría debe abastecer con un flujo de aire adicional al sistema de refrigeración sin percudir la aerodinámica del vehículo.

Luego de tomar las consideraciones para el diseño se trata de combinar la estética con la aerodinámica, considerando ciertos aspectos de la reglamentación y seguridad. Un aspecto importante a considerar es la hermeticidad en los elementos eléctricos para la prueba de lluvia que se realiza en la competencia. Combinando estos aspectos se bosqueja el primer diseño en 2D, mediante el uso de lápiz y papel como se muestra en la figura 1. 1.

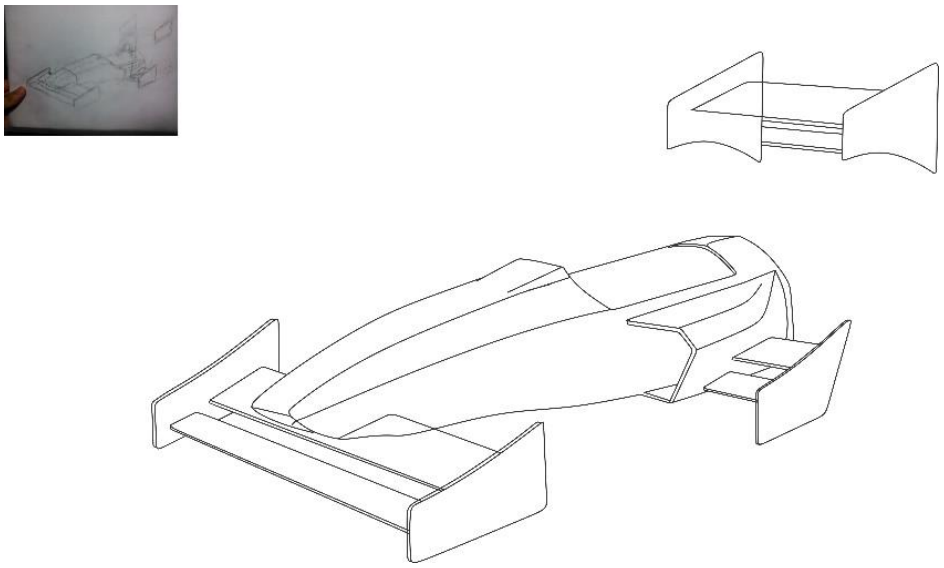


Figura 1.1 Bosquejo del primer diseño

Fuente: Autores

En la figura 1.1. Se puede observar el primer bosquejo de la carrocería en el cual se puede distinguir las secciones en las cuales estará divida la carrocería que son:

- Nariz.
- Paneles laterales.
- Pontones.
- Tapa posterior.
- Fondo plano.

1.3. Requerimiento para el diseño

Para el diseño de la carrocería, además del reglamento y los criterios establecidos, se requiere de ciertos sistemas del vehículo ya desarrollados para iniciar el diseño de la misma. Los sistemas que se requieren para desarrollar la carrocería son: el chasis, la suspensión, componentes eléctricos, refrigeración y dirección.

El chasis es la parte principal para iniciar con el diseño, ya que la carrocería recubre casi todos los sistemas y subsistemas del vehículo, además el chasis no da la forma del vehículo sino representa un limitante para el diseño y la forma del mismo. El sistema de suspensión junto al de dirección indica la posición de sus elementos y las ruedas, esto ayuda para determinar la zona de división de la carrocería así mismo

como limitaciones de diseño. Para el sistema eléctrico y de refrigeración el diseño de la carrocería es muy importante, ya que se debe garantizar la hermeticidad de los elementos eléctrico, por ello conocer la ubicación de elementos eléctricos es importante, de igual manera para los elementos de refrigeración que necesitan un flujo de aire, conocer su ubicación es de gran importancia.

1.4. Etapas del diseño.

A continuación, se presentan las etapas en las que se desarrollará la carrocería, desde el proceso de diseño CAD hasta la construcción y pruebas de montaje en el vehículo.

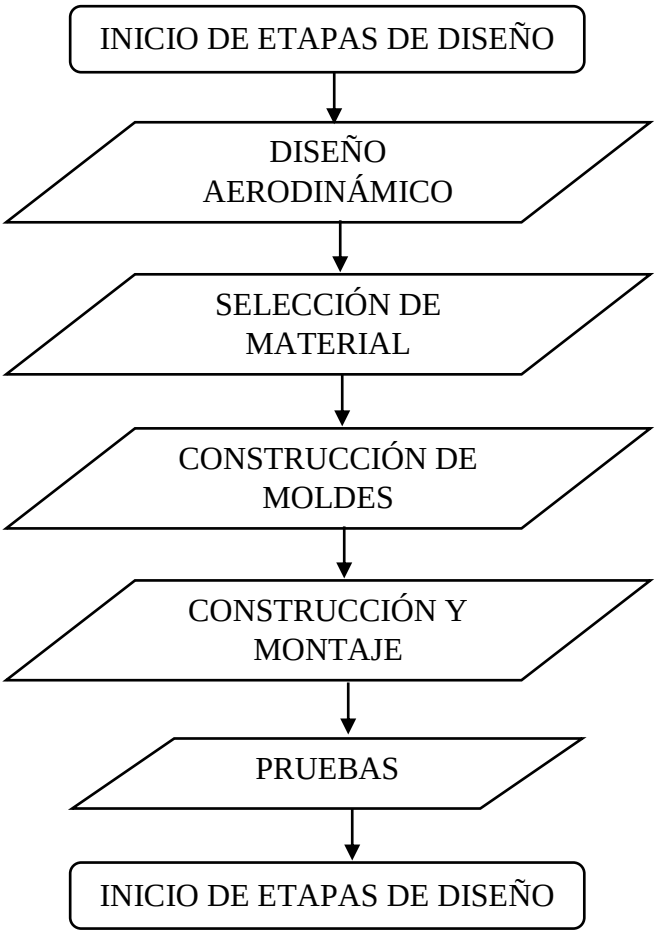


Figura 1.2 Diagrama de flujo de diseño

Fuente: Autores

1.4.1. Etapa de diseño aerodinámico

Luego de tener los diseños CAD (*Computational Aided Manufacturing*), de cada uno de los sistemas establecidos en el punto 1.3. se procede con la etapa de diseño, que consiste en trazar los bosquejos realizados a mano en 2D a un programa de diseño asistido por computador CAD. Aquí es donde se combina todos los criterios de diseño, buscando la geometría adecuada para obtener la mejor aerodinámica, garantizando la seguridad y facilidad de construcción. Desde un primer diseño CAD se realizan las simulaciones CFD (*Computational fluid dynamics*) usando el software de diseño y simulación SOLIDWORKS, a diferentes velocidades con el fin de conocer el comportamiento aerodinámico de la carrocería. Luego de cada simulación se realizan las modificaciones necesarias para mejorar el diseño y funcionalidad en el vehículo.

1.4.2. Etapa de selección de material

La selección de un buen material para manufacturar la carrocería es un factor importante para el monoplaza, ya que este principalmente debe ser lo menos pesado posible para aprovechar la potencia del motor y la reducción del peso total del monoplaza. Para la selección del material a usar se establecen ciertos criterios de selección:

- Densidad
- Resistencia a la tracción
- Fuerza compresiva
- Rigidez
- Resistencia a la fatiga
- Resistencia a la abrasión
- Mecanizado
- Conductividad
- Resistencia al calor
- Compatibilidad de resina
- Costo
- Disponibilidad en el mercado

1.4.3. Etapa de construcción de moldes

Para este punto lo que se busca es utilizar la menor cantidad de recursos para la construcción de los moldes. Además, por la geometría se decide la cantidad de moldes a realizar, así como los materiales a utilizar. Uno de los puntos importantes para esta etapa es realizar un proceso de construcción factible de inicio a fin, para la obtención de las piezas finales.

1.4.4. Etapa final de construcción y montaje

Realizados los moldes, se busca obtener una pieza final de montaje la cual tenga buenas características tanto estéticas como funcionales. Obtenida la pieza final de la carrocería se divide en secciones para montar en el vehículo considerando los diferentes sistemas del monoplaza para seccionar la misma. Una vez seccionada la carrocería la selección de elementos de sujeción es importante para un desmontaje de la misma inmediato.

Con todos los puntos anteriores completos se termina la construcción de la misma con el proceso de pintado.

1.4.5. Etapa de pruebas

Finalizados todos los sistemas del monoplaza, construcción y montaje, lo que se realiza son pruebas dinámicas con el uso de cada uno de los elementos de la carrocería para validar los datos obtenidos en las simulaciones. De esta manera, se comprueba la eficiencia aerodinámica de la carrocería en el monoplaza. Además, se realizan pruebas de hermeticidad en la parte posterior del vehículo simulando la prueba de lluvia.

1.5. Aerodinámica de vehículos de competencia

1.5.1. Introducción a la aerodinámica

1.5.1.1. Resistencia al movimiento de un vehículo R_T

En el desplazamiento de un vehículo existen fuerzas, momentos y cargas que se oponen al movimiento, los mismos afectan al rendimiento, estabilidad y control del vehículo en pista. La resistencia total que se opone al movimiento se expresa en la ecuación 1.1.

$$R_T = R_r + F_{xa} + R_g \qquad \text{Eq. [1.1]}$$

En donde:

R_T es la resistencia total.

R_D es la resistencia a la rodadura.

F_{xa} es la resistencia aerodinámica.

R_g es la resistencia gravitatoria.

En la figura 1.2 se muestra la distribución de los esfuerzos resistentes al movimiento presentes en un vehículo.

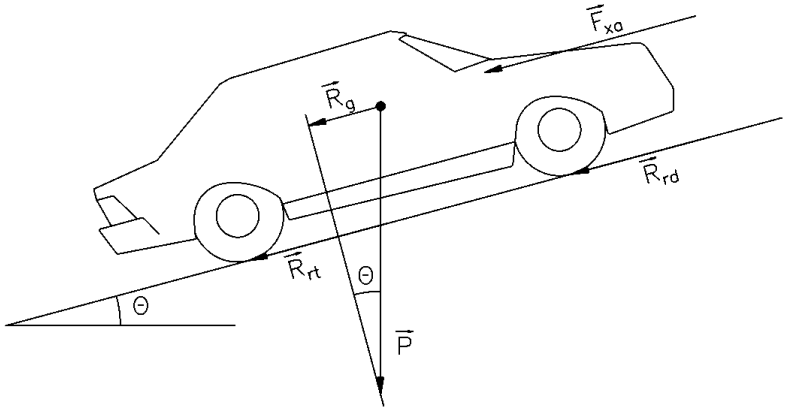


Figura 1.3 Esfuerzos resistentes en un vehículo

Fuente: (Willian F. Milliken, 2015)

Como se observa en la figura 1.2 los esfuerzos que se oponen al movimiento son tres, los cuales la resistencia a la rodadura R_D y la resistencia gravitacional R_g se ven

afectados directamente por el peso e inclinación del vehículo. Mientras que la resistencia aerodinámica F_{xa} es un valor que no se ve afectado por dichos aspectos, a diferencia de la R_D y R_g, esta resistencia o fuerza aerodinámica es un valor que varía dependiendo la velocidad del vehículo.

1.5.1.2. Importancia de la aerodinámica en un vehículo

Para establecer la importancia de la aerodinámica en un vehículo, lo primero es definir la resistencia aerodinámica. Como se habló en el punto anterior es una fuerza que se opone al movimiento del vehículo, por lo que tratar de que esta fuerza sea mínima es un punto de mucho estudio en el diseño de vehículos. La resistencia aerodinámica se genera del choque de las partículas de aire con la superficie del vehículo, a mayor sea la velocidad de desplazamiento el choque entre partículas y la superficie generará mayores fuerzas de fricción, normales y tangenciales produciendo zonas de baja y alta presión de aire. La diferencia de presiones genera las fuerzas aerodinámicas en un vehículo. Por el movimiento de un vehículo se puede afirmar que la zona de mayor presión en un vehículo se encuentra en la parte frontal del mismo, mientras que la zona de menor presión en la parte posterior.

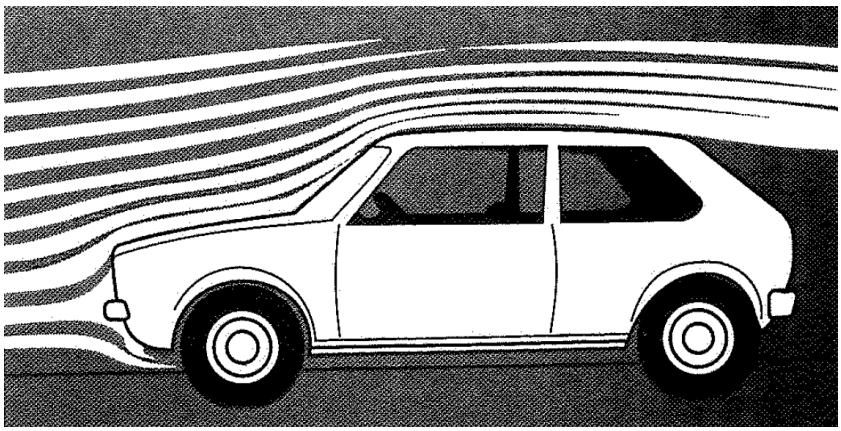


Figura 1.4 Líneas de corriente de aire de un VW Rabbit

Fuente: (Willian F. Milliken, 2015)

En la figura 1.3 se muestra las líneas de corriente de aire sobre un vehículo en vista transversal, en la misma se observa que la primera y mayor zona de contacto con el flujo de aire es la zona frontal del vehículo, por lo que el contacto directo eleva la presión en esta zona. Mientras que en la parte posterior se producen turbulencias

generadas por el movimiento en la zona delantera, como se observa las líneas de corriente de aire pasan sin tener contacto directo en esta zona generando baja presión. Este es el fundamento principal para la generación de fuerzas aerodinámicas que se oponen al movimiento de un vehículo.

El diseño de vehículos actualmente tiene un espacio muy complejo para el estudio del comportamiento aerodinámico de las carrocerías, ya que estas tienen que moverse por el aire separando el fluido para seguir con el trayecto y rellenando espacios de vacíos que generan baja presión. Todo esto se logra mediante una buena geometría de la carrocería

La importancia de una buena aerodinámica principalmente se ve reflejada en el movimiento con menor resistencia, de esta se puede se puede establecer las siguientes ventajas:

- Mayor estabilidad y control del vehículo.
- Al tener una fuerza mínima que se opone al movimiento, el consumo de las baterías o combustible y potencia necesaria para el avance también será menor, esto representa un ahorro de energía.
- Una buena geometría puede dirigir flujos de aire hacia sistemas del vehículo que necesiten refrigeración.
- El manejo de los flujos evita ruidos (silbidos), ocasionados por el rozamiento de partículas de aire.
- La aerodinámica no solo es un estudio frontal, además se produce fuerzas y momentos en todo el vehículo, una de estas fuerzas que se genera es la de sustentación o *Downforce,* que agrega una carga adicional al vehículo a elevadas velocidades sin aumentar peso sobre el mismo. Esto permite que el vehículo tenga mayor agarre en pista manteniendo pegado los neumáticos al suelo, alcanzando mayores velocidades.
- En un vehículo de competencia la aerodinámica juega un papel muy importante para reducir el tiempo por vuelta en una carrera. Una buena aerodinámica puede reducir el tiempo, aumentando el rendimiento del vehículo.

1.5.2. Fundamentos de la aerodinámica

1.5.2.1.Fluido de estudio

Para que una fuerza se genere sobre un cuerpo debe existir un cuerpo más que la produzca, en el caso de la aerodinámica de vehículos la relación y contacto directo entre el vehículo y el aire genera las fuerzas aerodinámicas.

El aire al ser un elemento que posee masa y peso se considera como un cuerpo de obstrucción para el movimiento de un vehículo. Pero controlar el movimiento del mismo sobre el vehículo puede generar ventajas que representan eficiencia aerodinámica.

1.5.2.2. Propiedades del aire

El aire se extiende por toda la atmosfera cubriendo todos los cuerpos de la superficie, pero el mismo no se encuentra de igual manera en todos los lugares. Al ser una mezcla física de gases (78,08 % de nitrógeno, 20,94 % de oxígeno, 0.035 % de dióxido de carbono y 0,93 % de gases inertes), las propiedades cambian dependiendo de la ubicación geográfica debido a factores como la temperatura, altura a nivel del mar incluso la contaminación.

Las propiedades que destacan en el estudio aerodinámico son:

Densidad (∂). - el aire es un gas conformado por partículas que tienen velocidades aleatorias y se mueven por todo el espacio que las contenga, los movimientos de dichas partículas determinan la densidad del aire. La velocidad de las partículas depende de dos factores, la temperatura y la presión, por ello a mayor temperatura las partículas se moverán más rápido la presión disminuirá y la densidad disminuirá, mientras que a menor temperatura, las partículas tenderán a moverse más lento y la presión aumentará así como la densidad.

En el movimiento aerodinámico de un vehículo la densidad es una propiedad del aire muy importante para determinar la fuerza que se generará, la densidad es proporcional a la fuerza que se generé, es decir a mayor densidad mayor fuerza aerodinámica generada.

Viscosidad (*v*). – esta está definida como la pegajosidad del fluido que se genera por la fricción de las capas de un fluido en movimiento con otro cuerpo, esta fricción genera una resistencia al movimiento. La viscosidad del aire se relaciona directamente con la capa límite que se produce en un cuerpo en movimiento.

Presión hidrodinámica. – en un fluido es la presión que se ejerce sobre un cuerpo que se desplaza en su seno. Esta es proporcional a la velocidad, se calcula mediante el principio de Bernoulli que se estudiará más adelante.

1.5.2.3.Flujo de aire y capa límite

El flujo de aire y la capa límite tienen un papel muy importante en la aerodinámica, a estos dos factores se incluye la propiedad viscosa del aire para entender la relación que tienen sobre un cuerpo en movimiento y la generación de resistencia aerodinámica.

El flujo es la trayectoria que un fluido (aire) en movimiento sigue, la velocidad del elemento varía en magnitud y dirección a lo largo de la trayectoria. Se conocen dos clases de flujos de un fluido, flujo laminar y flujo turbulento.

En el flujo laminar, las fuerzas viscosas (rozamiento entre las capas de aire), son predominantes, es decir las capas se desplazan paralela y ordenadamente.

Mientras que en el flujo turbulento las fuerzas que predominan son inerciales (la inercia de las moléculas de aire no puede contrarrestarse por el rozamiento entre capas), en este caso las capas se transmites de manera desordenada. (Francisco Aparicio Izquierdo, 2001)

El punto en el que un flujo pasa de laminar a turbulento se denomina punto de transición.

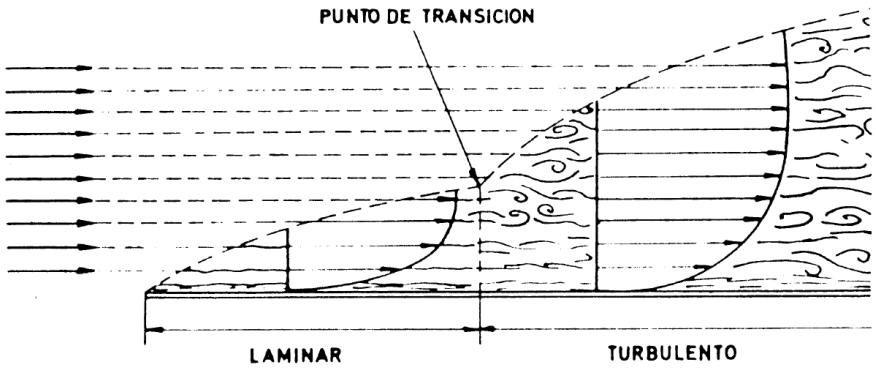


Figura 1.5 Tipos de flujo de aire

Fuente: (Gustavo, 2000)

Para la explicación de la capa límite se muestra en la figura 1.5 un flujo de aire bidimensional sobre un vehículo

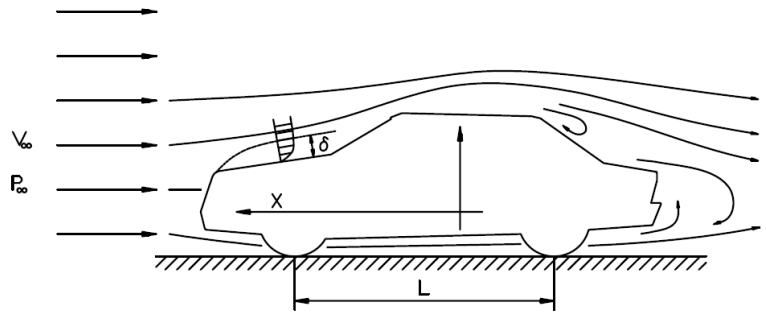


Figura 1.6 Flujo de aire alrededor de un automóvil

Fuente: (Francisco Aparicio Izquierdo, 2001)

Cuando el aire fluye sobre la superficie del automóvil el fluido que se encuentra en contacto con la superficie permanecerá debido a esta y debido a la fricción generada por el deslizamiento entre las capas de aire, las capas más cercanas a la superficie tendrán una velocidad menor a las capas inmediatas superiores, hasta llegar a un punto en el que el aire llega a la velocidad del aire libre. Entonces, la capa limite se define como la zona que existe entre la superficie del automóvil y el punto donde el aire llega a tener la velocidad del aire libre, el espesor de esta capa es de unos pocos milímetros y en esta predomina la viscosidad del aire.

La capa límite se rompe en el momento en el que su espesor aumenta, luego del punto de transición la capa límite desaparece y el flujo es regido por efectos de la viscosidad del aire.

1.5.2.4.Resistencia al avance

Como se mencionó anteriormente la resistencia al avance es generada por la producción de fuerzas en la superficie de contacto del fluido con el cuerpo. En el flujo externo de aire cuando no existe separación entre el fluido y la superficie la capa límite es regida por la viscosidad del fluido y la presión sobre se encuentra determinada por el fluido no viscoso. Por esta razón las fuerzas que producen la resistencia aerodinámica es la resultante de la suma de dos vectores de fuerzas generadas las cuales son:

Fuerza generada por el rozamiento. – esta fuerza es la que se produce por la viscosidad del fluido en la capa límite, generando una tensión tangencial sobre el cuerpo.

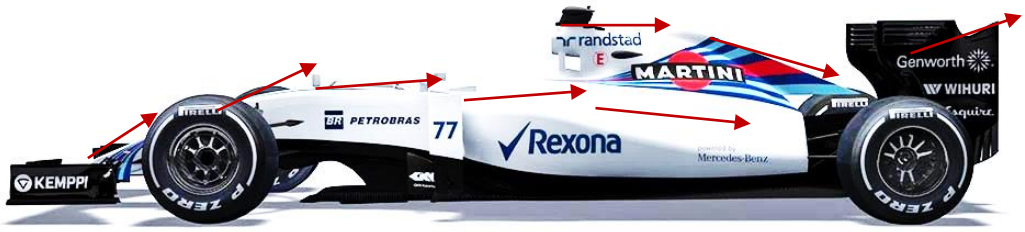


Figura 1.7 Fuerza generada por el rozamiento del fluido en la superficie de contacto

Fuente: Autores

Fuerza generada por la presión. – la distribución de presión tanto para el flujo laminar como el turbulento es un factor de mucha importancia en la capa límite, cuando la presión aumenta en dirección al flujo la fuerza de rozamiento por la viscosidad también aumenta, y mientas se va alejando a esta se puede producir incluso la inversión de flujo. El aumento y disminución de presión sobre todo el cuerpo crea diferencias que generan efectos de succión, de esta manera poniendo resistencia al avance. (Francisco Aparicio Izquierdo, 2001)

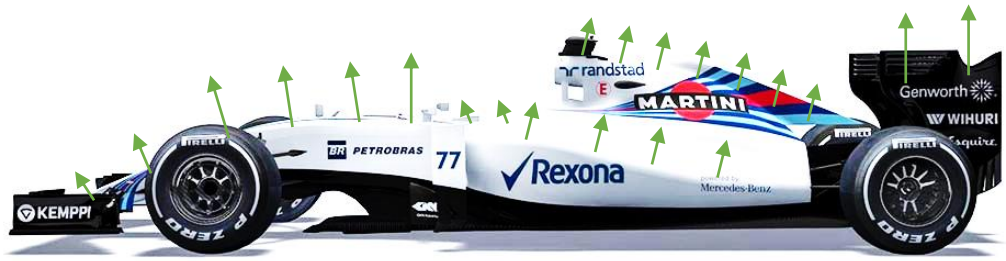


Figura 1.8 Resistencia de presión sobre la superficie

Fuente: Autores.

La resultante entre estas dos fuerzas genera la fuerza de resistencia al avance del vehículo.

Figura 1.9 Fuerza resultante producida por la resistencia de rozamiento y presión

Fuente: Autores.

1.5.2.5.Principio de Bernoulli

El principio de Bernoulli describe las condiciones del aire existentes fuera de la capa límite en el flujo de corriente libre. Con este principio se puede predecir presiones a lo largo de un cuerpo, además con el conocimiento del principio se puede generar geometrías superficiales que manejen la presión que se desea. Para el análisis de la ecuación de Bernoulli no se considera las resistencias al avance que se producen por las fuerzas tangenciales en la capa límite.

El principio de Bernoulli relaciona mediante una ecuación las variaciones de la velocidad y la presión en la corriente de aire.

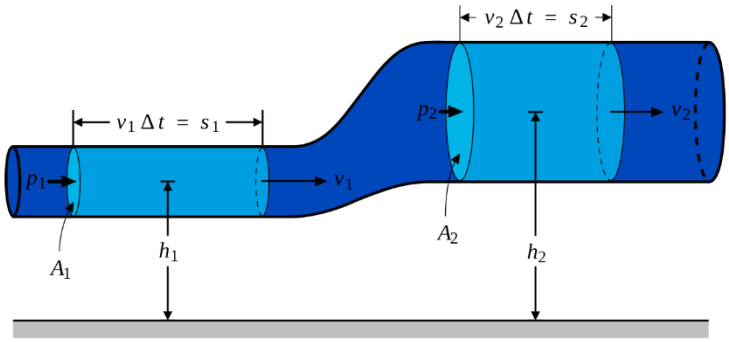


Figura 1.10 Túnel de Bernoulli.

Fuente: (Torres, 2011)

En el tubo el fluido se considera incomprensible, sin rozamiento y aislado, es decir, no existe algún flujo a través de los límites, ya que por todo el tubo la energía debe permanecer constante en todo el trayecto en este. Se dice que la energía puede aparecer en tres formas diferentes:

Energía cinética. – esta es dependiente de la velocidad del fluido y su masa viene dado por la siguiente ecuación.

$$EC = \frac{1}{2}mv^2 \qquad \text{Eq. [1.2]}$$

Donde:

m es la masa del fluido

v es la velocidad del fluido

Energía potencial. – este tipo de energía es la que el fluido tiene dependiendo de la altura en la que se encuentre dentro del tubo, esta energía se desprecia para el estudio en vehículos.

Energía de presión. – esta energía representa el trabajo que se requiere para mantener el volumen en contra de la presión externa.

$$EP = p * vol \qquad \text{Eq. [1.3]}$$

Donde:

p es la presión externa

vol es el volumen del fluido

La ecuación de Bernoulli está dada por los tres tipos de energías, en donde los valores de entrada deben ser iguales a los valores de salida. Esto se representa en la ecuación siguiente:

$$P_1 * vol + m * g * h_1 + \frac{m*v^2}{2} = P_2 * vol + m * g * h_2 + \frac{m*v^2}{2} \qquad \text{Eq. [1.4]}$$

Donde:

$P_{1\text{-}2}$ es la presión inicial y final del fluido.

g es la gravedad.

$h_{1\text{-}2}$ es la altura que se encuentra el fluido dentro del campo de estudio.

En el trabajo con fluidos es conveniente trabajar en unidades de volumen, por lo tanto, a la Eq. (1.4) se divide por el volumen y se obtiene la energía Total:

$$P_1 + \partial * g * h_1 + \frac{\partial*v^2}{2} = P_2 + \partial * g * h_2 + \frac{\partial*v^2}{2} \qquad \text{Eq. [1.5]}$$

Como se mencionó anteriormente en el caso de análisis de vehículos se desprecia la energía potencial por lo tanto la Éq. (1.5) se reduce a:

$$P_1 + \frac{\partial*v^2}{2} = P_2 + \frac{\partial*v^2}{2} \qquad \text{Eq. [1.6]}$$

Como se observa en la Eq. (1.6) la energía es una constante en todo el trayecto de la corriente del tubo por lo tanto la ecuación de Bernoulli se expresa de la siguiente forma:

$$P + \frac{\partial*v^2}{2} = H \qquad \text{Eq. [1.7]}$$

Donde:

P es la presión atmosférica.

H es una constante en el movimiento del fluido dependiente de la velocidad.

A base de la Eq. (1.7) se diseñan los elementos aerodinámicos, ya que como se observa al tener una Energía constante, si la presión es menor la velocidad necesariamente tendrá que ser mayor. Este principio se puede observar en la siguiente figura:

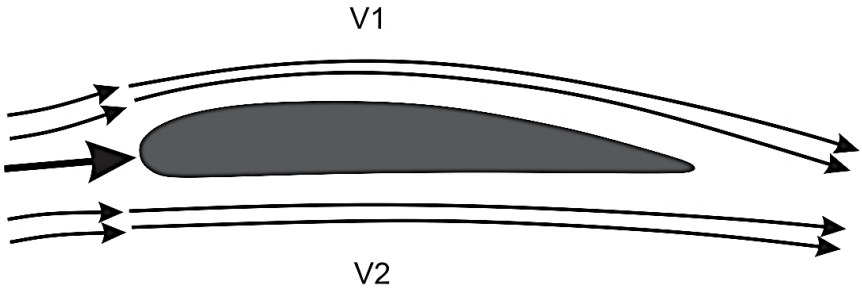


Figura 1.11 Líneas de flujo a través de un perfil

Fuente: Autores

Como se observa en la figura 1.7 la corriente de aire al llegar al perfil se divide en dos por la geometría, el flujo por la parte superior tiene un aumento de velocidad debido a que tiene mayor distancia de recorrido por lo tanto su presión disminuye, mientras que en la parte inferior la velocidad se disminuye para de esta manera aumentar la presión y generar succión por la diferencia de presiones, creando una fuerza hacia arriba del perfil.

1.5.2.6.Presión en el punto de estancamiento.

El punto de estancamiento se forma cuando una corriente de aire choca con un cuerpo, como en la figura 1.8 se puede observar en un perfil alar. En la sección donde la corriente de aire se divide en dos direcciones diferentes se forma una región de estancamiento de aire.

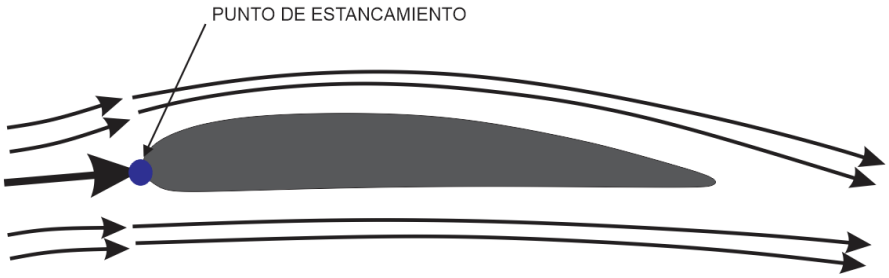


Figura 1.12 Punto de estancamiento

Fuente: Autores

La presión en el punto de estancamiento es la presión máxima que se generará sobre el cuerpo, esta se calcula mediante la Eq. (1.7), en donde *P* es la presión estática o

atmosférica y a ella se suma la presión dinámica generada por la aceleración del fluido.

1.5.2.7.Distribución de la presión

Por el principio de Bernoulli se sabe que la presión dinámica aumenta o disminuye la presión estática, en la figura 1.7 se mostró que cuando una corriente de aire toma diferentes direcciones la velocidad en cada uno de sus trayectos será diferente. De igual manera ocurre con la variación en la presión, en flujo de aire con mayor velocidad generará una disminución de aire, mientras que el flujo con menor velocidad generará un aumento en la presión, esta distribución de presión se muestra en la siguiente figura.

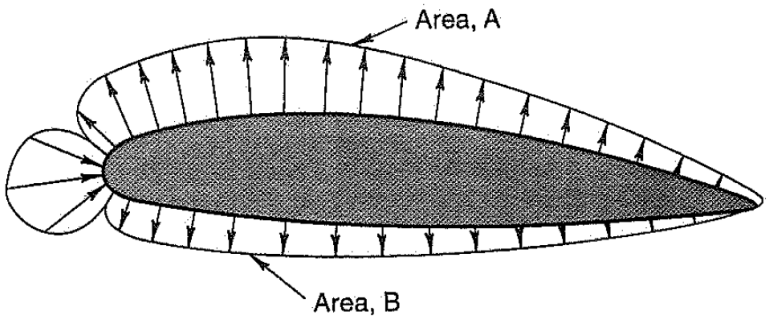


Figura 1.13 Distribución de presión a lo largo de un perfil

Fuente: (Willian F. Milliken, 2015)

Las líneas en la figura 1.9 representa los vectores de presión alrededor del perfil, sobre estos se generan un área A y B, para este caso el área A es mayor al área B lo que indica que la diferencia de presión genera una succión hacia arriba produciendo que el cuerpo ascienda.

1.5.2.8.Kammback

En el caso para la fuerza de arrastre se aplica así mismo el principio de Bernoulli que para la sustentabilidad, en este caso la zona de mayor presión en la frontal donde se encuentra el punto de estancamiento, debido a la geometría de los cuerpos la menor presión se genera en la zona posterior del vehículo debido al vacío que en este se genera. De esta manera se produce la succión y resistencia al avance de un cuerpo.

En la zona de baja presión existe una región denominada *Kammback* en la que teóricamente se produce una burbuja de aire que no se mueve. Los cuerpos con una geometría que produzca un *kammback* reducen la resistencia al avance.

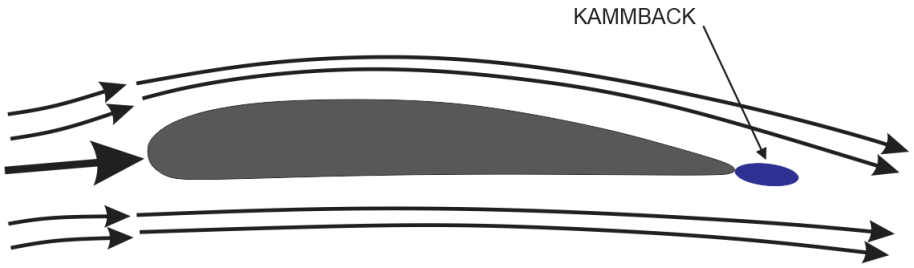


Figura 1.14 Generación de *Kammback* en un perfil incompleto

Fuente: Autores.

Para el diseño de vehículos se considera utilizar la forma *Kammback,* en la siguiente figura se muestra algunos ejemplos.

Figura 1.15 *Kambmback* utilizado para vehículos de turismo

Fuente: (Matt, 2011)

1.5.2.9.Área de un vehículo para el estudio aerodinámico

El área de un vehículo para el análisis de fuerzas, momentos y coeficientes aerodinámicos, es un valor importante debido a que tiene una relación directamente e inversamente proporcional para dichos valores. Este valor no es el área total de la superficie de contacto del aire con el vehículo, el área que se considera para el análisis es una proyección de todo el vehículo hacia el plano bidimensional del eje de

estudio, para comprender mejor se muestra un ejemplo de la proyección de un vehículo en la figura 1.12

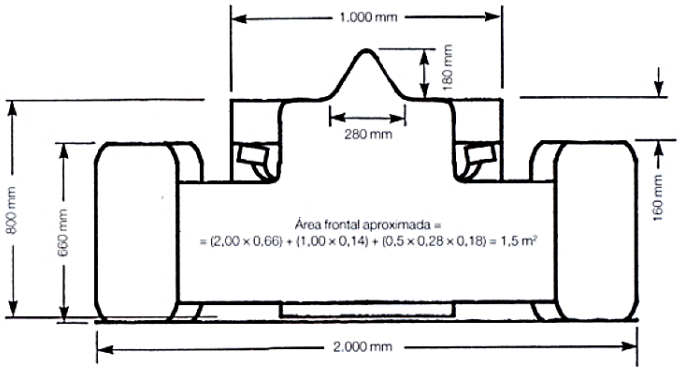


Figura 1.16 Proyección Frontal de un vehículo de competencia tipo fórmula

Fuente: (Houghton & Carpenter, 2003)

1.5.2.10. Fuerzas y momentos aerodinámicos

Luego de haber estudiado como se produce la resistencia aerodinámica por influencia de la diferencia de presiones que se generan en un cuerpo, diferencia de velocidades del viento a lo largo del cuerpo, se estudia las fuerzas que se producen sobre el mismo, estás están divididas por el número de ejes del plano cartesiano. Además de las fuerzas que se generan, el cuerpo al tener una longitud *L* a su centro de gravedad en sus tres ejes por la acción de las fuerzas se generan momentos.

Antes de analizar los vectores de fuerza y momento, se establece el sistema de coordenadas en el vehículo, los mismos se observan en la figura 1.11

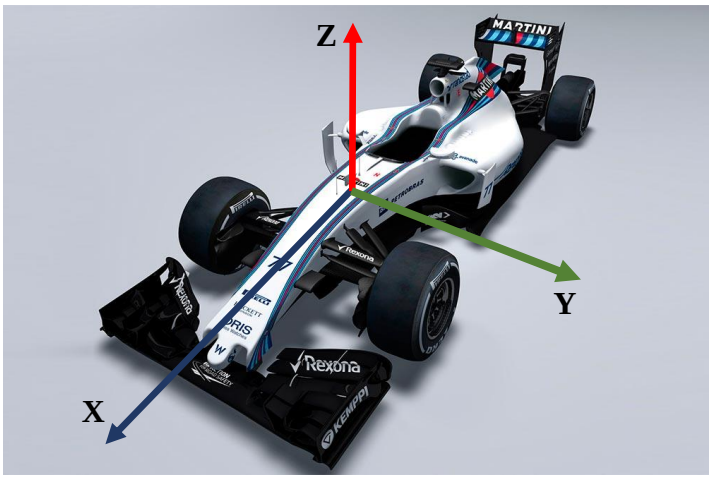


Figura 1.17 Sistema de coordenadas para vehículos SAE

Fuente: Autores.

Las fuerzas y momentos que se generan en un vehículo son:

Fuerza de arrastre. –se genera a lo largo del eje x, esta fuerza es la que tiene un grado de importancia elevado debido a que genera la resistencia al avance del vehículo. La misma se puede calcular mediante la siguiente ecuación.

$$F_{xa} = \frac{1}{2}\partial A C_x v^2 \qquad \text{Eq. [1.8]}$$

Donde

∂ es la densidad del aire.

C_x es el coeficiente aerodinámico de arrastre.

v es la velocidad del viento o del vehículo.

La resistencia al avance es uno de los valores que más afectado se ve, debido a factores como:

- Geometría en la parte frontal.
- Neumáticos.
- Spoliers delanteros y traseros.
- Cabina de conductor.
- Parabrisas.
- Techo.

- Aperturas en la separación de piezas.

El movimiento que genera esta fuerza por la distancia al centro de gravedad se denomina momento de vuelco y viene dado por la siguiente ecuación.

$$M_{xa} = \frac{1}{2}\partial ALC_{Mx}v^2 \qquad \text{Eq. [1.9]}$$

Donde

L es la batalla o distancia entre ejes del vehículo.

Fuerza de sustentación. – en el diseño aerodinámico controlar esta fuerza es de suma importancia debido a que genera una carga adicional sobre el vehículo cuando genera una fuerza negativa, esto permite una mayor adherencia en pista, permitiendo aumentar la velocidad en rectas y curvas. Esta se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$F_{za} = \frac{1}{2}\partial AC_z v^2 \qquad \text{Eq. [1.10]}$$

La fuerza de sustentación o *Downforce* negativo, se puede mejorar para aumentar la carga aerodinámica mediante el uso de dispositivos aerodinámicos como:

- Spoilers delanteros y traseros.
- Fondo plano.
- Difusores.

Esta fuerza por la distancia al centro de gravedad genera un momento de guiñada, este se expresa mediante:

$$M_{za} = \frac{1}{2}\partial ALC_{Mz}v^2 \qquad \text{Eq. [1.11]}$$

Fuerza lateral. – Esta fuerza afecta directamente a camiones y vehículos comerciales por la geometría, se produce en mayor magnitud cuando existen vientos laterales, la fuerza y momento vienen dadas por las siguientes ecuaciones

$$F_{ya} = \frac{1}{2}\partial AC_y v^2 \qquad \text{Eq. [1.12]}$$

$$M_{ya} = \frac{1}{2}\partial ALC_{My}v^2 \qquad \text{Eq. [1.13]}$$

Los vectores de fuerzas y momentos explicados anteriormente se pueden visualizar en la siguiente figura.

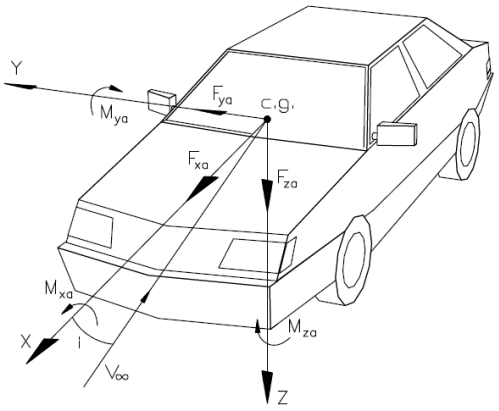


Figura 1.18 Vectores de Fuerzas y Momentos aerodinámicos

Fuente: (Francisco Aparicio Izquierdo, 2001)

Las fuerzas y momentos son esenciales para el cálculo de la eficiencia aerodinámica debido a que estos indican la resistencia al avance del vehículo. Estos datos pueden ser calculados mediante las ecuaciones mencionadas anteriormente en este punto, pero para el cálculo de estas se necesita de los coeficientes aerodinámicos que son valores que no se obtienen de manera sencilla más que con pruebas experimentales. Sin la disponibilidad de un túnel de viento, la manera más sencilla es determinar las fuerzas y momentos mediante simulaciones CFD.

1.5.2.11. Coeficientes aerodinámicos.

Los coeficientes aerodinámicos son números adimensionales en el campo de aerodinámica de los vectores de las fuerzas y momentos que un cuerpo sufre al entrar en contacto con un fluido en movimiento. Estos coeficientes buscan reducir el estudio aerodinámico de un cuerpo en un solo número para tener una idea más comprensible de la resistencia aerodinámica al avance.

Los coeficientes que más se consideran en el estudio de la aerodinámica de vehículos son los de arrastre y sustentación, en un vehículo de competencia estos tienen una muy alta influencia. En el Anexo II se muestran los valores de coeficientes aerodinámicos de un monoplaza con diferentes configuraciones aerodinámicos. (Houghton & Carpenter, 2003)

Como se observa en el Anexo II valores de coeficientes aerodinámicos en un vehículo pueden variar dependiendo de la configuración de elementos

aerodinámicos. Aunque el coeficiente aerodinámico aumenta al diseñar un vehículo con elementos aerodinámicos el rendimiento de, vehículo también aumentará en pista, lo más conveniente sería un vehículo que se desplace a velocidades elevadas aprovechando la carga aerodinámica que en este se genera. El uso de dispositivos aerodinámicos que mejores la eficiencia del vehículo se ve limitado principalmente por factores como el peso total que estos agregarían, esto es solucionable mediante el uso de materiales livianos y resistentes para la construcción de los mismos.

Como se puede observar los coeficientes aerodinámicos son directamente proporcional a diferentes factores en el diseño. Para el cálculo de los coeficientes aerodinámicos se tiene las siguientes ecuaciones:

Coeficiente de arrastre.

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\partial A v^2} \qquad \text{Eq. [1.14]}$$

Coeficiente de sustentación.

$$C_z = \frac{F_z}{\frac{1}{2}\partial A v^2} \qquad \text{Eq. [1.15]}$$

1.5.2.12. Potencia necesaria para vencer la resistencia aerodinámica

Luego de conocer los valores aerodinámicos de un cuerpo, fuerzas, coeficientes y momentos, además podemos calcular el valor de la potencia necesaria que se utilizaría para vencer esta fuerza y continuar el avance del cuerpo. Lo más conveniente sería que la potencia sea mínima por lo esta es directamente proporcional al coeficiente aerodinámico. Este valor se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$P = \frac{1}{2}\partial C_x A v^3 \qquad \text{Eq. [1.20]}$$

1.5.3. Análisis computacional de fluidos CFD

En el estudio aerodinámico de un vehículo, lo más apropiado es verificar la eficiencia de la carrocería en un túnel de viento, en el cual se puede analizar a condiciones reales el comportamiento aerodinámico. Pero la disponibilidad de un

túnel de viento es un factor muy importante en términos económicos, debido a que realizar un análisis representaría un elevado costo, además de que estos no están disponibles dentro de la industria automotriz en el país.

En el caso de tener las desventajas de disponibilidad y costo, existe un método de análisis computacional mediante simulaciones que nos ayuda a tener una idea del comportamiento aerodinámico del monoplaza. En este la principal ventaja contra el análisis de túnel de viento es que si es necesario realizar algún cambio en la geometría del monoplaza representa menor tiempo y menor costo. Mientras que la desventaja es que los valores obtenidos en la simulación no son 100 % exactos, pero se acercan a estos.

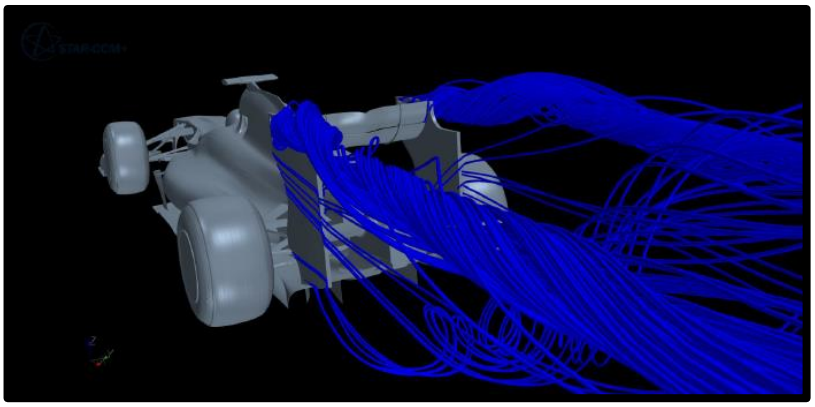


Figura 1.19 Simulación CFD de un Fórmula 1

Fuente: (Mouffouk, 2013)

En el análisis computacional CFD, el mismo experimento de un túnel de viento puede llevarse a cabo en la forma de una simulación por computadora. Aunque las ecuaciones que gobiernan estos cálculos se han entendido desde la década de 1930, son complejos de resolver y requieren el tipo de poder de cómputo que solo se ha vuelto realmente práctico en los últimos 15 años. (Mouffouk, 2013)

1.5.3.1. El proceso de la dinámica de fluidos computacional

La discretización es aproximación de una variable continua en un número finito de puntos.

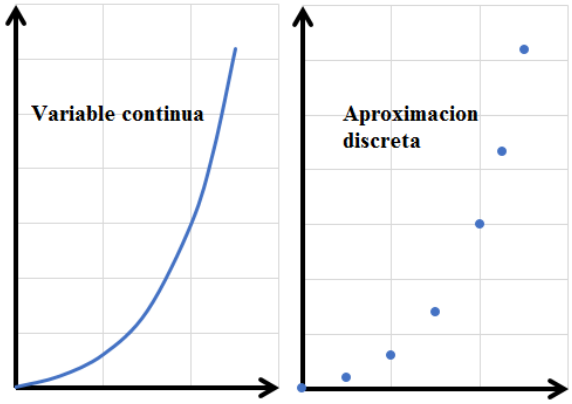


Figura 1.20 Discretización de variables

Fuente: (Sobachkin, 2014)

Los principales elementos del análisis computacional son:

- Discretización del flujo continuo: las variables se acercan por un número finito de valores en puntos (nodos).
- Las ecuaciones de movimiento también se discretizan.

Ecuaciones Integrales (continuas) → Ecuaciones algebraicas (discretas)

- Se obtienen valores para cada nodo mediante la resolución del sistema de ecuaciones.

1.5.3.2.Etapas de un análisis CFD

Un análisis computacional CFD posee las siguientes etapas:

Cálculos.

- Formular el problema y plantear las ecuaciones.
- Establecer las condiciones del análisis.
- Generación del mallado.

Solución de las ecuaciones.

- Este es el punto más importante del análisis ya que se resuelven las ecuaciones que gobiernan el problema para determinas las variables en cada nodo de análisis.

Análisis de resultados.

- Los resultados obtenidos corresponden al valor de cada uno de los nodos analizados en cada punto de la malla. Uno de los puntos importantes del análisis de resultados es la visualización gráfica de las variables para la comprensión de los datos obtenidos.

1.5.3.3.Reparación de superficies para el análisis.

Antes del mallado es importante la reparación de superficies del modelo. El CAD importado tiene demasiados detalles por lo cual la generación de imperfecciones tiene una alta probabilidad. (Mouffouk, 2013)

Los posibles errores de superficie son:

- El volumen no está cerrado.
- Las superficies de superposición entre sí.
- Las superficies se cruzan entre sí.
- El volumen no es múltiple

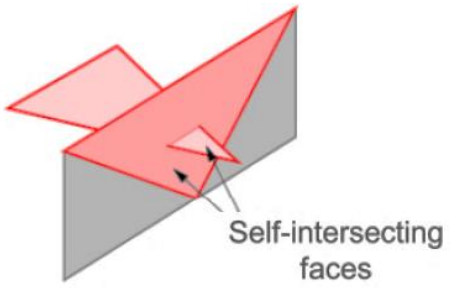


Figura 1.21 Problema en la superficie de un cuerpo

Fuente: (Mouffouk, 2013)

1.5.3.4.Creación del dominio computacional

Luego de crear superficies limpias completas en todo el cuerpo, se puede generar el dominio computacional. Las dimensiones de este dominio son demasiado importantes, los límites debe configurarse de manera tal que la entrada, la salida y los lados estén alejados del modelo, para asegurarse de que el flujo de aire cerca de los limites no influya en el flujo de aire sobre el cuerpo, y al mismo tiempo, se debe respetar las capacidades computacionales (hardware) debido al tiempo de resolución y desgaste computacional. (Mouffouk, 2013)

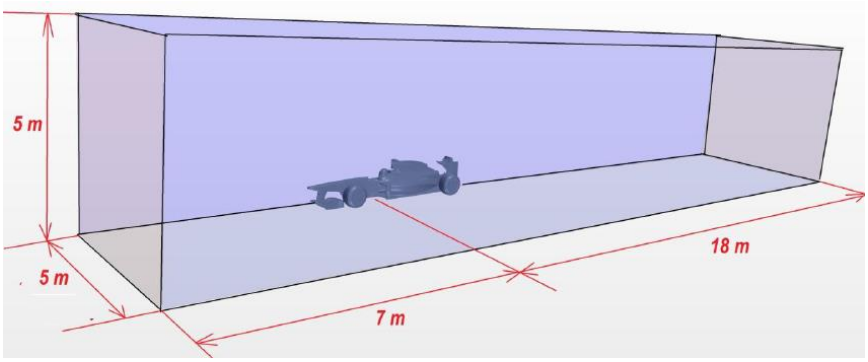


Figura 1.22 Ejemplo de un domino computacional.

Fuente: (Mouffouk, 2013)

1.5.3.5.Generación de la malla

Para ilustrar la importancia de la generación de la malla, vale la pena mencionar que hasta el 70% del tiempo dedicado a una simulación CFD se dedica a crear una buena rejilla, la calidad de la malla a una gran medida determina la precisión y la estabilidad de la resolución computacional. (Mouffouk, 2013)

1.5.3.6.Tipo de rejilla

En general, hay cuatro formas de discretizar un dominio tridimensional:

- Rejilla que consiste en células hexaedros estructurado.
- Cuadrícula no estructurada que se construye a partir de células de tetraedros.
- Rejilla prismática que resulta de la extrusión de una rejilla no estructurada de dos dimensiones en espacio.
- Rejilla híbrida que es una combinación de 1 y 2 y utiliza células tetraédricas y piramidales.

Y, para resumir, qué tipo de diseño de cuadrícula elegir depende de varios factores:

- Facilidad de generación.
- Los recursos informáticos disponibles.
- Se requiere una precisión numérica.
- Se requiere flexibilidad para cambiar la resolución de células (local).
- Complejidad del modelo

1.6. Aspectos de diseño y construcción de carrocerías de vehículos de competencia tipo Formula

Primeramente, para el diseño de una carrocería de un vehículo de competencia tipo Fórmula es necesario establecer la disposición y configuración aerodinámica que se deseará tener en el vehículo ya construido. Dependiendo de la configuración deseada se obtendrá los valores aerodinámicos que se crean óptimos para el vehículo. Estas configuraciones se pueden observar en la tabla del Anexo II.

Para la selección de la configuración deseada existen parámetros que limitan el uso de cada una, estos parámetros son:

- Tipo de vehículo.
- Peso total de la carrocería.
- Disponibilidad de recursos y procesos de manufactura.
- Materiales de construcción.
- Influencia en la competencia.

Además del tipo de configuración a seleccionar, los criterios de diseño mencionados en el punto 1.2.1. Son los que dominan la fase total de diseño.

1.6.1. Configuración del vehículo para una competencia tipo Fórmula

Existen dos tipos de configuraciones para el diseño de vehículos tipo fórmula, de tipo tubular y monocasco.

Tipo tubular. – para este caso la estructura del chasis y la carrocería son dos sistemas separados, en donde la carrocería cumple la función aerodinámica y estética y el chasis la resistencia estructural.

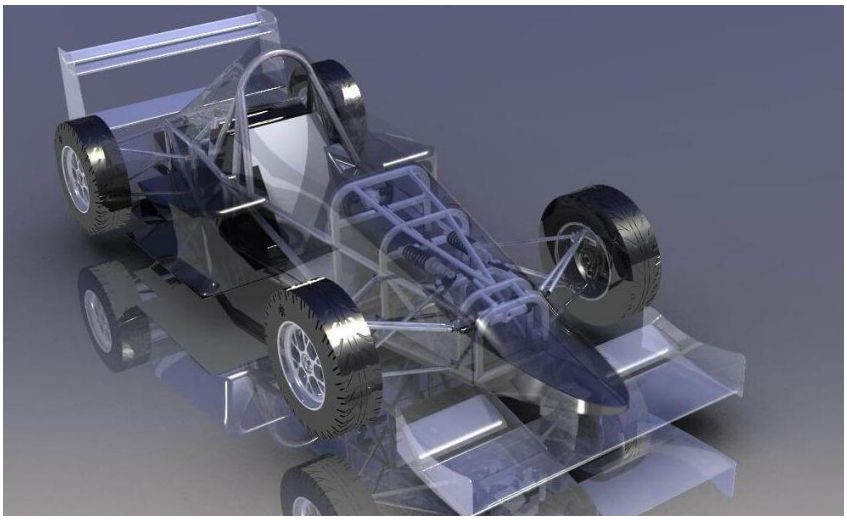


Figura 1.23 Configuración tubular

Fuente: (Grupocarman, 2014)

Tipo Monocasco. – esta configuración es mucho más compleja, debido a que la carrocería y el chasis forman un solo sistema.

Figura 1.24 Configuración monocasco

Fuente: (UMSAE, 2010)

El principal aspecto para la selección del tipo de configuración a utilizar es la disponibilidad de recursos, materiales y procesos de manufactura del medio.

1.6.2. División de la carrocería

Al ser un sistema que recubre la mayor parte del vehículo incluido el piloto, la división de la misma es muy importante, debido a que no puede ser totalmente una pieza que se extrae y se coloca ya que las divisiones se realizan de manera en la que influyan al desempeño del vehículo. Se clasifica la división de la carrocería por dos categorías: influencia en el vehículo y partes de la carrocería.

1.6.2.1.División por la influencia en el vehículo

Para esta categoría se considera la influencia que las partes de la carrocería tendrían en el vehículo si estas están o no presentes en el mismo. Por esta razón se tiene las siguientes divisiones:

Elementos extraíbles. – son las partes que necesariamente en algún momento deben ser removidas del vehículo debido a revisiones como de los sistemas mecánicos. Estos pueden ser la nariz, los pontones, tapa posterior, etc.

Figura 1.25 Nariz extraída de un Formula uno

Fuente: (Clipset, 2015)

Elementos fijos. – Son los elementos que debido a que no representan un inconveniente si permanecen fijos, cumplen con otras funciones tales como seguridad, en los monoplazas de Fórmula uno un elemento fijo se denomina la célula de supervivencia, esta parte es la que protege de colisiones al piloto.

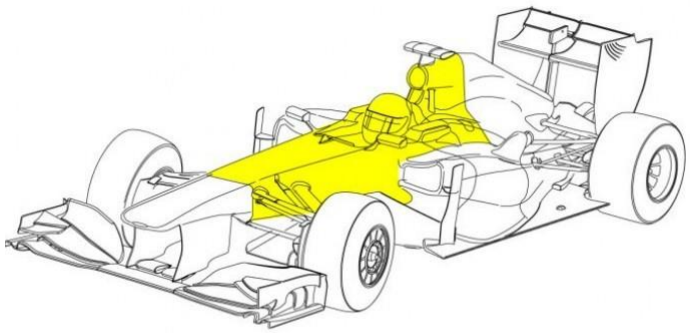


Figura 1.26 Célula de supervivencia de un Formula uno

Fuente: (Corsaystradale, 2013)

1.6.2.2.División por partes de la carrocería

Para esta división se considera las partes en las que un vehículo tipo formula está constituido, debido a que la evolución de los mismos cada año se ve en el aumento de nuevos componentes se mencionan a continuación los más importantes.

Nariz. – es el primer elemento del vehículo que entra en contacto con el aire en el desplazamiento, es un elemento muy importante porque puede distribuir flujos de aire, en este se pueden unir alerones delanteros. Esto se puede apreciar en la figura 1.26

Célula de supervivencia. – en el caso de monocascos, esta se realiza mediante procesos y materiales altamente resistentes debido a que deben ser seguros para proteger al conductor en caso de colisión. Como se observa en la figura 1.27, es una cabina completa que cubre al conductor forma parte de la estructura y carrocería del monoplaza. En el caso de configuraciones tubulares, esta únicamente esta formada por paneles laterales y frontales que recubren con una superficie hasta los anclajes de suspensión.

Pontones. – son estructuras laterales y simétricas en el vehículo, ofrece una seguridad ante impactos y además en estos se pueden ubicar los radiadores para la refrigeración, para que con un flujo de aire adicional estos enfríen el motor, baterías.

En la aerodinámica influyen directamente en la eficiencia de la parte posterior, estos pueden unirse en la parte posterior y formar la cubierta posterior.

Figura 1.27 Pontones de un vehículo fórmula uno.

Fuente. (Santos, 2016)

Componentes aerodinámicos. – estos están generalizados en una sola parte del vehículo ya que son ilimitados y varían en cada diseño. Se denomina componentes aerodinámicos a los elementos que ayudan al desempeño y eficiencia aerodinámica del vehículo en pista. Algunos de estos componentes tienen limitaciones en forma y ubicación dependiendo del reglamento de la competencia, mientras que otro no y pueden ser diseñados en zonas del vehículo que simplemente no representen inconveniente en la seguridad del conductor. Algunos de estos componentes aerodinámicos son:

- Alerones frontales y posteriores.
- Aletas de tiburón.
- Deflectores.
- Difusores.
- Fondo plano.
- Generadores de vórtices.

2. DISEÑO DEL MODELO Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO

En este capítulo se detallará el proceso de diseño y simulaciones CFD de los modelos de la carrocería, hasta llegar al diseño final que se utilizará para el proceso de manufactura. Primeramente, se conceptualiza el diseño para la selección de la configuración aerodinámica bajo parámetros que limitan el mismo. La división de las secciones de la carrocería para el modelado es muy importante ya que a diferencia de la pieza construida esta formará un solo sólido con secciones diferenciadas. Para la división de secciones se considera y urge la necesidad de los modelos de los diferentes subsistemas del vehículo para conocer la distribución de espacios en el vehículo. Posteriormente considerando los criterios de diseño, reglamentación, división de secciones junto con los subsistemas del vehículo se bosqueja el primer modelo para tener una base de lo que se desea obtener, seguido de diseños, simulaciones, mejoras y selección de la pieza final a construir.

2.1. Selección de la configuración aerodinámica

En la sección 1.5.2.11. se habla acerca de la importancia de la configuración aerodinámica para obtener coeficientes aerodinámicos eficientes de acuerdo de cada estructura de la carrocería. Cada una de las diferentes configuraciones que se muestran en la tabla del Anexo II se utilizan dependiendo de muchos factores y características del vehículo entre la característica más importante el peso final del vehículo que se desea obtener para aprovechar al máximo la potencia del motor y ahorro de las baterías.

Los diferentes tipos de configuración aerodinámica tienen diferentes objetivos en pista, estos son:

- Reducción del arrastre.
- Aumento de sustentación.
- Aumento de adherencia a la calzada.
- Aumento de la velocidad en pista.

En una competencia Formula SAE la selección de la configuración aerodinámica es muy limitada por el peso del vehículo y velocidades a alcanzar en pista. Además,

para la selección de los elementos aerodinámicos a utilizar se considera la disponibilidad de materiales ligeros y resistentes para el diseño total del vehículo como procesos de manufactura y costos finales para la construcción que no representen un elevado costo.

El primer análisis que se realiza es una comparativa de la información de vehículos de equipos que han alcanzado los 10 primeros puestos durante la competencia. Los vehículos inicialmente fueron elaborados de fibra de vidrio y ninguno de los mismos fue diseñado con configuraciones aerodinámicas complejas que son el uso de alerones incluido a ello se observa que el peso de los mismos era inicialmente superior a los 250 kg. Los vehículos siguientes fueron desarrollados y evolucionados tanto en materiales y en estructura que pasaron del uso de fibra vidrio a fibra de carbono; carrocería reduciendo en cada vehículo más el peso y favoreciendo al uso de elementos aerodinámicos. En la siguiente tabla se muestran algunos equipos con la descripción de sus monoplazas con y sin elementos aerodinámicos.

Tabla 2.1 Descripción de los monoplazas de algunos equipos

Fuente: Autores

REENTEAM UNI. STUTTGART	
	Vehículos: 12 - Primer modelo sin alerones 282 Kg Fibra de vidrio tubular - Primer modelo con alerones 183 Kg monocasco de fibra de carbono
UNIVERSIDAD DE SEIGEN	
	Vehículos: 7 - Primer modelo sin alerones 279 Kg Fibra de vidrio tubular - Primer modelo con alerones 210 Kg monocasco de fibra de carbono

KA-RACEING ALEMANIA	
	Vehículos: 15 - Primer modelo sin alerones 275 Kg Fibra de vidrio tubular - Primer modelo con alerones 195 Kg monocasco de fibra de carbono

Uno de los parámetros más importantes para la selección de la configuración aerodinámica como se puede ver en le tabla 2.1 es el peso total del monoplaza. En una competencia tipo Formula SAE debido a la reglamentación en potencia total del vehículo, el peso se ve limitado a valores que no afecten al rendimiento. Por ello conocer o estimar el peso al cual se desea llegar es muy importante para el diseño.

Para el diseño del vehículo eléctrico EB. 2017 de la Universidad Politécnica salesiana se estima un peso de 300 Kg con conductor como referencia para el diseño y el que se desea alcanzar.

El primer monoplaza de la Universidad Politécnica Salesiana Bosco 1.0 a combustión da una referencia a la configuración que se usó y el peso que se alcanzó. El diseño es un modelo tubular con carrocería de fibra de vidrio, dividido en: nariz, trompa, paneles laterales, pontones y fondo plano. El peso del monoplaza es de 250 Kg sin conductor, con un conductor de 70 Kg el peso aumenta a los 320 Kg en pista.

Figura 2.1 Bosco 1.0 de la Universidad Politécnica Salesiana

Fuente: Autores

Luego de la experiencia del primer monoplaza, el análisis de los diferentes equipos y el peso estimado se selecciona como configuración aerodinámica base únicamente el desarrollo de una carrocería sin el uso de dispositivos aerodinámicos, esta configuración es la primera en la tabla del Anexo II que tiene como características y valores teóricos de:

- Coeficiente de arrastre 0.63
- Coeficiente de sustentación 0.29

2.1.1. Descripción de las secciones de la carrocería.

Para el diseño de la carrocería se secciona en piezas de modelado debido que la simulación se realiza de un solo sólido. Seleccionada la configuración aerodinámica se divide la carrocería en dos piezas de modelado, la nariz y los pontones junto a la tapa posterior.

El seccionado final se realiza luego de haber construido la carrocería, para este capítulo se tomará de referencia las secciones mencionadas anteriormente.

2.1.1.1.Primera sección

Esta sección comprende la parte frontal de la carrocería del vehículo y está formada por:

- Nariz
- Trompa
- Panales laterales

Todos los elementos formaran una sola sección de modelado. Esta pieza recubre en un gran porcentaje la cabina del conductor, y elementos mecánicos como: pedales, sistema de dirección y circuitos eléctricos.

Figura 2.2 Nariz de un monoplaza FSAE

Fuente: (Engineering, 2012)

2.1.1.2.Segunda sección

Para esta sección además de los pontones se agrega una parte elemental en el diseño que es la tapa posterior, debido a que el reglamento para vehículos eléctricos exige un recubrimiento en los elementos eléctricos del vehículo por seguridad.

Figura 2.3 Recubrimiento en la zona posterior

Fuente: (GreenTeam, s.f.)

2.1.2. Influencia y necesidad de los subsistemas del monoplaza

Para el diseño inicial de la carrocería del vehículo, a más del conocimiento del reglamento establecido para carrocerías, las consideraciones y criterios de diseño es necesario tener el diseño de subsistemas importantes como el chasis, sistema de suspensión, atenuador de impactos, etc. Los mismos sistemas no establecen la forma de la carrocería del vehículo, sino que dan limitaciones para el diseño del mismo. Además, es necesario conocer la ubicación de elementos del sistema eléctrico y de refrigeración como la batería, controlador, motor del vehículo, radiador, cañerías y depósitos de agua. El montaje completo de todos los elementos del vehículo sin carrocería se muestra en la figura 2.4.

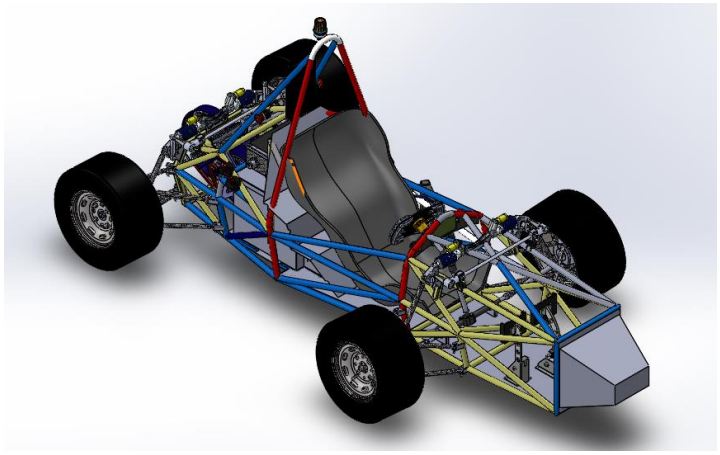


Figura 2.4 Ensamble de los subsistemas del vehículo E.B. 2017

Fuente: Autores.

2.1.2.1.Distribución de los subsistemas del vehículo

La distribución de los subsistemas es importante para el diseño, ya que ciertos elementos dan limitaciones en el diseño de la carrocería como el chasis. A continuación, se muestra la distribución de los subsistemas de la parte frontal del vehículo.

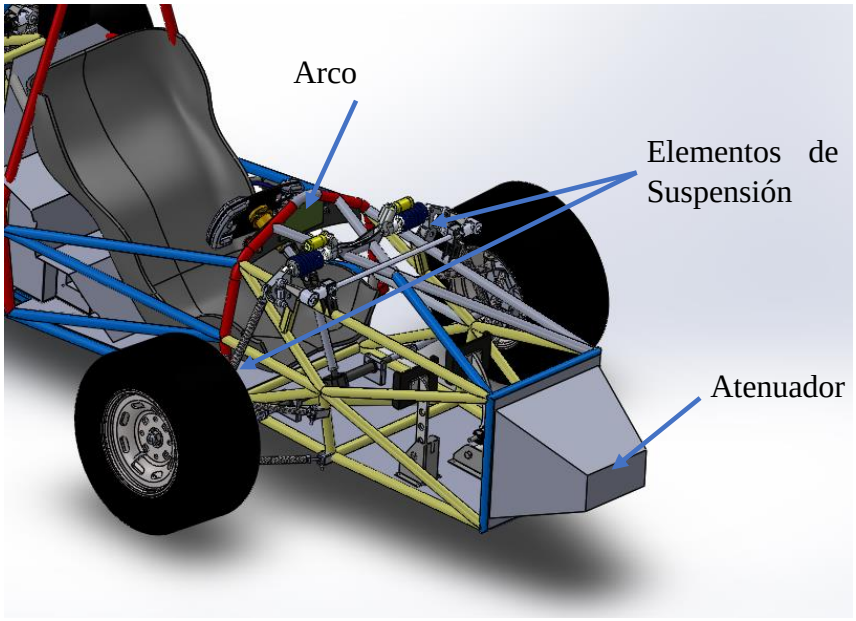


Figura 2.5 Distribución frontal de los subsistemas

Fuente: Autores.

Para la parte frontal de la carrocería como se muestra en la figura 2.5. se debe considerar que el chasis y el atenuador de impactos no da la forma de la carrocería sino son limitantes en el diseño. Además, para el diseño se debe considerar que los amortiguadores serán visibles al estar ubicados en la parte superior del chasis.

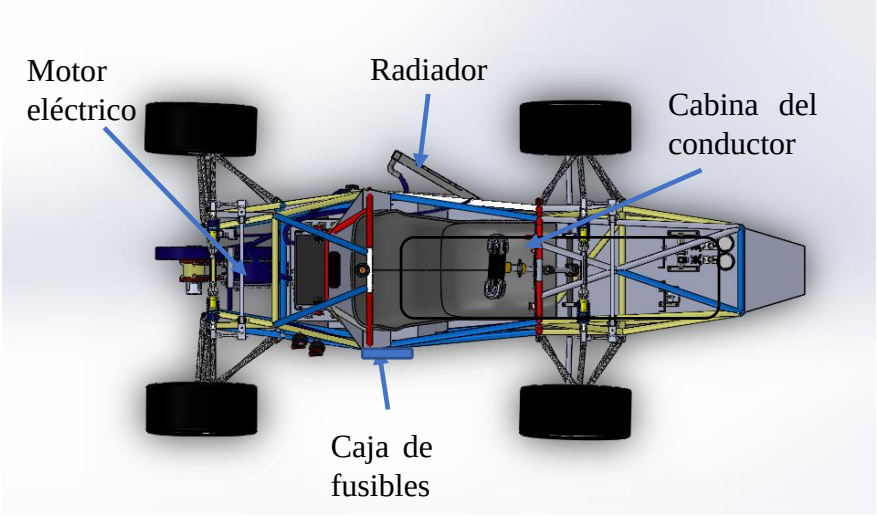


Figura 2.6 Distribución posterior de subsistemas del vehículo E.B. 2017

Fuente: Autores.

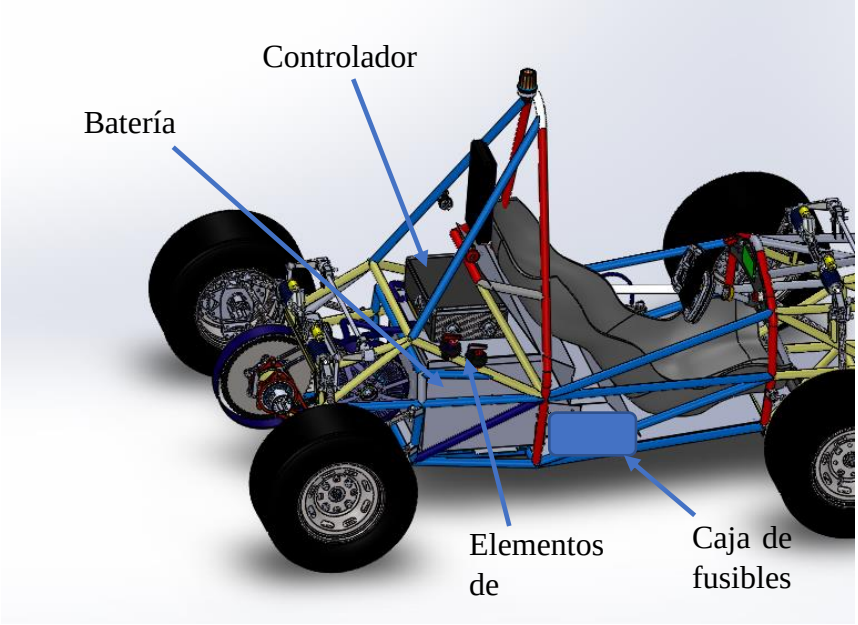


Figura 2.7 Distribución de los elementos eléctricos

Fuente: Autores.

Para la parte posterior de la carrocería algunos elementos eléctricos deberán ser visibles y tendrán una ubicación fija en el chasis, por lo que el diseño en la parte posterior se verá limitado por estos elementos. Además, la protección de cada uno de los elementos eléctricos tales como el controlador, las baterías de alto voltaje y VMS, deberán ser herméticos para la prueba de lluvia durante la competencia.

2.2. Diseño de la carrocería

2.2.1. Primeros bosquejos de la carrocería

En el diseño exterior de vehículos siempre se inicia con los bosquejos en papel que dan una idea de lo que se quiere llegar a obtener, estos sirven de guía en el modelado en 3D. Considerando los fundamentos aerodinámicos se dibuja la superficie de manera que cuando el aire choque sobre la carrocería la geometría de esta no influya al rendimiento. Además, se considera la distribución de los espacios de todos los elementos del vehículo juntamente con el reglamento.

2.2.1.1.Influencia y selección la nariz

La nariz es el primer elemento que influye en la aerodinámica de todo el vehículo, por ello una buena geometría ayudará a que la distribución del aire no infiera en la eficiencia del vehículo. Por ello se ha tomado de referencia para el bosquejo inicial a diferentes vehículos Formula SAE que han tenido un buen desempeño en la competencia, además esta se limita por la forma del chasis y atenuador de impactos y también la suspensión. A continuación, se muestra el bosquejo de la nariz.

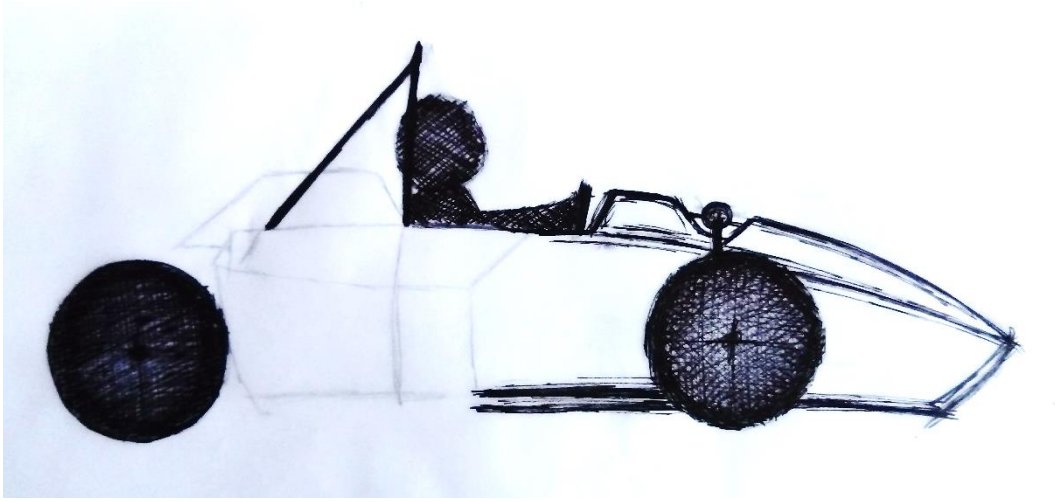


Figura 2.8 Primer bosquejo de la nariz de la carrocería

Fuente: Autores.

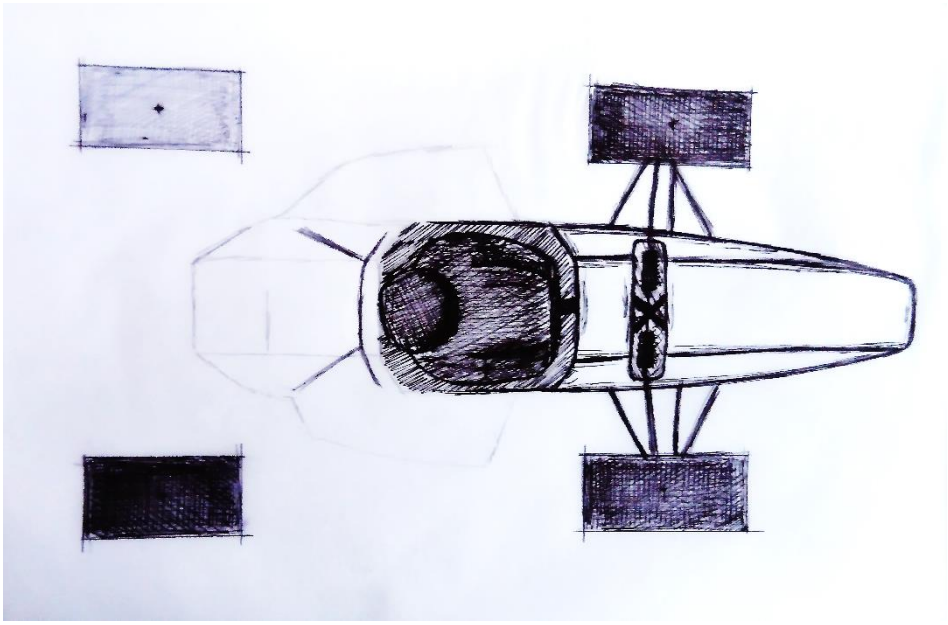


Figura 2.9 Primer bosquejo de la nariz vista superior

Fuente: Autores

En los bosquejos de las figuras 2.8 y 2.9 se puede observar que esta se encuentra formada por planos o caras que se extienden desde la cabina del conductor, uno en la parte central, dos inclinados a los costados y dos en la parte lateral de la nariz. Con esta configuración se espera que el cambio de presión se gradual en la superficie y también en el momento de la construcción, esta combinación ofrezca una resistencia para que la pieza no fleje.

2.2.1.2.Influencia y selección de los pontones

Los pontones ofrecen una seguridad ante impactos, en este se encuentra ubicado el radiador para la refrigeración y la caja de fusibles. En la aerodinámica influyen directamente en la eficiencia de la parte posterior, estos están unidos con la tapa posteriori para formar un solo elemento y recubrir los elementos eléctricos.

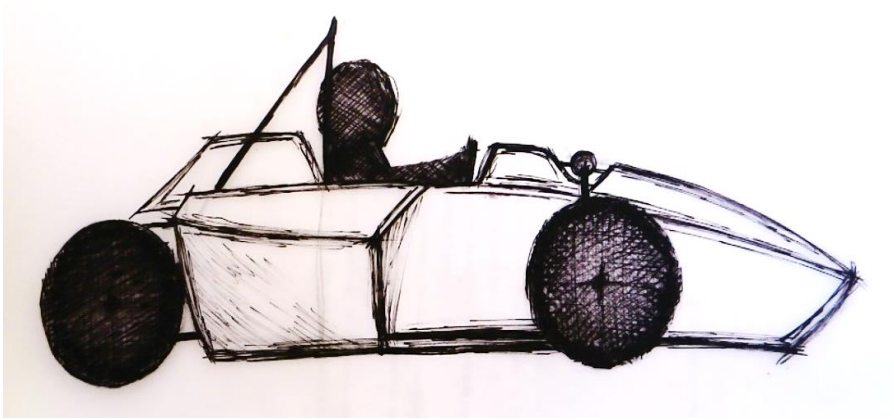


Figura 2.10 Bosquejo de los pontones vista lateral

Fuente: Autores

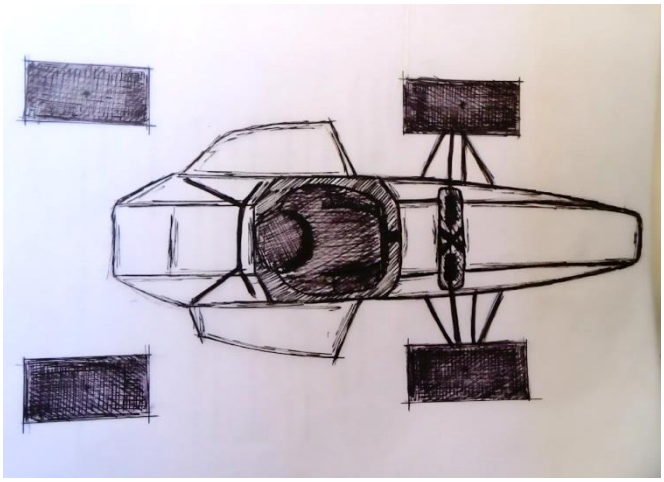


Figura 2.11 Bosquejo de los pontones vista superior

Fuente: Autores

Para los modelos que se observa en las figuras 2.10 y 2.11 se tomó como base para los pontones las consideraciones que estos deben tener el espacio suficiente para que los elementos como el radiador ingresen de manera adecuada, además que estos ofrezcan un flujo de aire adicional hacia los elementos eléctricos. La tapa posterior toma la forma de los tubos del chasis en esa zona, de tal manera que pueda tener una buena sujeción y rigidez. Para la forma de los pontones se tomó como referencia la geometría de los Formula uno para acoplar a este tipo de monoplazas.

2.3. Diseño CAD y simulaciones CFD de la carrocería

Luego de seleccionar el tipo de configuración aerodinámica del monoplaza y realizar el bosquejado preliminar del diseño se realiza el modelado CAD de la carrocería. Los diseños CAD se realizan con el uso del software de diseño SOLIDWORKS.

2.3.1. Parámetros de simulación CFD

Se ejecutan las simulaciones CFD en el software SolidWorks 2017, con el fin de obtener los valores respectivos de las fuerzas, momentos y presiones en el movimiento dinámico del vehículo. La velocidad del fluido en la simulación es un parámetro muy importante, ya que a velocidades bajas la aerodinámica no disminuye el rendimiento del motor; por ello, las velocidades a simular se muestran en la tabla 1.

Tabla 2.2 Valores de velocidades a simular.

Fuente: Autores.

N.º PRUEBA	VELOCIDAD (km/h)
1	50
2	60
3	70
4	80
5	90
6	100

Las simulaciones CFD se realizan considerando las condiciones reales de la pista y escala real. Los valores de simulación son dados por el reglamento y se muestran en la tabla 2.

Tabla 2.3 Parámetros de simulación

Fuente: Autores

ESPECIFICACIÓN	VALOR
Presión atmosférica	101826 KPa
Densidad del aire	1,162 kg/m^3

2.3.2. Primer diseño CAD de la carrocería

Para el primer diseño de la carrocería, se croquiza y modela el diseño bosquejado en papel, bajo las consideraciones realizadas anteriormente se modela la carrocería sobre el modelo CAD del chasis cumpliendo el reglamento y rigiéndonos en las consideraciones de diseño, el mismo se muestra en la figura 2.12.

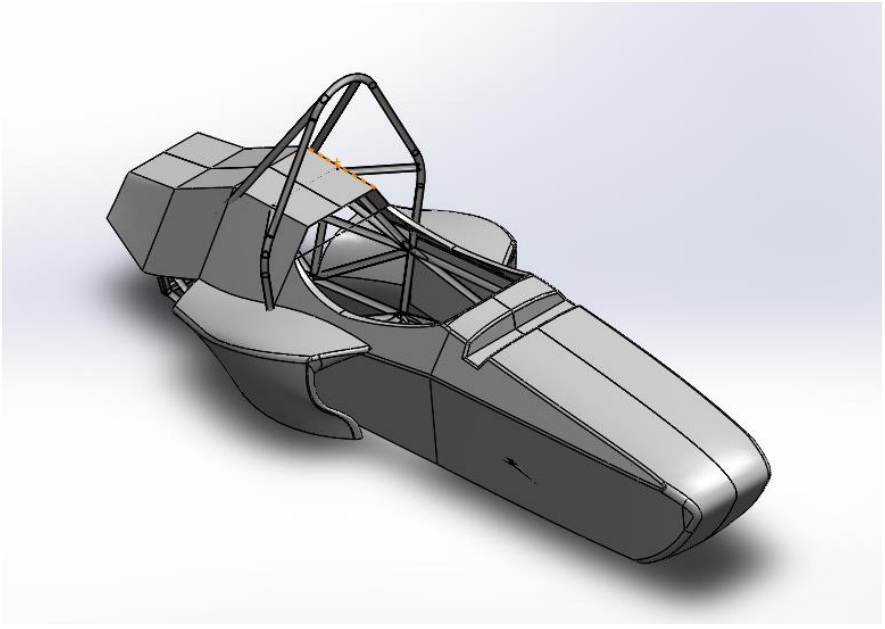


Figura 2.12 Primer modelo de la carrocería

Fuente: Autores.

Modelada la carrocería se procede con las simulaciones CFD correspondientes, para estas se realiza únicamente las dos piezas de la carrocería sin ningún otro subsistema del vehículo, debido al desgaste computacional en la resolución de la simulación se modifica el dominio computacional únicamente de la carrocería. En la figura 2.13 y 2.14 se puede observar los parámetros importantes de la simulación y las variables que se desea obtener.

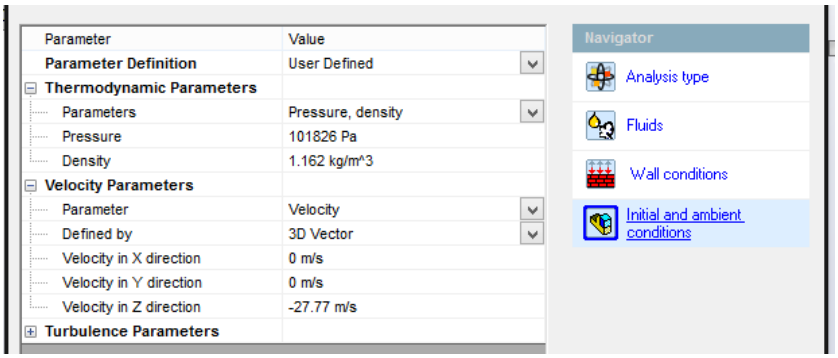


Figura 2.13 Parámetros de simulación

Fuente: Autores.

Figura 2.14 Variables a calcular en la simulación

Fuente: Autores.

Las variables de simulación a calcular que se observan en la figura 2.14 se seleccionan debido a que estos son los valores más importantes para un estudio aerodinámico y realizar las comparaciones para seleccionar el modelo final.

Finalmente se selecciona el tipo de mallado y se corre la simulación, en la figura 2.13 el único parámetro que varía por cada simulación es la velocidad. En la figura 2.15 y 2.16 se observa las zonas de mayor presión que se generan en la carrocería a elevadas velocidades,

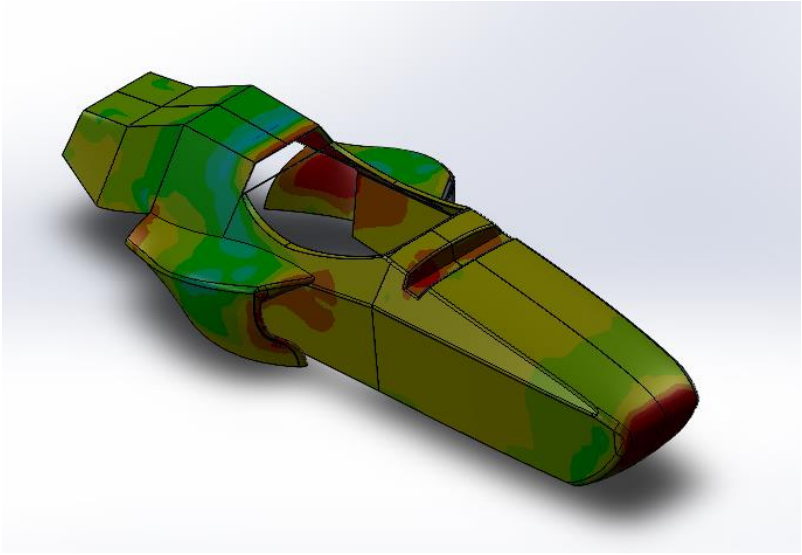


Figura 2.15 Zonas de mayor presión vistas sobre la superficie de la carrocería

Fuente: Autores.

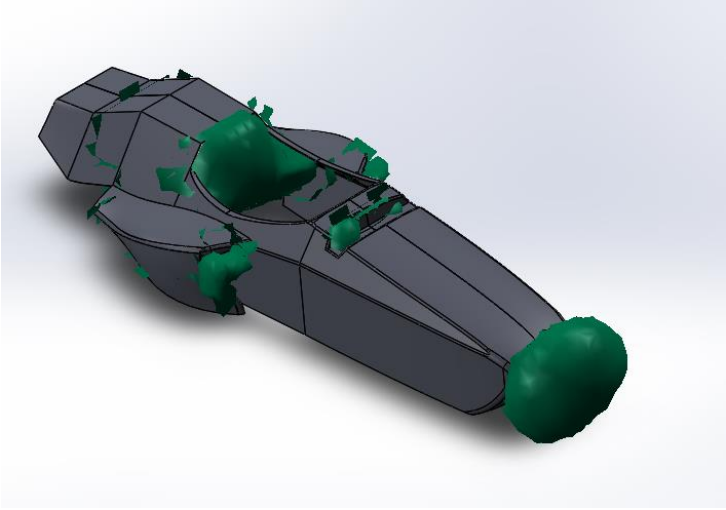


Figura 2.16 Zonas de mayor presión

Fuente: Autores.

Los resultados que se muestran a continuación, en la tabla 2.4 son los resultados obtenidos por la simulación que son la fuerza de arrastre (Fx), y la presión máxima que se genera. En función de la fuerza de arrastre obtenida se calcula mediante la ecuación 1. 14 el coeficiente aerodinámico de arrastre. La fuerza de sustentación no se considera ya que la carrocería se diseña para únicamente tener el menor arrastre

posible ya que la configuración aerodinámica no incluye dispositivos de sustentación.

Tabla 2.4 Resultados aerodinámicos del modelo 1

Fuente: Autores.

Área Frontal m^2		0,46	
Velocidad	**Fx (N)**	**Presión máxima (Pa)**	**Cx**
50	31,6	127	0,6129
60	42	159	0,5657
70	59	221	0,5838
80	76	283	0,5758
90	97,5	362	0,5837
100	119	442	0,577

Para el primer modelo los valores del coeficiente aerodinámico a diferentes velocidades es un valor muy elevado al que se desea obtener, el mismo se puede mejorar mediante la modificación en la forma de la nariz y de los pontones, además la distribución de la presión tiene variaciones notorias a lo largo de toda la geometría.

2.3.3. Segundo modelo CAD de la carrocería

En el primer diseño de la carrocería como se puede observar en la tabla 2.4 los valores del Cx son muy elevados para analizar únicamente la carrocería esto se debe la influencia de varios factores que se reflejan directamente en las zonas de mayor presión generadas por la geometría de la carrocería. En la figura 2.15 se puede observar que una de las zonas de mayor presión está en la nariz por la que la modificación de la misma es necesaria.

Existen ciertas consideraciones para la altura de la nariz ya que esta es donde se genera la mayor presión. (Francisco Aparicio Izquierdo, 2001)

- La altura del punto de estancamiento debe ser lo más baja posible.

- El ángulo de inclinación de la nariz o capot debe tener cierta inclinación.

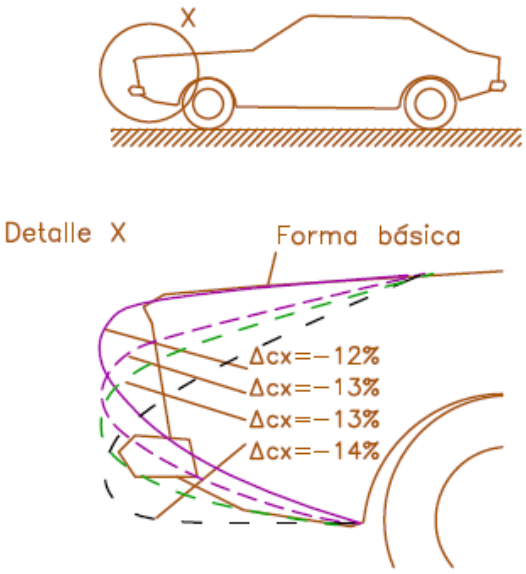


Figura 2.17 Formas delanteras e influencia sobre el Cx

Fuente: (Francisco Aparicio Izquierdo, 2001)

Bajo estas consideraciones se modifica la nariz. En la siguiente figura se observa los cambios que se realizan para esta sección.

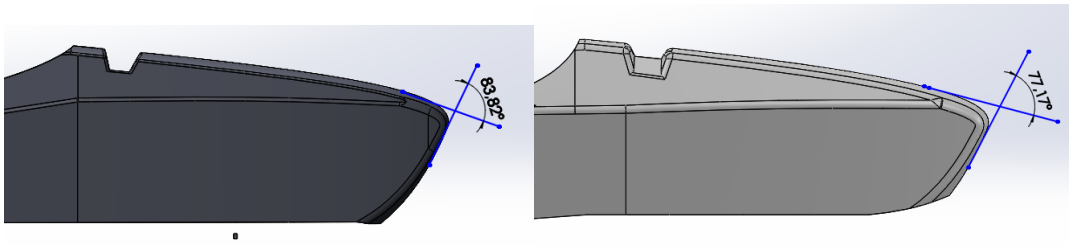


Figura 2.18 Modificación de la nariz

Fuente: Autores.

En los pontones la modificación también es necesaria juntamente con la tapa posterior, esto se debe a dos factores.

- Dentro de los mismos se genera elevada presión.
- La geometría es muy compleja para la construcción, montaje y desmontaje de la misma cuando sea necesario.

Bajo estas consideraciones se modifica los pontones, esto se puede observar en la figura 2.19

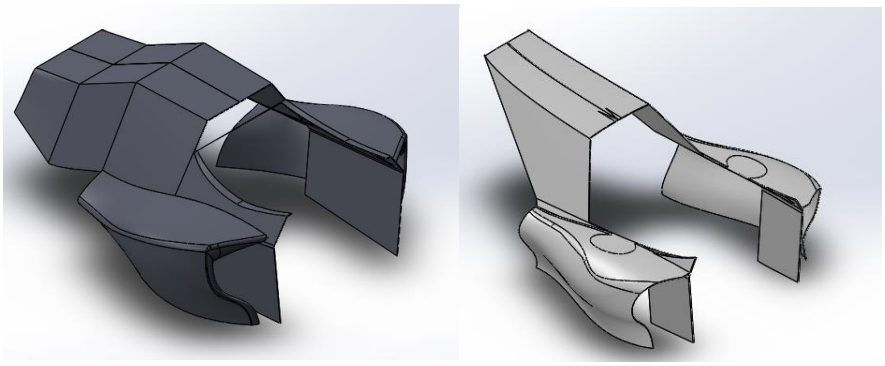


Figura 2.19 Modificación de los pontones y tapa posterior

Fuente: Autores.

Luego de las modificaciones se realiza la simulación CFD bajo los mismos parámetros que el primer diseño.

En la siguiente figura se muestra la distribución de presión del nuevo modelo sobre la superficie a elevadas velocidades.

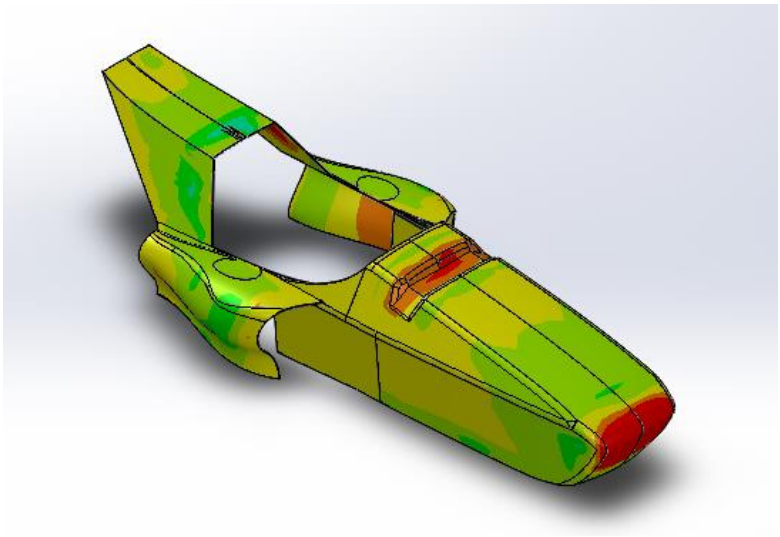


Figura 2.20 Distribución de presión superficial del segundo modelo a elevadas velocidades

Fuente: Autores.

En la tabla 2.5 se muestran los resultados de la simulación y el Cx calculado del segundo modelo.

Tabla 2.5 Resultados aerodinámicos del modelo 2

Fuente: Autores.

Área Frontal m^2		0,42	
Velocidad	**Fx (N)**	**Presión máxima (Pa)**	**Cx**
50	18,24	114	0,3974
60	26,2	138	0,3962
70	36,44	192	0,3965
80	46,68	247	0,3969
90	59,84	315	0,3971
100	73	383	0,3973

Como se puede observar en la tabla 2.5 con las modificaciones que se realizaron para el segundo modelo el coeficiente aerodinámico de arrastre disminuyó considerablemente de 0.5 a 0.3 en todas las velocidades. El inconveniente con este modelo son los pontones para la fase de manufactura por lo que se realizará modificaciones, tanto en los pontones como en la nariz para mantener o mejorar la aerodinámica del vehículo.

2.3.4. Tercer modelo CAD de la carrocería

En el segundo modelo modificado se puede observar en la tabla 2.6 que con el cambio de geometría en la altura de la nariz, inclinación de la misma y en los pontones la aerodinámica de la misma mejora reduciendo el Cx a 100 km/h de 0.57 a 0.39. Para este caso se puede observar en la figura 2.20 que la presión máxima se encuentra en la nariz debido a que la cara frontal tiene un área superficial elevada, por ello se variará para el tercer modelo la altura y geometría como su inclinación. Para el caso de los pontones con la tapa posterior, el cambio de geometría entre las dos piezas genera una arista demasiada pronunciada que representa un problema para la parte de construcción, además la tapa posterior tiene una inclinación que no

permitiría que el agua para la prueba de lluvia fluya por los costados ni por la parte posterior.

Luego de analizar las consideraciones mencionadas anteriormente se modifica nuevamente el modelo. Para la nariz se reduce la altura de la punta de la nariz como la inclinación de la misma, se reduce el área de la cara frontal. Estos cambios se pueden observar en la figura siguiente.

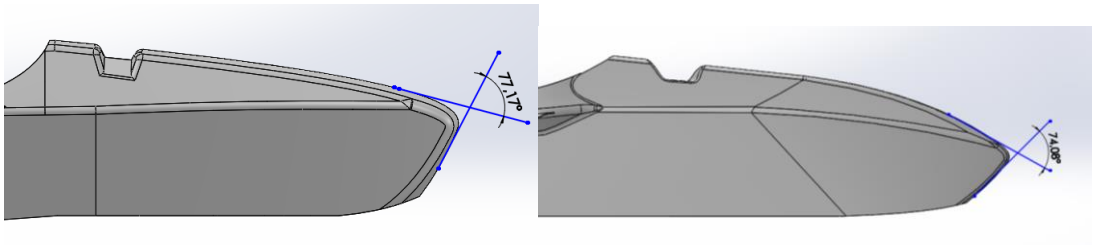


Figura 2.21 Modificación de la nariz.

Fuente: Autores.

Para la geometría de los pontones y la tapa posterior se varía la inclinación de la tapa posterior, además el cambio de geometría entre estas dos partes no debe ser demasiado brusco para el proceso de manufactura. De igual manera se agrega una saliente en los costados para que el cambio de geometría entre los paneles laterales y los pontones no sean bruscos. Estas modificaciones se pueden observar en la siguiente figura.

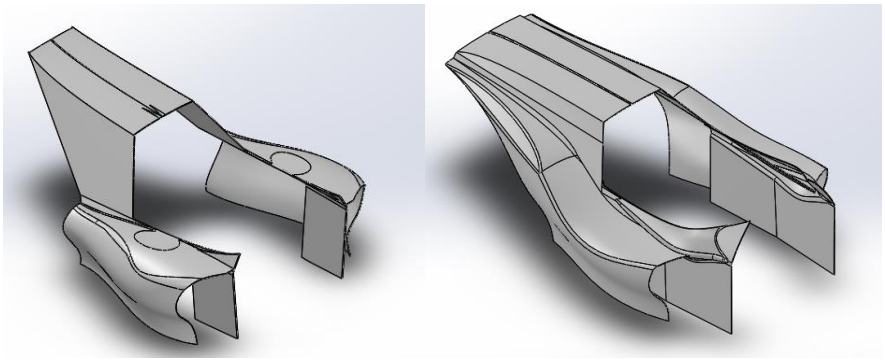


Figura 2.22 Modificación de los pontones y la tapa posterior

Fuente: Autores.

Para este modelo lo que se espera es un aumento en el Cx como en la fuerza de arrastre, debido al cambio de geometría el área frontal aumenta de 0.42 a 0.44 m^2, estos cambios pueden afectar la aerodinámica del monoplaza, pero favorece en

ciertos aspectos de manufactura. Por ello se espera que la variación del Cx sea mínima.

Luego de modelar el tercer modelo, bajo los mismos parámetros se realiza la simulación CFD.

En la figura 2.23 se observa la distribución superficial del tercer modelo.

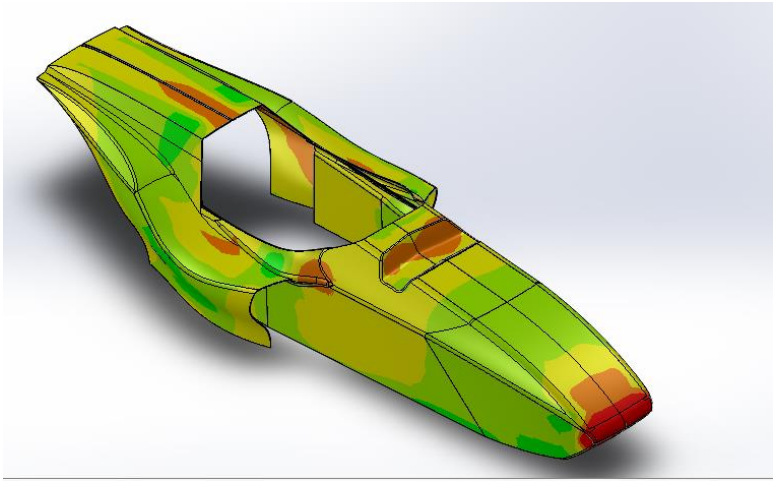


Figura 2.23 Distribución superficial de la presión en el tercer modelo

Fuente: Autores.

Como se puede ver para este modelo el punto de estancamiento se encuentra a una altura inferior a los modelos anteriores y el área superficial es menor igualmente, se puede observar una distribución superficial más regular. Los resultados aerodinámicos del tercer modelo se muestran en la tabla 2.7.

Tabla 2.6 Resultados aerodinámicos del tercer modelo

Fuente: Autores.

Área Frontal m^2		0,44	
Velocidad	**Fx (N)**	**Presión máxima (Pa)**	**Cx**
50	23,53	111	0,47
60	33,8	160	0,4763
70	46,9	222	0,4758

80	60	285	0,4753
90	77,3	365	0,477
100	94,75	446	0,4806

Luego de las modificaciones y simulaciones realizadas con el tercer modelo, en la tabla 2.6 se puede observar que el coeficiente aerodinámico de arrastre se incrementó con respecto al segundo modelo, esto se debe al cambio de geometría en los pontones y en la nariz, por lo que la modificación para mejorar la eficiencia aerodinámica es necesaria. La ventaja de este modelo es la facilidad de manufactura para la fase de la construcción por lo que mantener la forma es importante.

2.3.5. Cuarto modelo CAD de la carrocería

Los resultados en el tercer modelo no son eficaces debido a que el coeficiente de arrastre Cx aumenta considerablemente con respecto a los modelos anteriores. Este aumento se debe a varios factores en el cambio de geometría, ya que aumenta el área frontal de la carrocería al variar la forma en la unión de los pontones con la tapa posterior. Estas variaciones en la geometría de la carrocería tienen sus ventajas en el momento de la manufactura de la misma, y sus desventajas disminuyendo el desempeño del vehículo en pista. Considerando estos aspectos se toma como base esta geometría debido a una facilidad en la construcción, pero se realizan ciertas modificaciones que mejoren la aerodinámica de la carrocería. Estas modificaciones se pueden observar en las siguientes figuras.

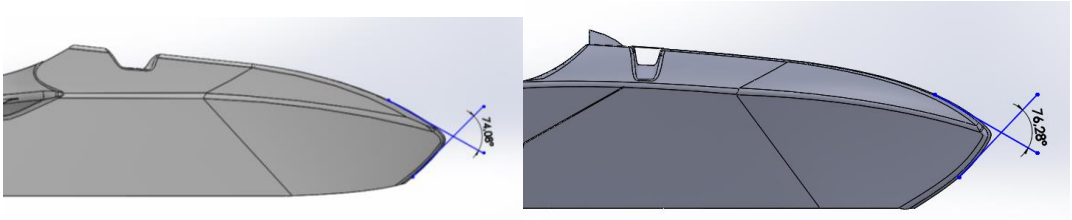


Figura 2.24 Modificación de la geometría de la nariz

Fuente: Autores.

En las modificaciones que se observan en la figura 2.24 de la nariz se considera varios aspectos para el diseño. Para este modelo se toma el límite del chasis y el

atenuador de impacto manteniendo la forma base, de esta manera se aumenta la altura de la nariz donde se encuentra el punto de estancamiento, al realizar esta modificación se reduce el largo total de la nariz encajando el chasis y el atenuador sin ningún problema, esto también es una ventaja ya que representa menor peso total. En la inclinación del capot a diferencia del primer y segundo modelo este tiene una inclinación al igual que el tercer modelo. El espacio para ubicar los amortiguadores se reduce y se agrega una cara en la parte media de esta zona para mantener la regularidad en la cara del capot, esto con el fin de evitar turbulencias y cambios de presión. Además, se agrega una visera que cubre el arco frontal de chasis.

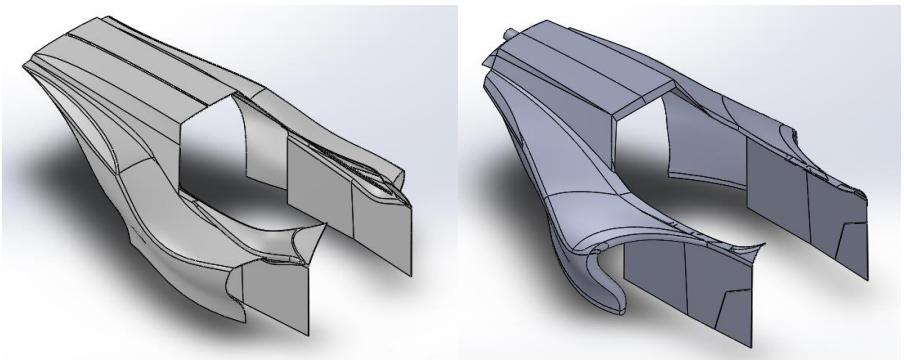


Figura 2.25 Modificación en la geometría de los pontones y tapa posterior

Fuente: Autores.

En la figura 2.25 se observa los cambios en la geometría de los pontones y tapa posterior para estas se mantiene la forma del tercer modelo, pero se modifica la geometría de esta. Primeramente, el cambio en la geometría entre los paneles laterales y los pontones es regular, esto es una ventaja para la construcción y evita turbulencias y cambios de presión bruscos. La cara superior de los pontones mantiene una superficie regular la cual mantiene un flujo laminar a lo largo de esta, para la parte inferior, una superficie curva hacia dentro direcciona un flujo de aire adicional para la refrigeración de ciertos elementos eléctricos, también para este modelo de pontones se reduce la distancia de estos con un corte lateral inclinado con el fin de reducir material y peso. Para la tapa posterior no se realizan modificaciones notorias simplemente se considera la inclinación hacia atrás y la facilidad de extraer y colocar cuando se construya.

Luego de realizar las modificaciones mencionadas anteriormente se realiza las simulaciones CFD bajo los mismos parámetros que los modelos anteriores. Los

resultados de los cambios de presión superficial sobre este modelo se pueden observar en la siguiente figura.

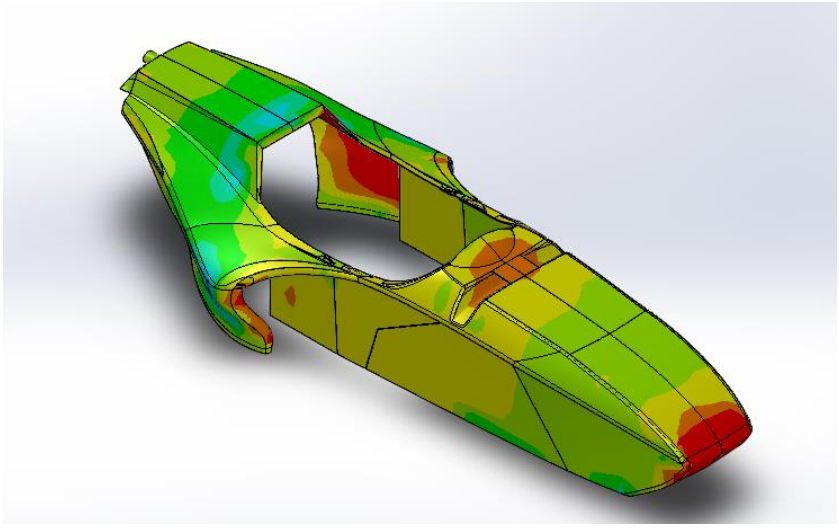


Figura 2.26 Distribución superficial de la presión del cuarto modelo de la carrocería

Fuente: Autores.

Los resultados de las simulaciones para este modelo se observan en la tabla a continuación.

Tabla 2.7 Resultados aerodinámicos del cuarto modelo de la carrocería.

Fuente: Autores.

Área Frontal m^2		0,46	
Velocidad	**Fx (N)**	**Presión máxima (Pa)**	**Cx**
50	19	111	0,3536
60	28,4	160	0,3669
70	39,34	222	0,366
80	50,28	285	0,3651
90	64,64	365	0,3662
100	79	446	0,3673

Con las modificaciones realizadas en la geometría se mantiene la forma base y se mejora la aerodinámica, como se puede observar en la tabla 2.7 el coeficiente aerodinámico de arrastre disminuye y esta inferior al modelo seleccionado del Anexo 2 con un valor de 0.63 como base.

2.4. Comparación de resultados obtenidos de los diferentes modelos de la carrocería.

2.4.1. Comparación de la fuerza de arrastre generada

Realizadas las simulaciones de los modelos de las figuras 15, 20, 23 y 26 se comparan los valores obtenidos de las fuerzas de arrastre generadas por cada modelo en la tabla 2.8 y la figura 2.27.

Tabla 2.8 Resultados de la fuerza de arrastre por cada modelo

Fuente: Autores

	Fx (N)			
Velocidad (km/h)	**Modelo 1**	**modelo 2**	**Modelo 3**	**Modelo 4**
50	31,6	18,24	23,53	19
60	42	26,2	33,8	28,4
70	59	36,44	46,9	39,34
80	76	46,68	60	50,28
90	97	59,84	77,3	64,64
100	119	73	94,75	79

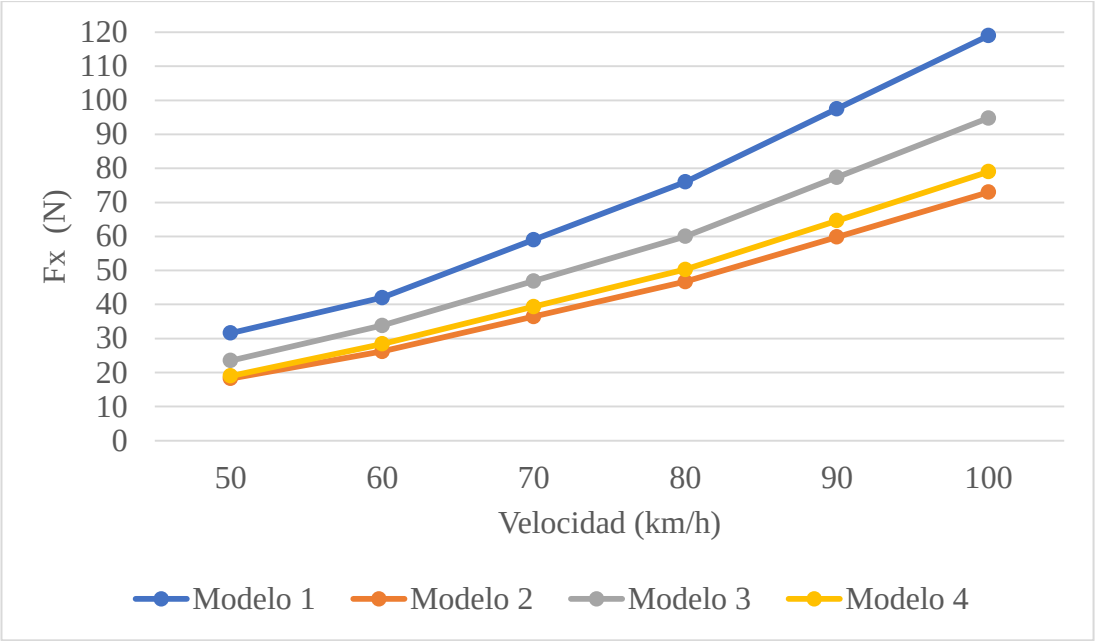


Figura 2.27 Comparación de la fuerza de arrastre generada por modelo

Fuente: Autores.

En la figura 2.27 se puede observar las curvas de la fuerza de arrastre generada por cada modelo, los resultados muestran que el modelo que genera una menor fuerza de arrastre es el segundo modelo, manteniendo valores bajos desde bajas a altas velocidades, cabe recalcar que el cuarto modelo mantiene una diferencia baja con respecto a este, a 100 km/h la diferencia es únicamente de 6N. Mediante esta comparación se comprueba que las modificaciones realizadas en el diseño mejoran la aerodinámica de la carrocería, reduciendo la fuerza de arrastre.

2.4.2. Comparación de la Presión dinámica generada por modelo

La presión dinámica como se describe en el capítulo I, es la presión que se genera cuando el fluido se encuentra en movimiento, esta es la diferencia entre la presión máxima y la presión atmosférica. En la tabla 2.9 y figura 2.28 se observan los resultados obtenidos por cada modelo de la carrocería.

Tabla 2.9 Resultados de la presión dinámica por cada modelo

Fuente: Autores

Presión Dinámica				
Velocidad	**Modelo 1**	**Modelo 2**	**Modelo 3**	**Modelo 4**
50	127	111	111	111
60	159	160	160	160
70	221	223	223	223
80	283	285	285	285
90	363	366	366	366
100	442	446	446	446

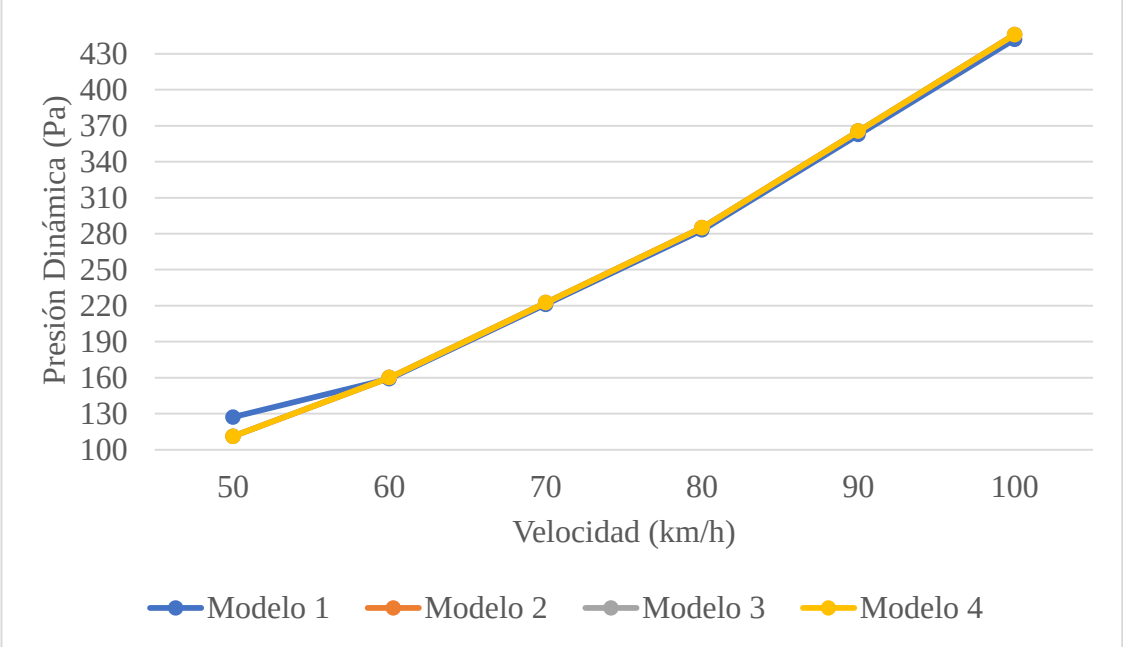


Figura 2.28 Comparación de la presión dinámica generada por cada modelo

Fuente: Autores.

En el caso de la presión dinámica, se observa en la tabla 2.9 y figura 2.28 la similitud en los datos de cada modelo, esto se debe a la igualdad en la geometría y forma de la carrocería, mediante esta comparación no se puede seleccionar un modelo en específico.

2.4.3. Comparación del coeficiente aerodinámico de arrastre

A diferencia de la fuerza de arrastre la comparación del coeficiente aerodinámico entre modelo es muy importante, ya que este número unidimensional indica que tan eficiente es la aerodinámica de un vehículo, ya que este es el valor principal de la aerodinámica de vehículos de competencia.

Los resultados y comparaciones del coeficiente aerodinámico generado por cada modelo se muestran en la tabla 2.10 y la figura 2.29

.

Tabla 2.10 Resultados del coeficiente aerodinámico por cada modelo

Fuente: Autores.

	Cx			
Velocidad	**Modelo 1**	**Modelo 2**	**Modelo 3**	**Modelo 4**
50	0,613	0,482	0,47	0,3536
60	0,566	0,3449	0,4763	0,3669
70	0,584	0,3449	0,4758	0,366
80	0,576	0,3449	0,4753	0,3651
90	0,584	0,3456	0,4779	0,3662
100	0,577	0,3464	0,4806	0,3673

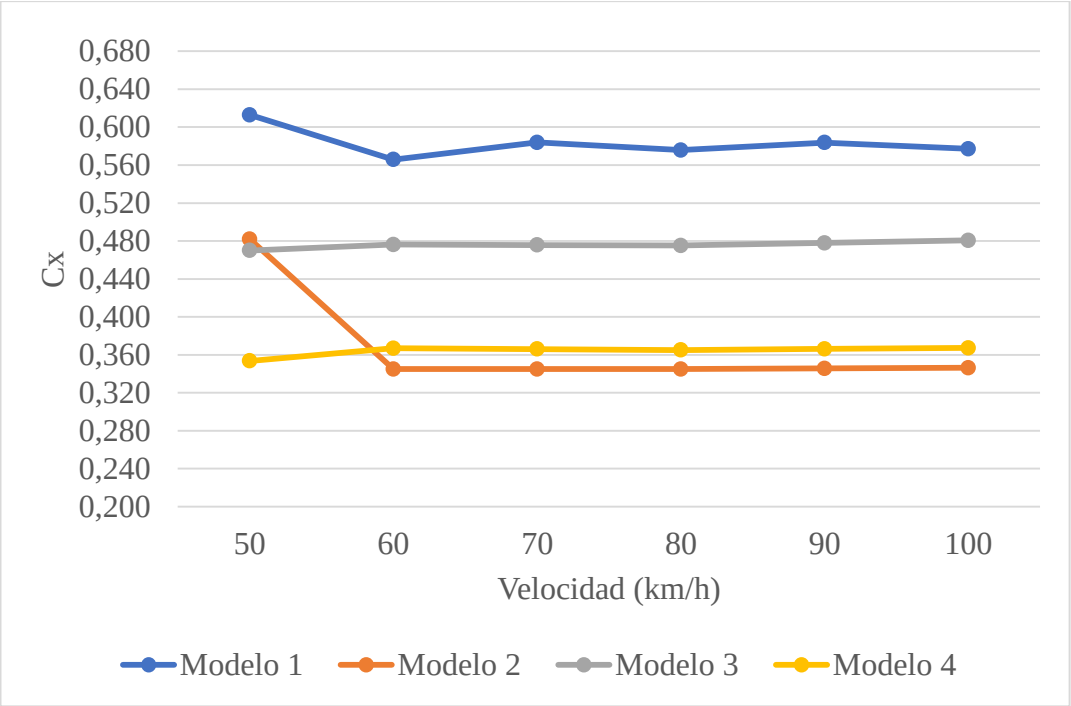


Figura 2.29 Comparación del coeficiente aerodinámico de cada modelo

Fuente: Autores.

En la figura 2.29 se puede observar las curvas del coeficiente aerodinámico de arrastre generado por cada modelo a diferentes velocidades. La diferencia entre modelos para este valor es muy notoria y se puede observar que el modelo 2 a elevadas velocidades genera menor coeficiente de arrastre que el primer y tercer modelo. Esta diferencia se debe al cambio de geometría que se genera para este modelo, con los pontones sin ninguna inclinación hacia la parte de arriba. También se puede observar que el tercer modelo está muy próximo al segundo, con una diferencia de 0.02, pero en vehículos de competencia mejorar la aerodinámica incluso se ve reflejada en valores de centésimas en el Cx. Luego de realizar las modificaciones con el fin de mejorar la aerodinámica de la carrocería se observa que el mejor coeficiente aerodinámico ofrece el segundo modelo y siguiente a este el cuarto con una diferencia de 2 centésimas.

2.4.4. Selección del modelo de la carrocería

En las comparaciones realizadas anteriormente se puede observar que los modelos con mejores resultados son el segundo y cuarto modelo, generando tanto fuerzas de arrastre y coeficiente aerodinámico bajo a comparación de los otros modelos. Para la

selección del modelo a utilizar claramente se observa que el segundo modelo genera menor fuerza y coeficiente de arrastre que el último modelo, siendo este el más efectivo, pero el modelo que se selecciona para el estudio del vehículo completo es el cuarto modelo, debido a que este es el modelo final con las modificaciones necesarias para aumentar la eficiencia de la carrocería, aunque la misma en comparación del segundo modelo a 100 km/h tiene un coeficiente de arrastre mayor a 0.02, a continuación se mencionan los parámetros que se consideran para esta selección.

- La fuerza de arrastre a 100 km/h del cuarto modelo tiene únicamente una diferencia de 6N en comparación al segundo modelo.
- El coeficiente de arrastre como se mencionó tiene una diferencia de 0.02, que en vehículos de competencia representa performance el valor final de 0.367 del cuarto modelo está dentro del rango del coeficiente aerodinámico para este tipo de competencia.
- El área frontal proyectada del segundo modelo es de 0.42 m^2, mientras que la del cuarto modelo aumenta a 0.46 m^2, el coeficiente aerodinámico indica que incluso con este aumento en el área frontal la eficiencia de esta no se ve afectada.

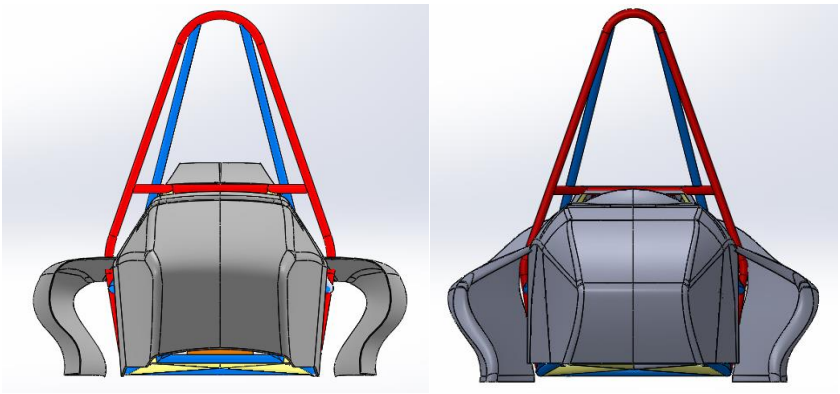


Figura 2.30 Vista frontal del segundo y cuarto modelo

Fuente: Autores.

- En la nariz para el cuarto modelo como se puede observar en la figura 2.30 la altura de esta es menor mejorando el coeficiente aerodinámico, además el área de contacto en esta zona es menor generando un menor punto de

estancamiento, la geometría de esta mejora la dirección del flujo de aire hacia la parte posterior de la carrocería.

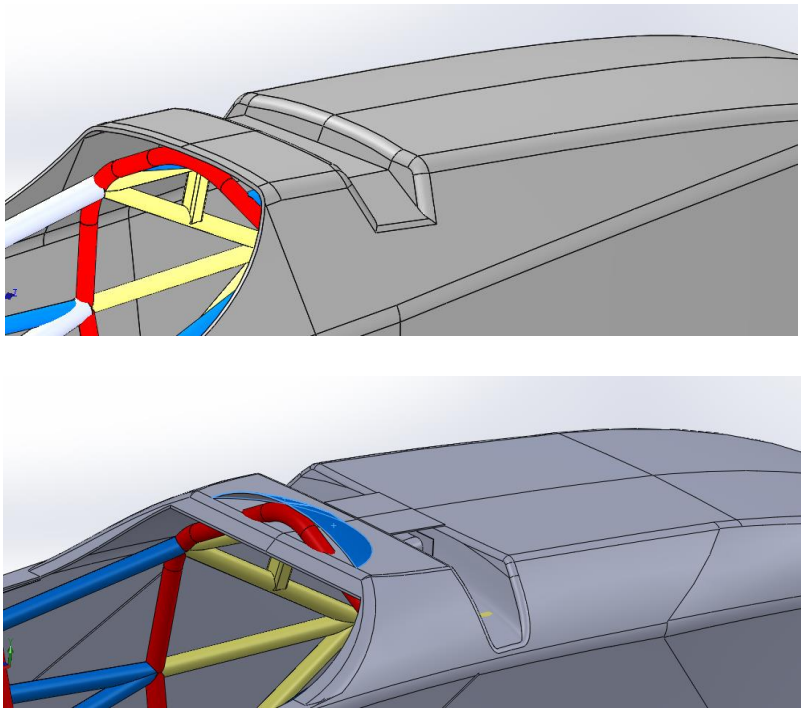


Figura 2.31 Comparación de la sección en el arco frontal de la nariz de cada modelo

Fuente: Autores.

- En el cuarto modelo se incluye una visera en el arco frontal con el fin de reducir la altura de la nariz y mantener una inclinación aceptable del capot, además se incluye una cara en la zona de los amortiguadores para de esta manera reducir el cambio de presión brusco y evitar generar turbulencias. De esta manera también se reduce la cantidad de material a usar para el proceso de manufactura y se reduce el peso total.
- Un aspecto muy importante en la aerodinámica es el cambio de geometría en ciertas secciones, un cambio suave en la geometría mantendrá una distribución de presión sin variaciones grandes, de igual manera en la velocidad del flujo y reduce la generación de turbulencias. Estos cambios se pueden observar en la unión entre los paneles laterales de la nariz y los pontones. En el segundo modelo este cambio no es tan regular como en el cuarto modelo, esto se pude apreciar en la siguiente figura.

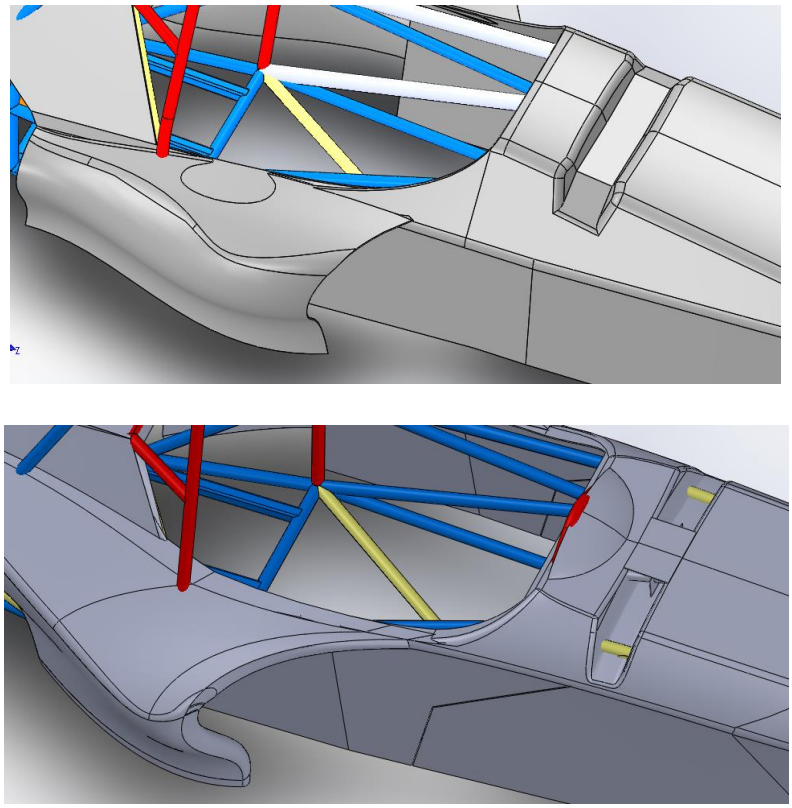


Figura 2.32 Cambios de geometría en la unión de los paneles laterales de la nariz y los pontones

Fuente: Autores.

- Ocurre lo mismo para los cambios de geometría de los pontones y la tapa posterior. Además, la zona posterior debe garantizar que para la prueba de lluvia el agua no ingrese hacia ningún elemento electico, por esta razón el cuarto modelo tanto en el cambio de geometría, inclinación de la tapa posterior y mayor recubrimiento de los elementos eléctricos es mejor a comparación del segundo modelo.

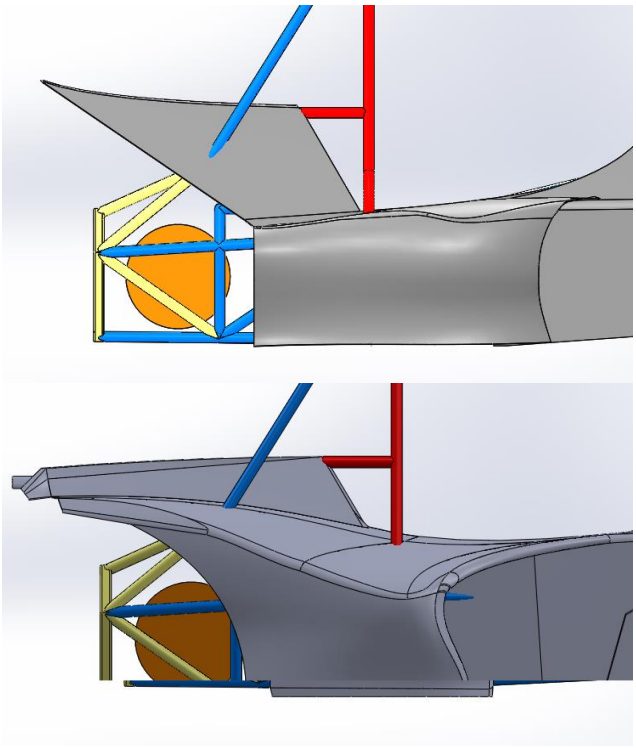
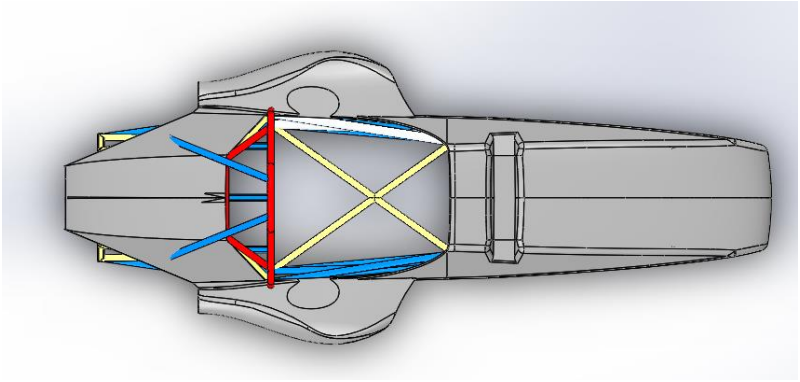


Figura 2.33 Vista lateral de los pontones del segundo y cuarto modelo

Fuente: Autores.

- Debido a que se alarga los pontones para la unión con la tapa posterior, el área superficial será mayor, esto indica que el uso de materiales para la construcción aumentará el peso final de la carrocería, para evitar este problema en el cuarto modelo se corta los pontones con una inclinación lateral, reduciendo el área superficial final de la carrocería. Para el segundo modelo el área total de la superficie de la carrocería es de 3.33 m^2, mientras que para el cuarto modelo el área superficial es de 3.31 m^2



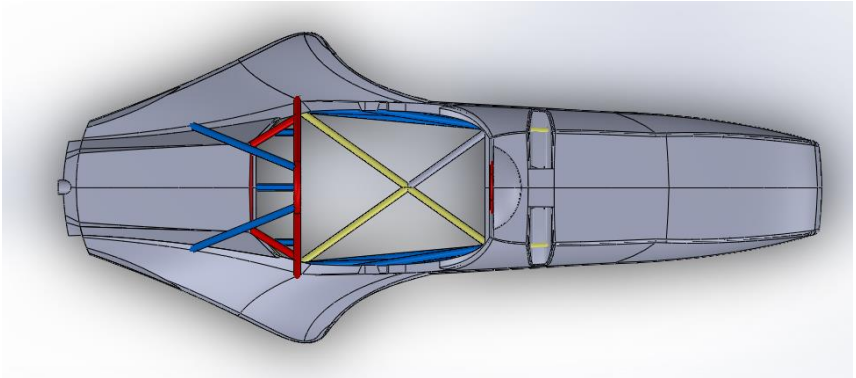


Figura 2.34 Vista superior del segundo y cuarto modelo de la carrocería

Fuente: Autores.

Luego de analizar los parámetros que se consideran para selección del cuarto modelo se observa que este tiene una buena configuración aerodinámica en la geometría, al ser esta más compleja incluso se observa que el área superficial es inferior al segundo modelo, lo que indica un menor peso. Pueda que el coeficiente aerodinámico del segundo modelo sea inferior, pero el cuarto modelo ofrece mejores características aerodinámicas, mayor seguridad en la protección de elementos eléctricos, mejor facilidad de construcción, menor peso e incluso una buena estética.

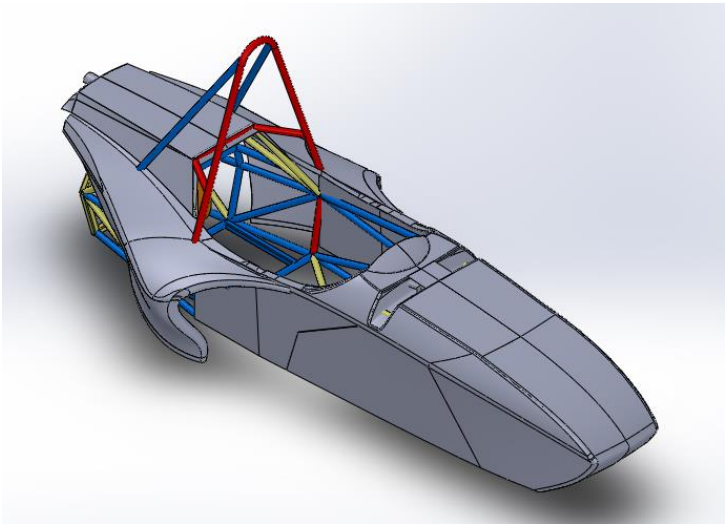


Figura 2.35 Modelo seleccionado para la construcción

Fuente: Autores.

2.5. Estudio Aerodinámico del vehículo con sus subsistemas

Luego de seleccionar el modelo de la carrocería para la manufactura, se realiza un estudio aerodinámico de la misma conjuntamente con los subsistemas del vehículo. Lo más conveniente para el estudio aerodinámico sería que todos los subsistemas del vehículo estén presentes en la simulación, pero el mayor inconveniente para realizar la simulación bajo estas condiciones es el tiempo de resolución y el desgaste computacional que requeriría un ordenador para resolver todas las ecuaciones de la simulación. Debido a la falta de un ordenador que sea capaz de realizar la simulación con todos los elementos del vehículo, se realiza esta únicamente con ciertos elementos que tienen una alta influencia en la aerodinámica. A continuación, en las siguientes figuras se muestra el modelado del vehículo con los siguientes subsistemas: chasis, carrocería, fondo plano, barras de suspensión, barras de dirección, neumáticos, baterías de alto voltaje, firewall y el piloto.

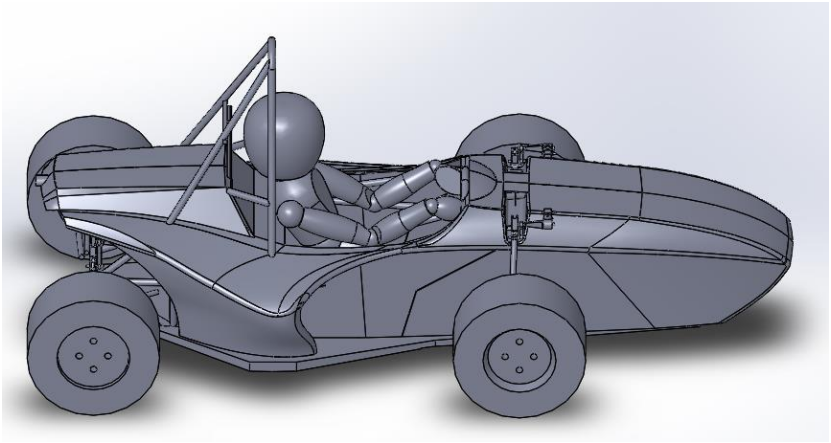


Figura 2.36 Vista lateral del diseño para la simulación

Fuente: Autores.

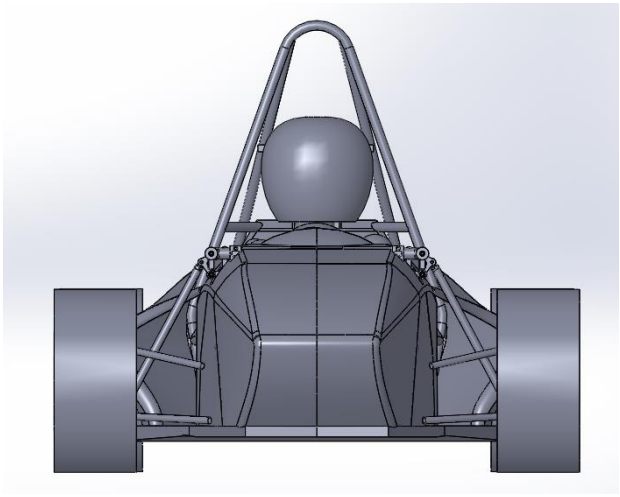


Figura 2.37 Vista frontal del diseño a simular

Fuente: Autores.

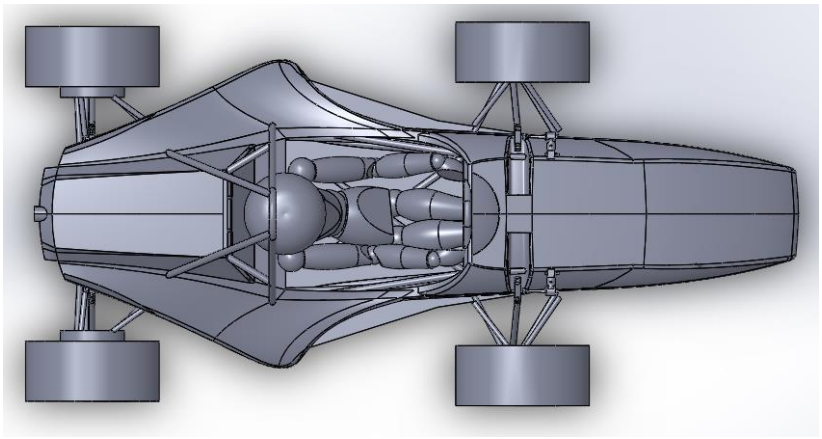


Figura 2.38 Vista superior del diseño a simular

Fuente: Autores.

Para la simulación, como se mencionó anteriormente el desgaste computacional es un parámetro importante, por ello el estudio aerodinámico que a continuación se realiza la simulación únicamente a 80 km/h, se toma este valor ya que para la competencia se solicita el *Design Spec Sheet* a esta velocidad para valores aerodinámicos.

Luego de realizar la simulación CFD se realiza el estudio de los resultados aerodinámicos del vehículo.

2.5.1. Distribución de presión

En el capítulo 1 se describe la presión estática, dinámica y en el punto de estancamiento, estos valores pueden ser calculados mediante la simulación. La presión estática es la misma que la presión atmosférica es decir 101826 Pa. Mientras que la presión dinámica es la que energía que se genera durante todo el trayecto del fluido, la misma se puede calcular mediante la Eq. 1.2. La misma es dividida por el volumen.

$$EC = PD = \frac{\partial * v^2}{2}$$

$$PD = \frac{1.162(Kg/m^3) * (22.22\ m/s)^2}{2}$$

$$PD = 286.55\ Pa$$

Como indica el principio de Bernoulli, la energía total a lo largo del trayecto del fluido es una constante y dependiente de la velocidad. Esta energía total se calcula mediante la Eq. 1.7.

$$H = Pmax = \ P + \frac{\partial * v^2}{2}$$

$$Pmax = 101826\ Pa + \frac{1.162(Kg/m^3) * (22.22\ m/s)^2}{2}$$

$$Pmax = \ 102083\ Pa$$

Esta presión es la presión máxima que se genera en el vehículo, ya que dependiendo de la geometría del vehículo la presión varía a lo largo de este, la presión máxima es la que se genera en los puntos de estancamiento, reducir los puntos de estancamiento es de gran importancia ya que de igual manera se reduce la fuerza de arrastre.

Los valores obtenidos en la simulación se muestran en la siguiente figura.

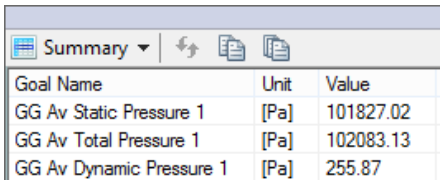


Figura 2.39 Resultados de presiones obtenidas en la simulación

Fuente: Autores.

Los valores calculados y obtenidos en la simulación tienen una pequeña diferencia, esto se debe ya que la simulación trabaja directamente con la geometría del vehículo. Pero los valores no tienen un gran margen de error.

A continuación, en la figura 2.40 se observa la distribución superficial de la presión a lo largo de toda la geometría del vehículo.

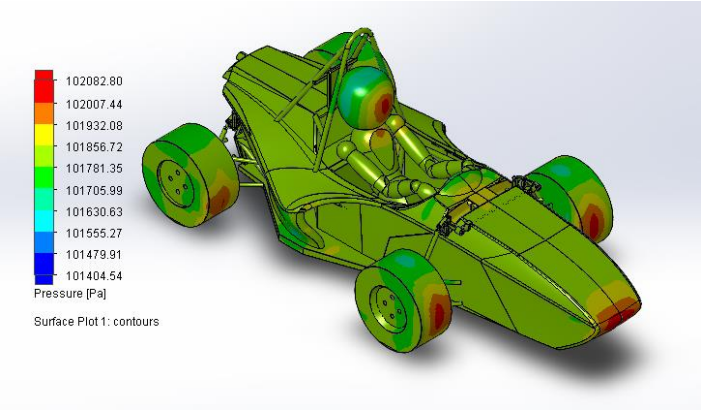


Figura 2.40 Distribución superficial de presión

Fuente: Autores.

Como se observa en la figura 2.40 los puntos de estancamiento se producen en la nariz, neumáticos y casco del conductor, estos puntos de máxima presión se podrían eliminar mediante el uso de alerones para los neumáticos, para el casco del conductor es muy limitante pero se podría crear una geometría que dirija el flujo por encima de este, en el caso de la nariz es muy limitante para una competencia tipo FSAE ya que en el caso de vehículo tipo F1 tienen una apertura en la nariz para eliminar el punto de estancamiento, en el caso de un monoplaza tipo FSAE esta apertura es prohibida por el reglamento ya que prohíbe aperturas desde la nariz hasta la cabina del conductor únicamente permitiendo aperturas para las barras de la suspensión y dirección.

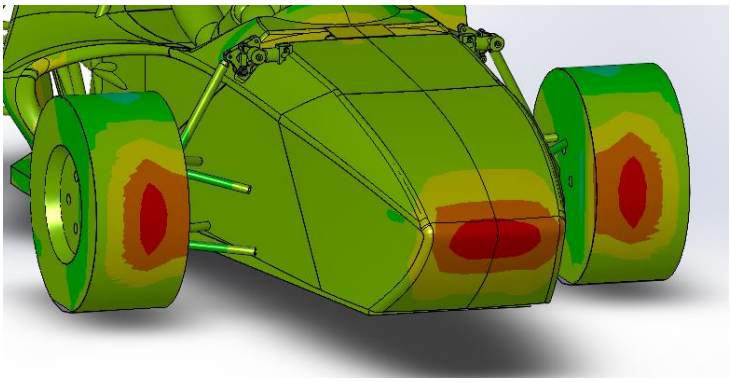


Figura 2.41 Puntos frontales de estancamiento y alta presión

Fuente: Autores.

En la figura 2.41 se observa que el punto de estancamiento en la nariz no tiene una elevada distribución sobre la superficie, esto se debe a la reducción en el área en esta zona.

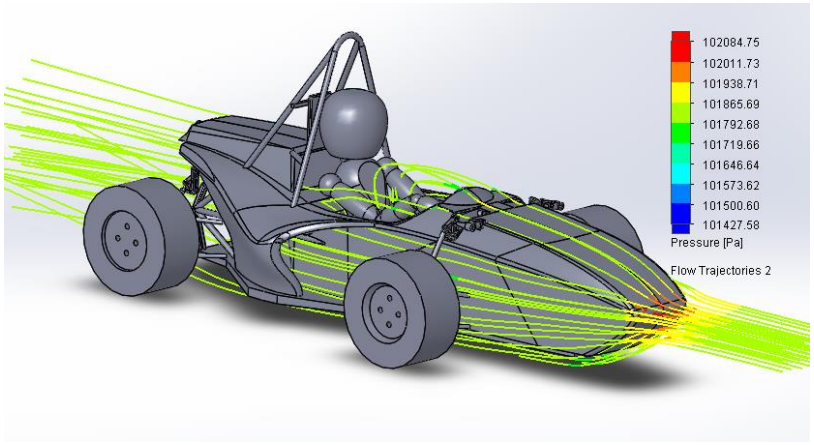


Figura 2.42 Trayectorias de presión en el punto de estancamiento de la nariz

Fuente: Autores.

En las figuras 2.40 y 2.42 la distribución de presión es regular a lo largo de toda la geometría, es decir los cambios de presión no son bruscos y varían en las uniones y cambios de geometría.

2.5.2. Velocidades del fluido a lo largo del vehículo

Las ventajas de realizar una simulación CFD a diferencia de pruebas en un túnel de viento son que en estas se puede generar gráficos de diferentes parámetros y visualizar sobre la superficie del vehículo, a lo largo del mismo y variando el rango

de cada parámetro. Tal es el caso de la velocidad del fluido, conocer las zonas donde la velocidad se reduce es muy importante, así como las de mayor velocidad, porque en estas la presión aumenta o se reduce generando fuerzas de succión.

En la figura a continuación se observa las zonas donde la velocidad baja de 80 km/h a 40 km/h.

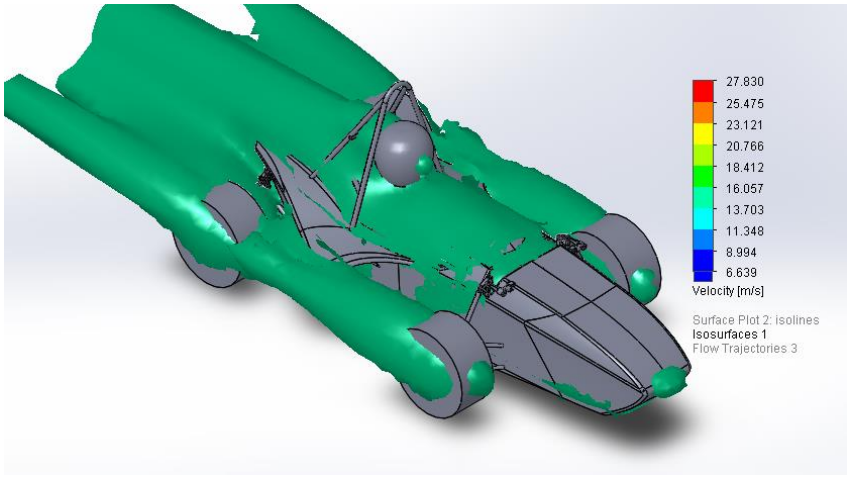


Figura 2.43 Zonas de baja velocidad a lo largo del vehículo

Fuente: Autores.

La velocidad reduce cuando la presión aumenta o cuando la geometría obstruye el paso del flujo, como se observa en la figura 2.43 la velocidad en los neumáticos frontales y la nariz se reduce, pero la presión es máxima en estos puntos. Las zonas de baja velocidad que se generan por detrás de la nariz dependen de la geometría del vehículo.

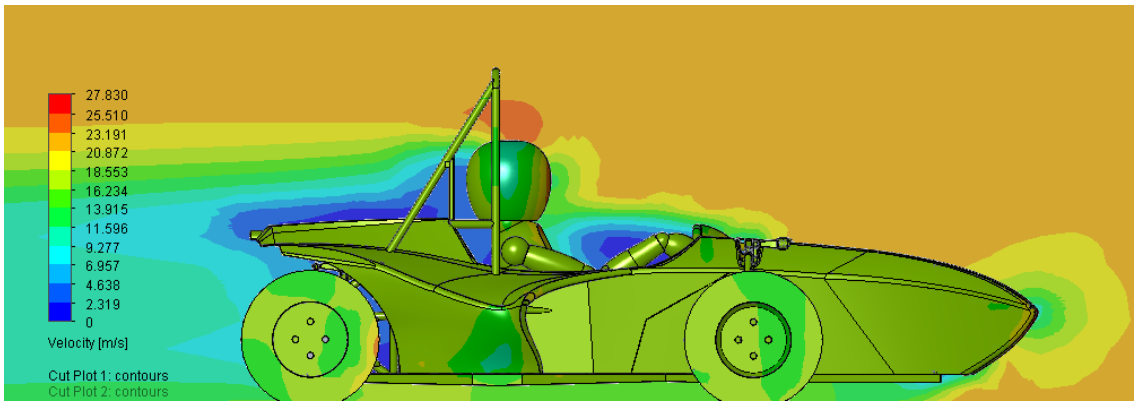


Figura 2.44 Distribución de la velocidad en el plano medio del vehículo

Fuente: Autores

En la figura 2.44 se observa la variación de la velocidad a lo largo del plano medio del vehículo, en la nariz de igual manera se puede observar que la velocidad se reduce en el punto de estancamiento. Lo más conveniente sería que la velocidad aumentará por debajo del vehículo para que se genere *Downforce*, esto se puede generar mediante el uso de difusores y un fondo plano con una buena geometría que genere baja presión.

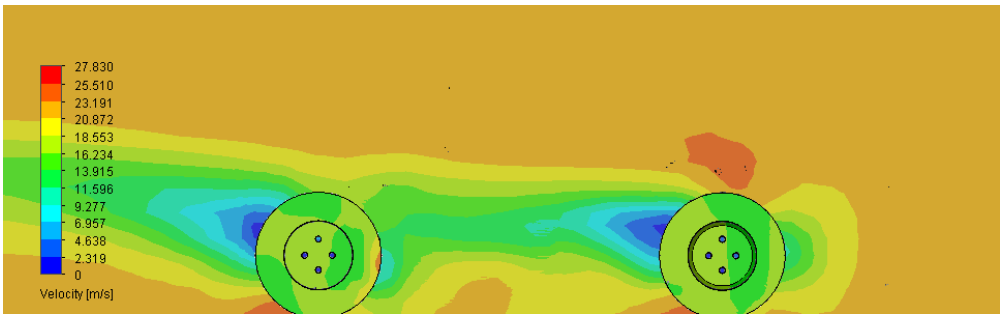


Figura 2.45 Distribución de la velocidad del aire en los neumáticos

Fuente: Autores.

Para la zona en los neumáticos los valores varían mucho en la pista debido a que para la simulación estos permanecen estáticos. Los valores reales varían con respecto a la simulación debido a factores como es el movimiento de los neumáticos.

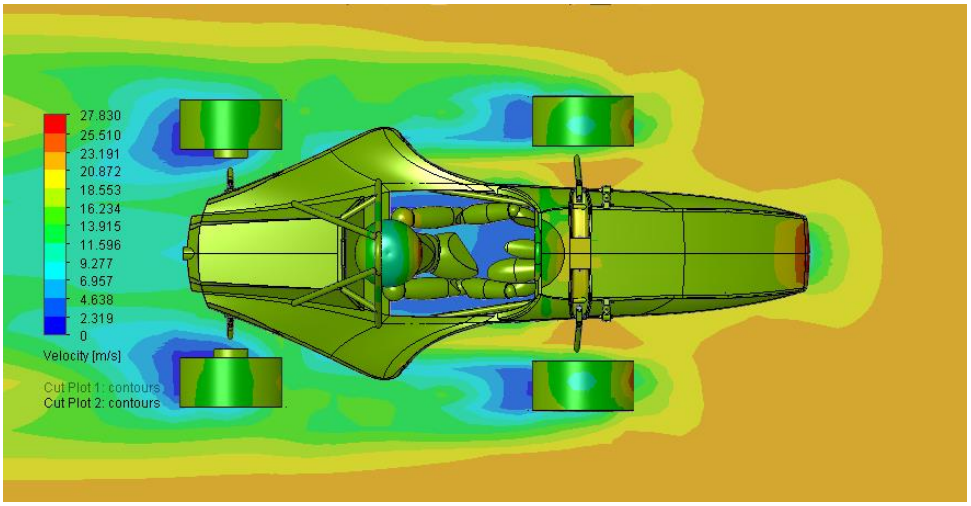


Figura 2.46 Distribución de la velocidad en vista superior con un plano a la altura de la nariz

Fuente: Autores.

2.5.3. Fuerza y coeficientes de arrastre y sustentación

Luego de analizar la distribución de presión, presión máxima, los puntos de estancamiento y las velocidades del fluido a lo largo del vehículo se analiza a continuación la fuerza de arrastre generada por el movimiento dinámico.

De acuerdo a la configuración aerodinámica seccionada en el anexo 2 se tiene los siguientes valores de referencia.

- 0.63 para el coeficiente de arrastre Cx
- 0.29 para el coeficiente de sustentación Cz

Con los valores de referencia primeramente se calcula la fuerza de arrastre F_{xa} y sustentación F_{za} teórica mediante las ecuaciones 1.8 y 1.10. Para el cálculo el área frontal del vehículo es de 0.8267 m^2.

- Fuerza de arrastre.

$$F_{xa} = \frac{1}{2}\left(1.162\,\frac{kg}{m^3}\right)(0.63)(0.8267\ m^2)\left(22.22\,\frac{m}{s}\right)^2$$

$$F_{xa} = 140.15\ N$$

- Fuerza de sustentación.

$$F_{za} = \frac{1}{2}\left(1.162\,\frac{kg}{m^3}\right)(0.29)(0.8267\ m^2)\left(22.22\,\frac{m}{s}\right)^2$$

$$F_{xa} = 64.51\ N$$

Las fuerzas de arrastre y sustentación obtenidas son las necesarias para obtener los coeficientes de arrastre y sustentación teóricos de acuerdo al anexo 2. Los valores más próximos a la realidad que se pueden obtener son los obtenidos en la simulación, en la siguiente figura se muestra los resultados obtenidos.

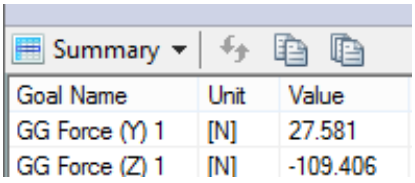


Figura 2.47 Resultados de las fuerzas de arrastre y sustentación simuladas

Fuente: Autores.

Con los valores de la simulación que se muestran en la figura 2.47 se pueden obtener los coeficientes aerodinámicos más próximos del vehículo, el cálculo se realiza mediante las ecuaciones 1.14 y 1.15. En los resultados de la figura 2.47 la fuerza de arrastre está dada en el eje Z, mientras que la de sustentación en el eje Y, esto se debe a la ubicación de los ejes en el modelado del vehículo. El signo negativo en la fuerza de arrastre indica que es una fuerza opuesta al movimiento, para el cálculo se la tomará como positiva. Mientras que la fuerza positiva de sustentación indica que la fuerza no genera una carga adicional hacia abajo.

- Coeficiente de arrastre.

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\partial A v^2}$$

$$C_x = \frac{109.406\ N}{\frac{1}{2}\left(1.162\frac{kg}{m^3}\right)(0.8267\ m^2)\left(22.22\frac{m}{s}\right)^2}$$

$$C_x = 0.421$$

- Coeficiente de sustentación.

$$C_z = \frac{F_z}{\frac{1}{2}\partial A v^2}$$

$$C_z = \frac{27.58\ N\ N}{\frac{1}{2}\left(1.162\frac{kg}{m^3}\right)(0.8267\ m^2)\left(22.22\frac{m}{s}\right)^2}$$

$$C_z = 0.116$$

Los valores obtenidos de los coeficientes aerodinámicos de arrastre y sustentación son inferiores a los teóricos, esto se debe a que las fuerzas obtenidas en la simulación son las más cercanas a l movimiento dinámico real del vehículo. A continuación, en la siguiente tabla se observa los valores reales y teóricos de las fuerzas y coeficientes aerodinámicos del vehículo.

Tabla 2.11 Resultados teóricos y simulados de las fuerzas y coeficientes aerodinámicos

Fuente: Autores.

Valores teóricos	
Coeficiente de arrastre	0,63
Coeficiente de sustentación	0,29
Fuerza de arrastre	140,15 N
Fuerza de sustentación	64,51 N
Valores de simulación	
Fuerza de arrastre	109,4 N
Fuerza de sustentación	27,58 N
Coeficiente de arrastre	0,461
Coeficiente de sustentación	0,116

En la tabla 2.11 se puede observar los valores reales y teóricos del vehículo, según la configuración aerodinámica seleccionada los coeficientes tiene una referencia de un valor óptimo, pero mediante las simulaciones del modelo del vehículo se tiene valores inferiores, esto se debe a la geometría del mismo.

2.5.4. Potencia necesaria para vencer la fuerza aerodinámica

La aerodinámica de un vehículo afecta al rendimiento del mismo, esto se puede verificar mediante diversos análisis entre los más importantes comprobar la carga que este genera y calcular la potencia que el motor necesita para vencer la fuerza aerodinámica. Debido al peso del vehículo el uso de dispositivos aerodinámicos se omitió por lo que la carrocería no genera cargas de sustentación que aumenten la carga, por lo contrario, el cálculo de la potencia necesaria para vender la fuerza que se opone al avance se puede realizar mediante la ecuación 1. 20.

$$P = \frac{1}{2}\partial C_x A v^3$$

$$P = \frac{1}{2}\left(1.162\,\frac{kg}{m^3}\right)(0.461)(0.8267\,m^2)\left(22.22\,\frac{m}{s}\right)^3$$

$$P = 3.27\ KW$$

La potencia del motor necesaria para vencer la fuerza de arrastre que se opone al movimiento del vehículo a 80 km/h es de 3.27 KW, este valor es óptimo ya que es el 4% de la potencia total del motor.

2.6. Descripción aerodinámica del vehículo

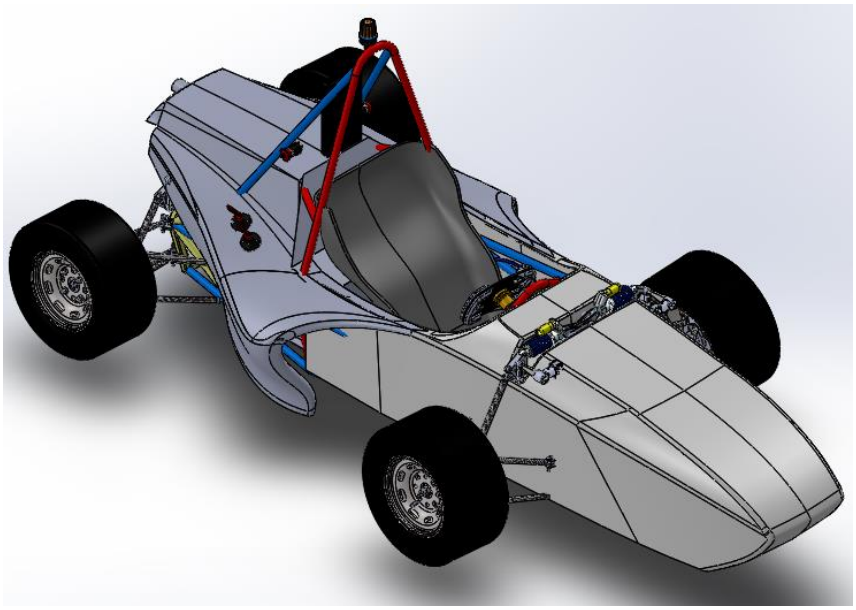


Figura 2.48 Ensamble final del vehículo FSAE E.B. 2017

Fuente: Autores.

Luego de la selección y simulación de la carrocería a utilizar para el proceso de manufactura, se muestran en la siguiente tabla los resultados aerodinámicos del vehículo con sus subsistemas, los mismos son datos obtenidos mediante la simulación del vehículo y datos obtenidos mediante las ecuaciones establecidas en el capítulo I.

Tabla 2.12 Valores aerodinámicos del vehículo a 80 km/h

Fuente: Autores

Simulados	
Especificación	**Valor**
Fuerza de sustentación	+ 27,58 N.
Fuerza de arrastre	109,4 N.
Presión dinámica	255,87 Pa.
Presión estática	101827,02 Pa.
Calculados	
Especificación	**Valor**
Cx	0,4699
Presión dinámica	286,55 Pa
Presión estática	101911,85 Pa
Potencia para vencer fuerza aerodinámica	3,27 KW

Los resultados de la tabla 2.12 muestran una fuerza de sustentación positiva de 27,58 N, el signo indica que no se está generando una carga adicional sobre el vehículo, esto no es ningún inconveniente ya que la fuerza que se genera equivale únicamente a 2.8 Kg. El valor de Cx de 0.4699 es aceptable ya que es inferior al Bosco 1.0 de 0.63 e inferior al esperado según la configuración aerodinámica seleccionada de 0.63. Los valores de presiones para la simulación y calculados tiene un margen de diferencia debido a que la simulación trabaja directamente con la geometría del vehículo en el movimiento dinámico, mientras que el cálculo únicamente considera el movimiento dinámico del fluido. La potencia necesaria para vencer la fuerza aerodinámica es el 4 % de la potencia total del motor.

3. FABRICACION DE LA CARROCERIA

3.1. Introducción

Para la fabricación de la carrocería del vehículo monoplaza eléctrico EB 2017 se realiza la selección de los planos en SolidWorks, como punto de referencia se tiene en cuenta las propiedades de los materiales a utilizar para los diferentes procesos de construcción, se toma en cuenta la resistencia, flexibilidad y peso de los materiales a usar para garantizar la calidad del producto final, no obstante dicha calidad debe respaldarse con un adecuado uso de las herramientas y procesos previamente establecidos que además permita optimizar al máximo el tiempo y los costos de fabricación que harán más o menos idóneo el mismo para su aplicación en cada una de las necesidades de construcción.

3.2. Selección del Material

Para la selección del material apropiado, se realiza una tabla de decisión en la cual se establece características de cada material opcional, la disponibilidad del material, las exigencias estructurales y físicas de los componentes, además del costo en relación al presupuesto que se posea.

3.3. Materiales más utilizados en carrocerías para vehículos Formula SAE

3.3.1. Fibra de Vidrio

Actualmente este material es uno de los más utilizados en el campo automotriz, debido a su fácil manejo, buena resistencia mecánica y menor peso. Además de no necesitar una infraestructura especializada para su proceso de manufactura.

Es muy usual la utilización de la fibra de vidrio en varios equipos participantes en la competencia, esto se debe principalmente a su bajo costo y su relativa facilidad de manufactura.

Existen varios tipos de fibras de vidrio, cada una con diferentes características, como son su constitución y componentes para su respectiva aplicación. A continuación, se detalla algunas clases de fibra utilizadas en la industria automotriz:

- Tipo E: Esta fibra es elaborada a partir de sílice, cal, alúmina y magnesio. Se encuentra destinado a la industria automotriz debido a su alta densidad, buenas cualidades de rigidez, resistencia y desgaste.

Tabla 3.1 Especificaciones técnicas de la fibra de vidrio

Fuente: (Espinoza & Hidalgo, 2016)

Tenacidad (N/tex)	**1,30**
Fuerza a la tracción (MPa)	**3400**
Elongación hasta ruptura (%)	**4,5**
Módulo de Young (GPa)	**70 – 73**

- Tipos S: Se caracteriza por tener una alta resistencia a la tracción, está compuesta por vidrio de aluminio además de magnesio. Además de presentar un costo elevado.
- Tipos ECR: Consta con propiedades eléctricas con resistencia química.
- Tipo R: Es muy utilizado en los sectores de manufactura y aviación debido principalmente a sus buenas prestaciones mecánicas. (Garcia Diez, 2011)
- Tipo Advandex: Representa una modificación del vidrio ECR con una proporción muy baja de óxidos alcalinos y propiedades fisicoquímicas mejoradas.

Tabla 3.2 Propiedades de Fibras de Vidrio Seleccionadas

Fuente: (Richter, 2010)

	Fibra de vidrio				
Propiedades	**Vidrio E**	**Vidrio R**	**Vidrio ECR**	**Advantex**	**Vidrio S**
Densidad (kg/m2)	2620	2550	2670	2626,0	2480
Coeficiente de dilatación (K)	$5{,}4\ 10^{-6}$	$5{,}1\ 10^{-6}$	$5{,}9\ 10^{-6}$	$5{,}4\ 10^{-6}$	$6{,}0\ 10^{-6}$
Viscosidad:	3450			3500	
Resistencia a la tracción	72,0	3400	3450	81,0	4890
Módulo de elasticidad		85,0	72,0		87,0

Es uno de los materiales más abundantes, en la industria automotriz es uno de los materiales más utilizados debido sus características mecánicas, bajo costo y su capacidad de ser reutilizado sin perder sus características mecánicas. Se emplea para la construcción de elementos en todo tipo de vehículos, debido a que es muy ligero y accesible. Pero su aplicación en la construcción de carrocerías presenta dificultades, debido principalmente a las geometrías complejas de un vehículo. Para un proceso de manufactura de la carrocería de vehículos fórmula SAE con este material, resulta muy complejo al requerir maquinas especializadas para su manipulación.

Tabla 3.3 Propiedades del Aluminio

Fuente: (Fernandes, 2005)

Propiedades	Aluminio
Punto de Fusión (C)	660
Densidad (g/cm3)	2.7
Coeficiente de Poission	0.345
Limite Elástico (MPa)	Duro ≥ 1. -35
	Blando ≥ 110 – 170
Módulo Elástico (GPa)	70.6

3.3.2. Fibra de carbono

La fibra de carbono es producto de la síntesis química que consiste en la obtención de compuestos químicos partiendo de sustancias más simple. El hilo o tejidos de fibra son combinados con un epoxi y es capaz de adherirse y moldearse para dar forma a varios tipos de materiales compuestos.

Las fibras de carbono son clasificadas de acuerdo a los módulos de tensión de las fibras. Este módulo es una medida que cuantifica la fuerza de acuerdo a los módulos de tensión de las fibras, tiene muchas aplicaciones en la industria aeronáutica y automovilística, debido a que presenta una elevada resistencia mecánica, baja densidad en comparación con elementos metálicos, elevada resistencia a agente externos y una gran capacidad de aislamiento térmico. (Fernandez, 2014)

Una de las dificultades que presenta este material para la implementación de la carrocería es su complejo proceso de manufactura, para lo que se requiere de equipos especializados lo cual aumenta el costo final de producción.

Propiedad	Fibras SM[a]	Fibras SM[b]	Fibras IM[b]	Fibras HM[b]
Contenido en carbono (%)	95	95	95	>99
Diámetro de la fibra (μm)	6-8	6-8	5-6	5-8
Densidad (gtm)	1,8	1,8	1,8	1,9
Módulo de Young (GPa)	228	220-241	290-297	345-448
Resistencia a la tracción (MPa)	3800	3450-4830	3450-6200	3450-5520
Alargamiento a la rotura (%)	1,6	1,5-2,2	1,3-2,0	0,7-1,0
Resistividad eléctrica (μ_cm)	1650	1650	1450	900
Conductividad térmica (W/m.K)	20	20	20	50-80

Figura 3.1 Valores de Propiedades para Fibra de Carbono

Fuente: (Alcaraz Lorente, 2007)

3.3.3. Matriz de selección

Para la elección del material a utilizarse en la carrocería, se realiza una matriz de decisión en la cual se evalúa las características principales de cada material, con la finalidad de identificar la factibilidad de construcción. Se considera una serie de parámetros en base al proceso de manufactura como es los métodos de construcción, la disponibilidad y costos en función del presupuesto.

La matriz de decisión consta de valores de ponderación, con la finalidad de tener un análisis cuantitativo, estos valores son dados en base a lo analizado y la experiencia adquirida en el medio por personas que trabajan con estos materiales.

Tabla 3.4 Matriz de Decisión

Fuente: Autores.

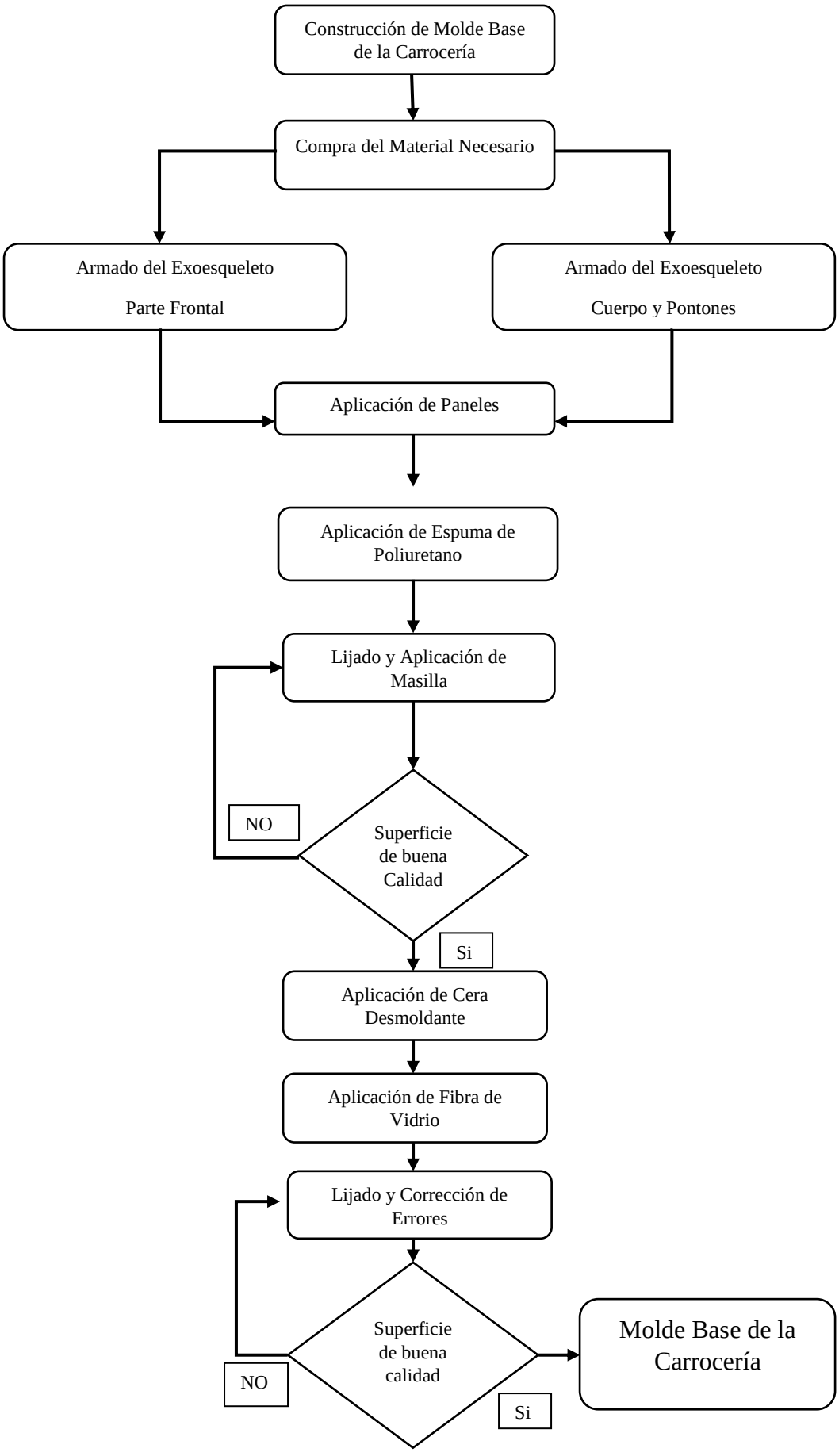
Características	Factor de Ponderación	Fibra de Vidrio		Aluminio		Fibra de carbono	
Costo	0,2	5	1	3	0,6	1	0,2
Resistencia Mecánica	0,3	3	0,9	5	1,5	5	1,5
Rugosidad	0,1	4	0,4	4	0,4	4	0,4
Manufactura	0,3	5	1,5	1	0,3	1	0,3
Corrosión	0,1	4	0,4	4	0,4	5	0,5
Total	1		4,2		3,2		2,9

El valor más alto le corresponde a la fibra de vidrio con 4.2, y por lo que es el material más idóneo para la construcción de la carrocería.

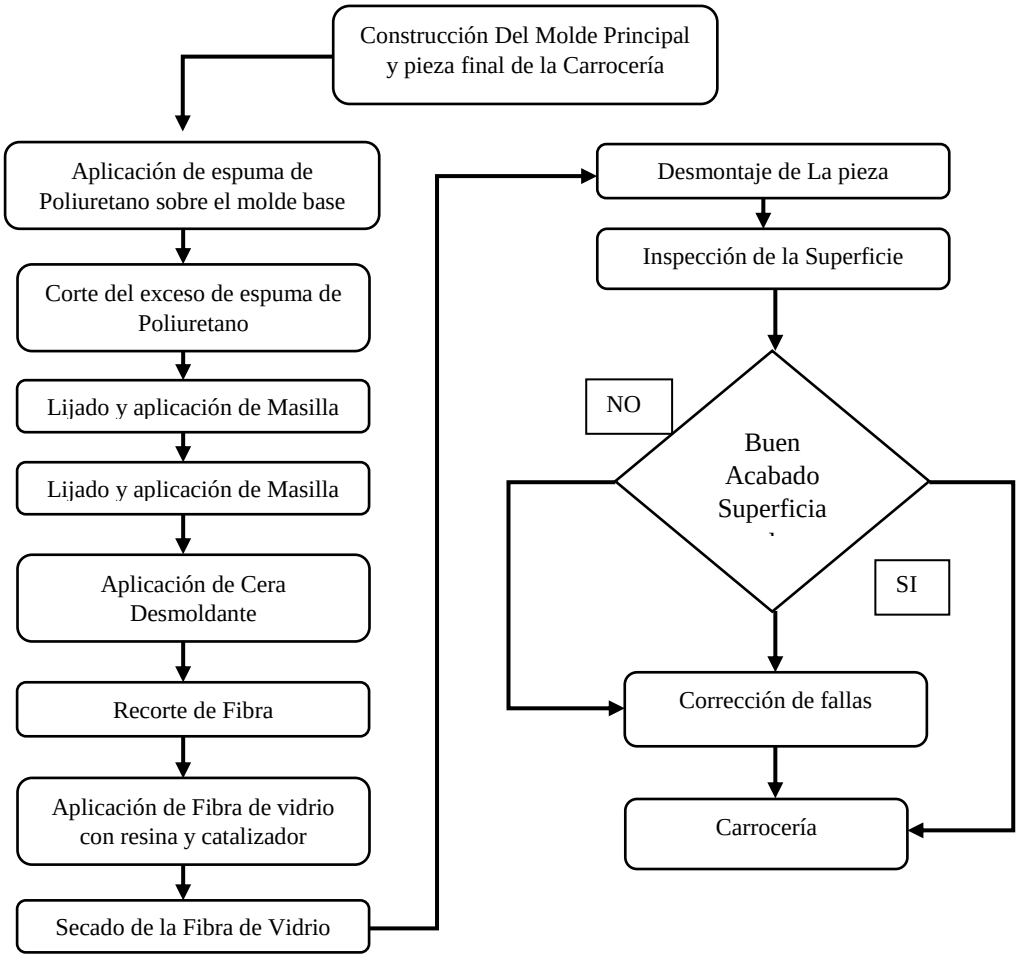
Una vez seleccionado el material, se establece las diferentes partes que conforma la carrocería, las mismas deben tener una estructura acorde a las necesidades del reglamento formula SAE 2017.

3.4. Diagramas de Procesos

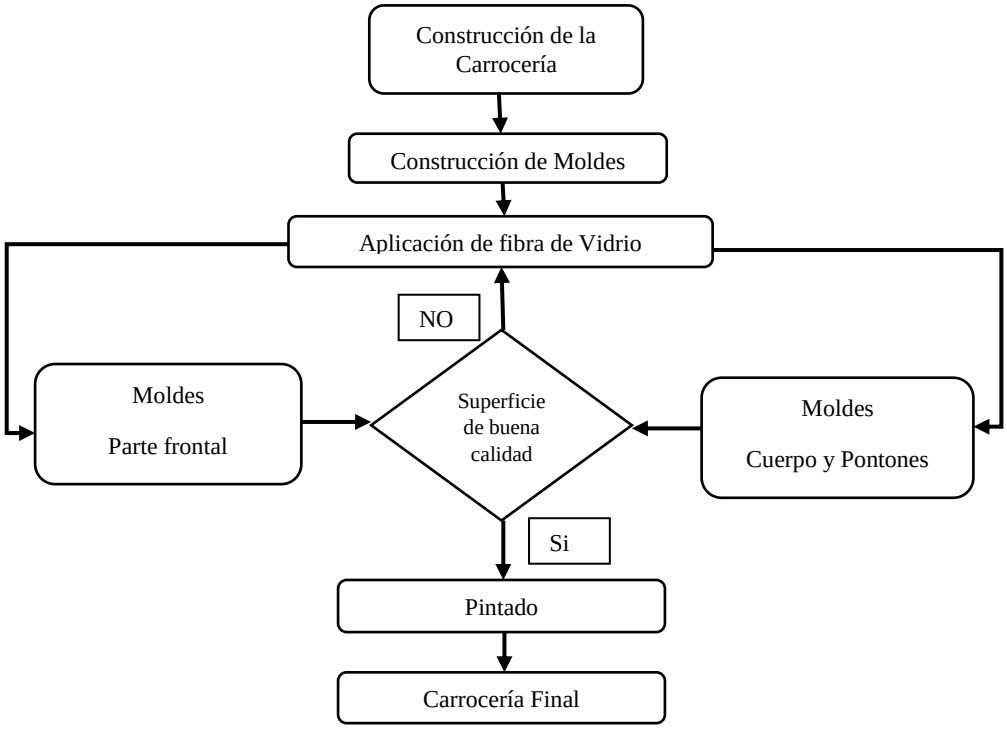
- **Construcción de Moldes Base de la Carrocería**



- **Construcción del Molde Principal y Pieza Final**



- **Construcción de la carrocería**



3.5. Construcción del Exoesqueleto

Para la construcción del exoesqueleto se lo realiza por partes como son: parte frontal, en referencia a la nariz, posteriormente el cuerpo y pontones del vehículo los cuales constan de una geometría y dimensión mayor en comparación a la parte delantera. Se estableció un proceso de construcción el cual consta de los siguientes pasos:

3.5.1. Selección de planos

A partir de la selección del diseño final del vehículo, se establece una división del diseño cada 150 mm el cual se obtiene un perfil como referencia, con la finalidad de obtener la mayor precisión posible y evitar un sobredimensionamiento en la obtención de la pieza final como se muestra en figura 3.2

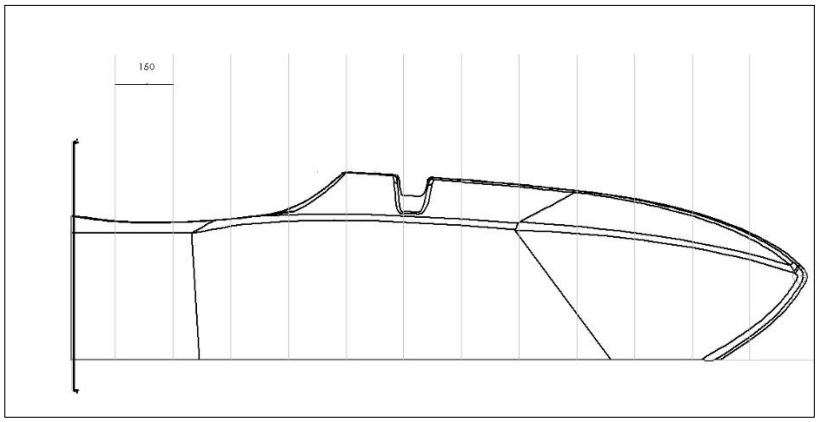


Figura 3.2 División de la parte delantera

Fuente: Autores.

A continuación, se realiza el mismo proceso de división en la pieza correspondiente a los pontones, como se observa en la figura 3.3

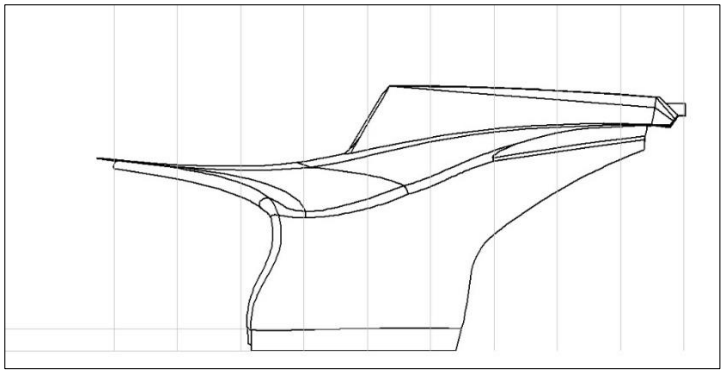


Figura 3.3 División de la parte posterior (Pontones)

Fuente: Autores.

3.5.2. Proceso de corte de planos

El material MDF de 3 mm fue seleccionado para los cortes del exoesqueleto, el cual nos ayuda a la definición de la geometría de la carrocería, se debe tomar en cuenta la simetría de cada uno de los recortes y mantener un punto de referencia en el armado del mismo.

3.5.3. Proceso de Armado del exoesqueleto

En dicho proceso debemos tener en cuenta el nivel de cada uno de los cortes, así garantizamos que las medidas finales son las especificadas en el programa SolidWorks, para lo cual la superficie de trabajo debe ser completamente plana.

Figura 3.4 Base del Exoesqueleto

Fuente: Autores.

A continuación, se observa cómo se realiza la colocación de los cortes previamente seleccionados, en la figura 3.4 se observa la distancia a la cual se establece la colocación de cada uno de los cortes del exoesqueleto, tanto de la parte frontal, como la parte posterior, a continuación se procede a verificar su simetría en referencia a sus marcas de referencia véase las figuras 3.5 y 3.6.

Figura 3.5 Exoesqueleto (Parte Frontal)

Fuente: Autores.

La unión de los cortes se lo realiza bajo presión en la distancia marcada de guía, con la finalidad de obtener firmeza en el exoesqueleto para los posteriores procesos.

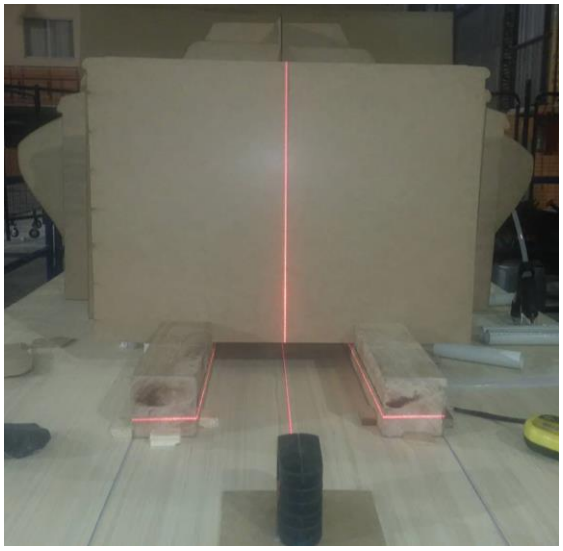


Figura 3.6 Exoesqueleto (Cuerpo y Pontones)

Fuente: Autores.

3.6. Proceso de Fabricación de Moldes (Nariz)

Una vez conformado el montaje del exoesqueleto se procede con la implementación de cada uno de los materiales que darán la forma de la parte frontal del vehículo monoplaza.

3.6.1. Primer Negativo - Molde Base

3.6.1.1. Aplicación de paneles

Para la obtención del molde base de la nariz se procede a la unión de los paneles superior y lateral, para la cual se optó por el ensamble mediante trozos de alambre en diferentes zonas de contacto con el exoesqueleto.

3.6.1.2. Aplicación de espuma de Poliuretano

Una vez conformado el montaje de los paneles principales se procede a la unión de las curvas de la parte frontal y laterales mediante la aplicación de espuma poliuretano como se muestra en la figura 3.7 con la finalidad de dar el diseño final de la pieza.

Figura 3.7. Aplicación de espuma de poliuretano

Fuente: Autores

3.6.1.3. Pulido y acabado del Molde Base

Como parte final del proceso de fabricación de la parte delantera de la carrocería, se procede a retirar el material excedente de poliuretano en las partes aplicado hasta obtener la superficie de la curva deseada.

Figura 3.8. Aplicación de Masilla (Parte Frontal)

Fuente: Autores.

Para continuar con el proceso, se aplica la primera capa de masilla sobre la superficie como se muestra en la figura 3.8; se debe tiene en cuenta la cantina necesaria de masilla con la finalidad de obtener un capa firme y robusta, además de mantener la curvatura de la pieza, el tiempo de secado de la masilla es aproximadamente de 15 minutos. Posteriormente se retira el material excedente de masilla utilizando la pulidora, iniciamos con el desbasto del material con una lija número A80 por toda la superficie aplicada como se muestra en la figura 3.9, se debe seguir el mismo proceso de desbasto con lijas número (A120, A160, A200).

Figura 3.9. Pulido de la Superficie

Fuente: Autores**.**

En la parte final de cada pulido se debe realizar una inspección final de la superficie, con la finalidad de detectar puntos de falla en los que puede variar la superficie de la pieza y proceder a la corrección, rellenar con masilla en caso de ser necesario o pulido de la zona en la que se encuentren desperfectos, ya que el molde base es la parte principal para que el acabado del molde principal y el proceso de fabricación en fibra de vidrio se pueda llevar acabo. A continuación, se aplica una capa de pintura automotriz sobre toda la superficie de la pieza frontal.

En la figura 3.10 se muestra el molde base acabado.

Figura 3.10. Molde base (Nariz)

Fuente: Autores**.**

3.6.2. Primer Positivo - Molde Principal

A continuación, se detalla el proceso de obtención del molde principal el cual es en su totalidad en fibra de vidrio, el acabado final de la superficie debe ser idóneo para la obtención de la pieza final de la carrocería, se especifica los siguientes pasos:

3.6.2.1. Recorte de la Fibra de Vidrio

Posteriormente, se realizan cortes de cada parte lateral y frontal de la pieza, con la finalidad de evitar excesos y tener un mejor manejo de la fibra recortada.

3.6.2.2. Aplicación de Cera Desmoldante

Para la obtención del molde principal, la superficie debe estar libre de impurezas, para lo cual se realiza una limpieza en toda la superficie. La aplicación de cera desmoldante se la realiza por toda la superficie de la pieza.

La cera desmoldante tiene como finalidad permitir un fácil desprendimiento del molde en el proceso de desmontaje, se debe aplicar tres capas de cera, cada una con un intervalo de 5 min.

Posteriormente se procede a aplicar dos capas de gelcoat sobre la superficie en la que se aplicó la cera desmoldante con un intervalo de 10 minutos, el cual ayudara a la separación de las piezas y permitir un mejor acabado superficial.

3.6.2.3. Aplicación de la Fibra de Vidrio

En este punto del proceso de fabricación se toma en cuenta la correcta aplicación de la resina en la fibra de vidrio, para lo cual se toma como referencia los valores de mezcla en función del área de las capas de fibra de vidrio como se establece en la hoja de procesos que se encuentra en el anexo 3.

Se inicia con la colocación de cortes de fibra sobre la superficie, para lo cual se estableció la implementación de 2 capas de fibra tipo Mat y una capa de fibra tipo Woven Roving, con la finalidad de conseguir un molde resistente y fácil de desmontar. Al aplicar la resina, se lo debe realizar por partes y con un tiempo de

secado de 30 min, con esto se garantiza que no existirán puntos de acumulación de resina. El tiempo curación es de 24 horas, en el cual se obtiene un secado completo e uniforme de la resina aplicada.

3.6.2.4. Desmolde del Molde Principal

Debido a la geometría que presenta la parte delantera, es necesario el desmontaje por partes de molde base con la finalidad de mantener intacto el molde principal en fibra de vidrio.

3.6.3. Segundo Positivo – Pieza Final

3.6.3.1. Pulido y acabado del Molde Principal

Una vez obtenido el molde principal en fibra de vidrio, se realiza la limpieza mediante lavado y lija de pulido, la corrección de desperfectos se realiza con masilla. El molde principal debe tener el mejor acabado superficial posible ya que este establece el acabado superficial de la pieza final de la parte frontal.

3.6.3.2. Recorte de la Fibra de Vidrio

Bajo el mismo proceso de fabricación anterior, el recorte de los retazos está en fusión de la figura de la pieza, para lo cual se utilizarán dos capas de fibra de vidrio tipo Mat.

3.6.3.3. Aplicación de Cera Desmoldante

Con la superficie completamente pulida, se procede a una verificación visual de la superficie con la finalidad de determinar algún desperfecto en la misma para su posterior corrección.

Se aplica 3 capas de cera desmoldante sobre la pieza, cada una de las capas con un intervalo de tiempo de 5 min. Luego se aplica dos capas de Gelcoat con un intervalo de tiempo de 10 minutos de secado. Véase la figura 3.11.

Figura 3.11. Aplicación de Gelcoat en la cara lateral de la pieza

Fuente: Autores.

3.6.3.4. Aplicación de la Fibra de Vidrio

Para la aplicación de fibra de vidrio se realiza el mismo procedimiento que en lo molde principal, al aplicar dos capas de fibra de vidrio tipo MAT se puede garantizar un excelente acabado superficial, al aplicar la primera capa de fibra de vidrio se deja un excedente sobre el molde, el cual puede ser útil para el proceso de construcción de la pieza y corrección de errores. El tiempo de secado es de 10 a 15 minutos, como se muestra en la figura 3.12.

Se coloca de la misma manera los recortes de fibra de vidrio para la segunda capa sobre la cara lateral izquierda de la pieza teniendo en cuenta los 10 minutos de curado de la resina para evitar su posterior acumulación. A continuación, se realiza el mismo proceso sobre la cara lateral derecha y finalmente sobre la cara superior. Con la utilización de 2 capas de fibra de vidrio se logra una reducción significativa del peso debido a que se utiliza una cantidad menor de resina en el proceso.

Figura 3.12. Aplicación de capas de fibra de vidrio en la cara superior

Fuente: Autores**.**

En tiempo de curado de la pieza total es de 24 horas.

3.6.3.5. Desmolde de la Pieza Final

Para el proceso de desmolde, se debe garantizar que en la pieza final no exista fisuras o algún otro tipo de desperfecto sobre la superficie. Para lo que es recomendable utilizar los bordes medios y traseros en los cuales su superficie es más extensa y plana que permiten seguridad en la extracción.

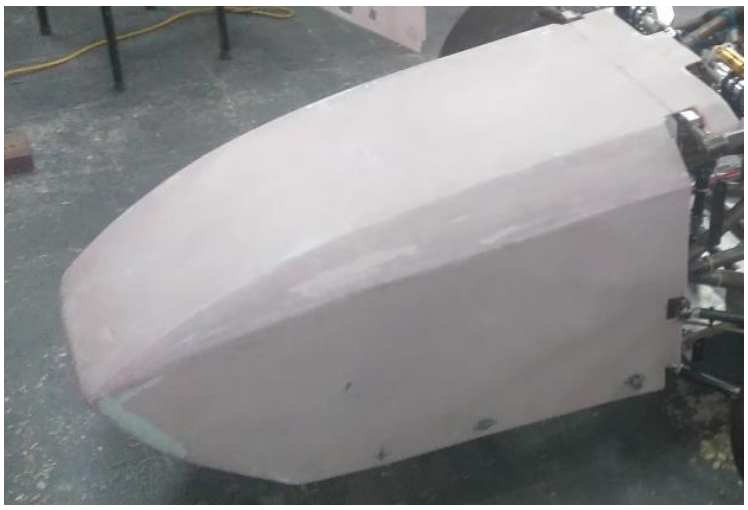


Figura 3.13. Parte Frontal (Nariz)

Fuente: Autores.

3.7. Proceso de Fabricación de Moldes (Cuerpo y Pontones)

3.7.1. Primer Negativo - Molde Base

A continuación, se realiza el proceso de manufactura utilizado, para la obtención del molde base para el cuerpo y pintones del vehículo monoplaza.

3.7.1.1. Aplicación de paneles

Al obtener el exoesqueleto del cuerpo y patones, se realiza el montaje del panel superior y lateral del molde, el cual corresponde al diseño de entrada y salida de aire de los pontones, en la figura 3.14, se muestra el anclaje de los paneles mediante alambre y pegamento.

Figura 3.14. Anclaje de paneles por medio de retazos de alambre

Fuente: Autores

3.7.1.2. Aplicación de espuma de poliuretano

La aplicación de la espuma tiene como finalidad, permitir una base rígida en la cual se regirá la forma de los pontones. En la figura 3.15, como se realiza en el primer proceso de manufactura de la parte frontal, se aplica espuma de poliuretano en cada una de las cavidades.

Figura 3.15. Aplicación Espuma De Poliuretano

Fuente: Autores

Se debe retirar el exceso de espuma, teniendo en cuenta la forma básica de los pontones.

3.7.1.3. Pulido y acabado del Molde Base

A continuación, se aplica masilla sobre la superficie lateral de la pieza. Siguiendo el proceso de la parte frontal, la masilia se aplica por capaz, como se muestra en la figura 3.16.

Figura 3.16. Primera capa de Masilla

Fuente: Autores.

Al finalizar la aplicación cada una de ellas existe un tiempo de secado, el cual es de 30 minutos con la cantidad de secante recomendada por el fabricante. Se debe tener en cuenta la curvatura de la geometría y su simetría, posterior a ello se retira el material excedente de masilla.

Figura 3.17. Inspección visual derecha de la pieza

Fuente: Autores.

Posterior al lijado de cada una de las capas de masilla, se realiza una inspección de la pieza, en la cual se debe marcar los puntos en la que es necesaria la aplicación o remoción de masilla. Véase la figura 3.17.

Al obtener la figura y simetría deseada se debe pulir la pieza, con la finalidad de obtener una superficie constante y libre de imperfecciones. Se aplica una capa de

pintura automotriz sobre toda la superficie con la finalidad de obtener un buen acabado superficial.

Figura 3.18. Molde Base (Pontones)

Fuente: Autores.

3.7.2. Primer Positivo - Molde Principal

3.7.2.1. Recorte de Fibra de Vidrio

Al igual que el proceso de la parte frontal de la carrocería, los recortes de fibra de vidrio deben contar con las medidas adecuadas, evitando así excesos y un mejor manejo posterior del material.

3.7.2.2. Aplicación de Cera Desmoldante

Para la continuación del proceso, se realiza una limpieza previa de la pieza para eliminar impurezas en la superficie. A continuación, se aplica 3 capas de cera Desmoldante sobre la superficie obteniendo un espesor aproximado de 3 mm, cada capa consta con un intervalo de 5 min de secado.

3.7.2.3. Aplicación de Fibra de Vidrio

Siguiendo el mismo proceso de manufactura para la parte frontal, se adiciona una capa de Gelcoat a la superficie, con un tiempo de secado de 15 min. Al realizar la mezcla de resina se tiene en cuenta la cantidad a utilizar en fusión del número de capas de fibra implementadas. (Morales, 2008)

Con un tiempo de secado de 24 horas, obteniendo un secado uniforme de la resina.

3.7.2.4. Desmolde del Molde Principal

Debido a la complejidad de la geometría, el desmolde se realiza por partes, con la finalidad de garantizar el acabado superficial de la pieza principal.

3.7.3. Segundo Positivo – Pieza Final

3.7.3.1. Pulido y acabado del Molde Principal

Al obtener el molde principal, se realiza una limpieza de la superficie del molde, eliminando impurezas y corregir irregularidades. A continuación, es necesario limpiar la pieza con una lija de pulido y agua para obtener una superficie completamente lisa, ya que debido al proceso de manufactura se encuentran impurezas y suciedad.

3.7.3.2. Recorte de la Fibra de Vidrio

Al tratarse de la pieza final, los cortes en fibra de vidrio se realizan por secciones, refiriéndose así a los retazos de fibra en función de la longitud del tramo de superficie, con la finalidad de disminuir la cantidad de fibra utilizada.

3.7.3.3. Aplicación de Cera Desmoldante

Al igual que el proceso anterior, se aplica tres capas de cera desmoldante en la superficie, con el tiempo de secado especificado en el anexo 2. A continuación se aplica una capa de gelcoat sobre la superficie interna del molde principal (zona en la

que se obtendrá la pieza definitiva) donde el gelcoat se debe extender hasta cubrir el área por completo, como se muestra en la figura 3.19 y 3.20.

Figura 3.19. Aplicación de Gelcoat en la parte lateral (Pontones)

Fuente: Autores.

Figura 3.20. Aplicación de Gelcoat en la parte central (Pontones)

Fuente: Autores.

3.7.3.4. Aplicación de la Fibra de Vidrio

Se recorta las formas de fibra de vidrio de los diferentes paneles de la pieza, se debe mantener en cuenta que es una superficie de aristas vivas, la unión en diferentes zonas del panel superior, lateral presentan dificultad de unión. Provocando acumulación de resina y burbujas en las capas de fibra aplicadas.

Posteriormente se aplica los recortes, comenzando por la superficie del panel superior y seguidamente se coloca el panel lateral, entrelazando con la fibra del panel superior.

Figura 3.21. Secado de la primera capa de fibra de vidrio

Fuente: Autores.

Se procede con el montaje de la segunda capa de fibra de vidrio, luego de haber transcurrido 30 minutos de secado de la primera, el tiempo para el curado de la resina es de 24 horas, con el cual adquiere endurecimiento y rigidez. Véase las figuras 3.22 y 3.23.

Figura 3.22. Secado de la segunda capa de Fibra de vidrio

Fuente: Autores.

3.7.3.5. Desmolde de la Pieza Final

Una vez finalizado el proceso anterior mencionado, se debe extraer la pieza final del molde principal. Se realiza el recorte de los excedentes de fibra de vidrio de cada uno de los bordes. Al obtener la pieza final, se realiza una inspección visual de la misma, con la finalidad identificar imperfecciones en la superficie para su posterior corrección.

Figura 3.23. Pontones

Fuente: Autores.

3.7.3.6. Proceso de Pintura

Se inicia con una limpieza y revisión de desperfectos sobre la superficie de la pieza, con la finalidad de eliminar el polvo y suciedad presentes. Se implementa dos capas de fondo automotriz gris sobre toda la superficie, de tal forma que esto facilitara la unión de la pintura. Como se muestra en la figura 3.24 y 3.25.

Figura 3.24. Aplicación de La base de Pintura (Pontones)

Fuente: Autores.

Pasando un tiempo de 45 minutos después de la aplicación de la primera capa, se realiza la implementación de la segunda capa, teniendo en cuenta las pequeñas zonas con mayor inclinación. Además de asegurar un espesor mínimo de 3 mm en la superficie.

Figura 3.25. Aplicación de La base de Pintura (Parte Frontal)

Fuente: Autores.

Al tratarse de un proceso de pintura por medio de un horno térmico, se aplica dos capas de pintura sobre la superficie de las piezas, cada una con un intervalo de 6 horas de aplicación, de igual manera el tiempo que la pieza permanece en el horno es de 24, con la finalidad de garantizar un excelente acabado superficial.

El pulido es el proceso final de pintura, ayuda a eliminar imperfecciones de la superficie dando un acabado espejo.

Figura 3.26. Piezas Terminadas

Fuente: Autores.

3.8. Anclaje al chasis

Los puntos de fijación de la carrocería tienen la finalidad de mantener de una forma fija a la estructura sobre el chasis, para lo cual debe cumplir las siguientes consideraciones:

- Debe mantener un fácil desacople
- No deben existir bordes que sobresalgan sobre los puntos de fijación
- Los pernos o tornillos de tipo Allen debe tener un mínimo de 2 hilos de rosca completo que se proyecta desde cualquier tuerca de bloqueo. (International, fsaeonline , 2017)

Para el anclaje de la carrocería se implementa sujetadores (Fasteners) de ¼ de vuelta, los mismos que son importados. Este tipo de sujetadores son muy utilizados en la industria automotriz para la fijación de partes de carrocerías, además de aportar un menor tiempo de desmontaje de las piezas e igual presión que un perno normal, manteniendo completamente fija a toda la carrocería.

Figura 3.27. Sujetador de 1/4 de vuelta con expulsión automática (5/16 Diam x 0.92 de longitud)

Fuente: (Racing, 2016)

3.9. Costos de manufactura

Para la manufactura de la carrocería del vehículo de competencia formula SAE en fibra de vidrio, se toma en cuenta los procesos de manufactura llevados a cabo en fibra de vidrio, estos pueden variar en función de cada proceso.

3.9.1. Costos directos

Se refieren directamente a los gastos derivados a la compra de materia prima, mano de obra y equipos necesarios para el proceso de manufactura. En la tabla 3 se enlista dichos materiales:

Tabla 3.5. Lista de Materiales

Fuente: Autores.

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo [USD]
Plancha Mdf de 3 mm	4	-	52,00
Resina 33000	60	Kg.	204,00
Estireno Monómero	40	Kg.	132,00
Peróxido de Mek	1	Kg.	8,00
Talco Chino	50	Kg.	37,50
Cobalto	1	Kg.	20,00
Espuma de poliuretano en aerosol	8	-	113,36
Espátula Platica 3”	4	-	5,05
Espátula Plástica 8”	2	-	4,74
Alambre Galvanizado	2	Rollo	4,32
Brocha Wilson Premier 2”	15	-	35,26
Espátula Flexible	2	-	8,28
Mono gafa Ventilación Directa	6	-	26,26
Desmoldante	4	-	16,00
Disolvente de laca Alcohol	144	Kg.	201,60
Evercoat masilla	4	Gal	71,44
Disco de corte piedra	2	-	1,60

Barniz 7100 SW ¼	1	-	7,56
Catalizador 071	1	-	3,48
Fondo 710 Sherwin William 785	1	-	6,79
Thinner 680	1	Gal	12,18
Lijadora Roto Crbiral Dewalt 275W	1	-	128,20
Pistola de calor Bosch 1500W	1	-	187,41
Total			1287,03

Para obtener los costos de cada equipo se especifica los de mayor relevancia, además dichos valores pueden variar en función de cada proceso.

Tabla 3.6. Equipos y Asesoría

Fuente: Autores.

Equipo	Costo por Hora	Horas	Costo [USD]
Amoladora	0,5	15	7,5
Horno de Pintura			250
Asesoría Externa	6,25	40	250
Mano de Obra	2	300	600
Total			1107,5

3.9.2. Costos Indirectos

Estos costos no afectan directamente el presupuesto de manufactura de la carrocería, pero se encuentran incluidos en el desarrollo.

Tabla 3.7. Costos indirectos

Fuente: Autores.

Descripción	Costo [USD]
Movilización	35,00
Encuadernación	110,00
Imprevistos	100,00
Total	**245,00**

3.9.3. Costo Total

El costo total de manufactura, es el resultado de la suma total de gastos, lo cual representa el valor de la carrocería para el vehículo monoplaza eléctrico.

Como se observa en la tabla 6, el proceso de manufactura presenta un costo de $2639.53 dólares.

Tabla 3.8. Costo Total

Fuente: Autores.

Costos Directos	**Costo [USD]**
Materia Prima	1287,03
Equipos y Asesoría	1107,50
Costos Indirectos	**Costo [USD]**
Total Costos Indirectos	245,00
Total	2639,53

4. Aplicación de resultados

Una vez realizada la manufactura de la carrocería en su totalidad, se establece una comparación de resultados, con la finalidad de obtener puntos de referencia sobre los resultados del proceso de manufactura.

4.1. Peso de la carrocería

Se ha tomado como punto de partida, el peso referencial de la carrocería ya que este se encuentra directamente relacionado al proceso de construcción. Al tener un control de cada uno de los pasos establecidos se puede obtener una reducción del uso del material en el proceso. En la tabla 7, se ha establecido el peso de cada pieza de la carrocería del vehículo eléctrico.

Tabla 4.1. Peso del Vehículo eléctrico

Fuente: Autores.

Pieza	Peso (Kg)
Nariz	8.16
Pontones	7.71
Cuerpo central	1.5
Parte fija trasera	2.94
Peso Total de la carrocería	**20.31**

Como base de comparación, se establece el peso de cada parte comprendida en el vehículo formula SAE a combustión. En la tabla 8 se describe el peso de cada una de las partes conformadas actualmente.

Tabla 4.2. Peso del vehículo a combustión

Fuente: Autores.

Pieza	Peso (Kg)
Nariz	8, 5
Pontones	5.6
Fondo plano	10.5
Peso Total de la carrocería	**24.6**

En la tabla 9, se describe el peso promedio de vehículo monoplaza en la competencia FSAE Lincoln y FSAE UK del año 2016 las cual presenta un peso referencial en la competencia.

Tabla 4.3. Peso de vehículos participantes

Fuente: (Company, 2017) ; **(Lincoln/Electric, 2017)**

Peso participante FSAE Lincoln 2016 [Kg]		**Peso participante FSAE UK 2016 [Kg]**	
Universidad de California	294.8	Universidad de Hall	275
Universidad de Michigan	317.5	Universidad de Leicester	260
Instituto Tecnológico de Oregón	283.4	Imperial College London	262

El peso promedio se encuentra entre los 282, 11 kg referente al vehículo sin conductor. Al realizar una comparación del peso total de la carrocería, se puede evidenciar que existe una reducción de 4, 29 kg, lo que representa el 17.44 % del peso. Al tener en cuenta que en vehículos de competencia es importante lograr un menor peso para obtener mayor potencia.

4.2. Prueba de lluvia

La carrocería debe estar diseña completamente para garantizar que no exista contacto de elementos externos hacia el interior, en la cual el test de lluvia se encarga de comprobar la hermeticidad hacia los componentes internos. En este caso de los elementos eléctricos.

El vehículo de aprobar la IMDT antes de llevarse a cabo la prueba de lluvia. La prueba consiste en la pulverización de agua desde cualquier dirección simulando a la

lluvia durante 120 segundos, durante la prueba el sistema de tracción del vehículo debe estar activado, además ninguna de las ruedas debe estar en contacto con el suelo.

Para su aprobación el dispositivo de control de aislamiento no debe reaccionar durante el roció de agua el cual se especifica que es durante 120 segundos. Además, se toma en cuenta 120 segundos posterior del roció en el cual no debe existir acumulación de agua en cualquier parte del vehículo. En su totalidad, la prueba se lleva a cabo durante 240 segundos. Por seguridad, no está permitido que el piloto se encuentre dentro del vehículo durante la prueba.

4.3. Validación de datos

Para la corroboración de datos del comportamiento aerodinámico en el software de simulación, es necesario realizar los cálculos correspondientes a la resistencia de arrastre del vehículo. Al finalizar el anclaje de la carrocería al chasis, se probó el vehículo en pista, la cual tuvo lugar en las instalaciones de la Universidad politécnica salesiana, el recorrido total del vehículo es de 22 km. El conductor al alcanzar la velocidad determinada, dejara de acelerar hasta logra la reducción de 10 km/h sin aplicar la fuerza de frenado, en la tabla 10 se especifica las velocidades de prueba:

Tabla 4.4. *Tabla de velocidades obtenidas en pruebas*

Fuente: Autores.

Velocidad [Km/h]	t_1 $[s]$	t_2 $[s]$
65 – 55	9,10	9,64
50 - 40	10,86	10,51

A continuación, se determina el valor del coeficiente de arrastre para lo cual se establece las siguientes condiciones para las fórmulas (Aparicio Izquierdo, Vera Alvarez, & Días López, 2001):

- La resistencia a la rodadura es contante
- La fuerza de desaceleración es igual a la resistencia al movimiento
- La aceleración es contante

4.3.1. Determinación de formulas

Resistencia Aerodinámica al avance:

$$R_{av} = P * Fr + \left(\frac{\rho}{2}\right) * Cx * A_f * V^2 \qquad \text{Eq. [3,1]}$$

Resistencia a la rodadura:

$$R_r = \gamma_m * m * a \qquad \text{Eq. [3,2]}$$

En las condiciones de ensayos, la fuerza de deceleración es igual a la resistencia al movimiento:

$$R = P * Fr + \left(\frac{\rho}{2}\right) Cx * A_f * V^2 = \gamma_m * m * a \qquad \text{Eq. [3,2]}$$

Si se considera una aceleración constante:

$$a_1 = \frac{V_{i1} - V_{f1}}{t_1} \qquad a_2 = \frac{V_{i2} - V_{f2}}{t_2} \qquad \text{Eq. [3,4]}$$

Velocidad Media:

$$V_1 = \frac{V_{i1} + V_{f1}}{2} \qquad V_2 = \frac{V_{i2} + V_{f2}}{2} \qquad \text{Eq. [3,5]}$$

Al sustituir la Eq. [4,4] y Eq. [3,5] en la Eq. [3,3] se obtiene la siguiente expresión:

$$P * Fr + \left(\frac{\rho}{2}\right) * Cx * A_f * {V_1}^2 = \gamma_m * m * a_1$$

$$P * Fr + \left(\frac{\rho}{2}\right) * Cx * A_f * {V_2}^2 = \gamma_m * m * a_2$$

Al despejar el sistema de ecuaciones se determina el coeficiente de resistencia aerodinámico:

$$C_x = \frac{\gamma_m + m * (a_1 - a_2)}{\left(\frac{\rho}{2}\right) * A_f * ({V_1}^2 - {V_2}^2)} \qquad \text{Eq. [3,6]}$$

$$f_r = \frac{\gamma_m}{g}\left[\frac{(a_1 {V_1}^2 - a_1 {V_2}^2)}{({V_1}^2 - {V_2}^2)}\right] \qquad \text{Eq. [3,7]}$$

4.3.2. Determinación del coeficiente aerodinámico de arrastre

Tabla 4.5. Datos referentes al cálculo

Datos	Valor
Área frontal (Af)	0,82 (m^2)
Factor de mayoración adimensional de masa $(\boldsymbol{\gamma_m})$	1,9
Masa del vehículo con piloto (m)	353 (Kg)
Densidad del aire $(\boldsymbol{\rho})$	1,162 $(^{Kg}/_{m^3})$

Fuente: Autores

Es necesario realizar la trasformación de unidades en referencia a la velocidad obtenida en los ensayos:

Tabla 4.6. Transformación de unidades

	$\boldsymbol{Km/h}$	$\boldsymbol{m/s}$
$\boldsymbol{V_{i1}}$	65	18,05
$\boldsymbol{V_{f1}}$	55	15,27
$\boldsymbol{V_{i2}}$	50	13,88
$\boldsymbol{V_{f2}}$	40	11,11

Fuente: Autores

Velocidad Media:

$$V_1 = \frac{(18{,}05) + (15{,}27)}{2} = 16{,}66\ {}^{m}/_{s}$$

$$V_2 = \frac{(13{,}88) + (11{,}11)}{2} = 12{,}495\ {}^{m}/_{s}$$

Aceleración:

$$a_1 = \frac{(18{,}05) + (15{,}27)}{9{,}37} = 0{,}296\ {}^{m}/_{s^2}$$

$$a_2 = \frac{(13{,}88) + (11{,}11)}{10{,}68} = 0{,}259\ {}^{m}/_{s^2}$$

Al remplazar cada uno de los datos en la Ec [6] se obtiene:

$$C_x = \frac{(1{,}9) + (353) * (0{,}298 - 0{,}259)}{\left(\frac{1{,}162}{2}\right) * 0{,}82 * (16{,}66^{\,2} - 12{,}495^{\,2})}$$

$$C_x = 0{,}432$$

$$f_r = \frac{1{,}9}{9{,}81}\left[\frac{((0{,}298)*(16{,}66)^2-(0{,}298)*(12{,}495)^2)}{(16{,}66)^2-(12{,}495)^2}\right]$$

$$f_r = 0.040$$

4.3.3. Descripción Final

Mediante la simulación de la carrocería en el software, el coeficiente de resistencia al avance (Cx), tiene el valor de 0.46 (adimensional). Por lo contrario, mediante el valor obtenido por medio de los datos en pista y su posterior cálculo se obtiene el valor de 0.432 (adimensional), además se obtiene la fuerza de rozamiento del vehículo con un valor de 0,040. Existe una proximidad entre los datos el cual presta constancia que el valor de coeficiente de arrastre (Cx) se encuentra entre los rangos de funcionamiento deseados.

5. CONCLUSIONES

Una vez finalizado el presente trabajo, se concluye lo siguiente:

- Los objetivos se cumplieron de manera satisfactoria, logrando aplicar los conceptos de aerodinámica en el diseño de una carrocería funcional, con coeficientes aceptables de acuerdo al tipo de configuración seleccionada y dando como resultado la construcción de la pieza con buenos acabados.
- Lo fundamental de un trabajo de este tipo es afirmar teorías de estudio aerodinámico. En este caso se afirma que una buena aerodinámica mejora el rendimiento en pista de un vehículo, aprovechando el mínimo consumo energético de las baterías, reduciendo la potencia necesaria para vencer las fuerzas aerodinámicas a elevadas velocidades y consiguiendo refrigerar elementos a través de un buen flujo de aire.
- En la selección de la nariz y pontones del vehículo se considera la distribución de presiones y fuerzas generadas en cada sección, mostrando que el cuarto modelo es óptimo para su construcción con un Cx de 0.3673 a 100 km/h. Además, la distribución de presiones se mejora mediante la suavidad de cambios de geometrías de secciones, dando como resultado una presión máxima de 102083 Pa.
- Las simulaciones se realizan únicamente de la carrocería sin ningún elemento del vehículo para el diseño, modificación y selección debido al tiempo de resolución y gasto computacional. Seleccionado el modelo más eficiente se simula con los subsistemas que influyen directamente a la aerodinámica del vehículo, incluido el conductor, aumentando el Cx en un 28.7 % de 0.3651 a 0.4699 en 80 km/h. Este incremento no afecta el rendimiento del vehículo, ya que para vencer la fuerza de arrastre el vehículo utiliza únicamente un 4% de la potencia total.
- Al aplicar el método de selección para el material a utilizar, se toma en cuenta la facilidad de obtención en el medio, además del costo final de manufactura. La fibra de vidrio posee facilidad en la manufactura, así como su resistencia mecánica y bajo peso considerando el tamaño de los elementos de la carroceria.

- La carroceria se fabricó con dos capas de fibra de vidrio, con las cuales se obtuvo ligereza y la suficiente resistencia para las pruebas dinámicas de la carrocería, temiendo en cuenta que la velocidad promedio en pista es de 60 Km/h.
- El proceso de manufactura de la carrocería se encuentra ligado al presupuesto disponible para el proyecto, el cual permite cuantificar y ordenar el manejo de la materia prima y sus compuestos para la obtención del producto final, el costo total de manufactura se encuentra en al valor de 2639,53 dólares.

6. RECOMENDACIONES

Se recomienda para próximos diseños de vehículos de competencia tipo Fórmula SAE, se estudie y trabaje con materiales compuestos como es la fibra de carbono con el fin de reducir el peso final del vehículo, debido a que este es importante en el desempeño del mismo en pista.

Además de priorizar el peso, se recomienda la selección y estudio aerodinámico de las diferentes configuraciones, con el uso de dispositivos que ayuden a mejorar el agarre sobre la calzada con carga aerodinámica adicional.

7. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

Alcaraz Lorente, D. J. (16 de Septiembre de 2007). *Interempresas*. Obtenido de http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/17156-Carbono-y-Aramida-del-concepto-a-la-produccion.html

Aparicio Izquierdo, F., Vera Alvarez, C., & Días López, V. (2001).

Clipset. (20 de Marzo de 2015). *LPS*. Obtenido de LPS: http://www.lps.com.ar/201503/las-claves-tecnologicas-de-la-formula-1-para-2015/

Company, C. M. (07 de Diciembre de 2017). *Racecar Engineering* . Obtenido de http://www.racecar-engineering.com/cars/university-college-london/#

Corsaystradale. (12 de Agosto de 2013). *corsaystradale*. Obtenido de corsaystradale: https://corsaystradale.wordpress.com/category/formula-1/

E.V., R. A. (2017). *ecurieaix*. Obtenido de ecurieaix.

ECURIEAIX. (2017). *ECURIE AIX Formula Student Team RWTh ACCHEN E.V.* Obtenido de ECURIE AIX Formula Student Team RWTh ACCHEN E.V.: http://www.ecurie-aix.rwth-aachen.de/cars/eace06/

Engineering, R. (29 de Febrero de 2012). *Racecar Engineering* . Obtenido de Racecar Engineering : http://www.racecar-engineering.com/news/formula-student-news/formula-student-2012-set-to-be-the-toughest-ever/

Espinoza, G., & Hidalgo, J. (2016). *Caracterizacion de Materiales Compuestos para la Aplicacion en la carroceria del vehiculo Monoplaza tipo Formula SAE.* Cuenca .

Fernandes, P. (2005). APLICACIONES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA EN EL SECTOR ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO. *Scielo*, 3.

Fernandez, L. (28 de Noviembre de 2014). *FIBRA DE CARBONO.* Obtenido de https://iadiegue/fibra-de-carbono-15388902

Francisco Aparicio Izquierdo, C. V. (2001). *Teoria de los vehículos automóviles.* Madrid: ETS INGENIEROS INDUSTRIALES.

Garcia Diez, S. (2011). FIBRAS Y MATERIALES DE REFUERZO: LOS POLIÉSTERES REFORZADOS APLICADOS A LA REALIZACIÓN DE PIEZAS EN 3D. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 277- 278.

GreenTeam. (s.f.). *Grean Team.* Obtenido de Grean Team: https://www.greenteam-stuttgart.de/en/

Grupocarman. (26 de Mayo de 2014). *Grupocarman*. Obtenido de Grupocarman: http://grupocarman.com/blog/formula-sae/

Gustavo, S. (2000). *AERONAUTICA GENERAL.* Cordoba.

Houghton, E. l., & Carpenter, P. W. (2003). *Aerodynamics for Engineering Students.*

International, S. (2016). *2017-18 Formula SAE Rules.* SAE International.

International, S. (15 de Octubre de 2017). *fsaeonline* . Obtenido de https://www.fsaeonline.com/content/2017-18-FSAE-Rules-091317.pdf

Lincoln/Electric, 2. F. (07 de Diciembre de 2017). *fsaeonline* . Obtenido de http://www.fsaeonline.com/content/P151682_Formula_SAE_Lincoln-Electric_Event_Guide.pdf

Matt. (02 de Septiembre de 2011). *Spannerhead*. Obtenido de Spannerhead: http://www.spannerhead.com/2011/09/02/know-your-car-design-details/

McBeath, S. (2005). *Aerodinamica del vehículo de competición* . Barcelona: CEAC.

Meseguer, J. (2010). Algunas consideraciones sobre la aerodinámica de los automóviles de competencia. *X Conferencia Heracilo Alfaro.* Madrid: Asociación de Ingenieros aeronáuticos de España.

Morales, O. S. (25 de Marzo de 2008). *http://tesis.ipn.mx.* Obtenido de http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/4698/129.pdf?sequence=1

Mouffouk, M. A. (2013). *Aerodynamic development of the seguracing F1-R01 Prototype.* Batna Algeria.

Racing, P. A. (25 de Octubre de 2016). *Pegasu Auto Racing* . Obtenido de https://www.pegasusautoracing.com/2017/101.pdf

Richter, H.-P. (16 de Abril de 2010). *Patentados.com.* Obtenido de https://patentados.com/patente/fibras-de-vidrio-termicamente-estables/

Santos, P. (2016). *Todomotor*. Obtenido de Todomotor: http://soymotor.com/articulos/williams-fw38-un-vistazo-tecnico-917920

Sobachkin, A. (2014). *Integración de CAD y CAE: mallado e integración del análisis en el proceso de diseño.*

Torres, C. (2011). *Principio de Bernoulli aplicado al tubo Venturi.* .

UMSAE. (Diciembre de 2010). *UMSAE*. Obtenido de UMSAE: http://www.umsae.com/formula-news/december-2010-update

Willian F. Milliken, D. L. (2015). *RACE CAR VEHICLE DYNAMICS.* Society of Automotive Engineers.

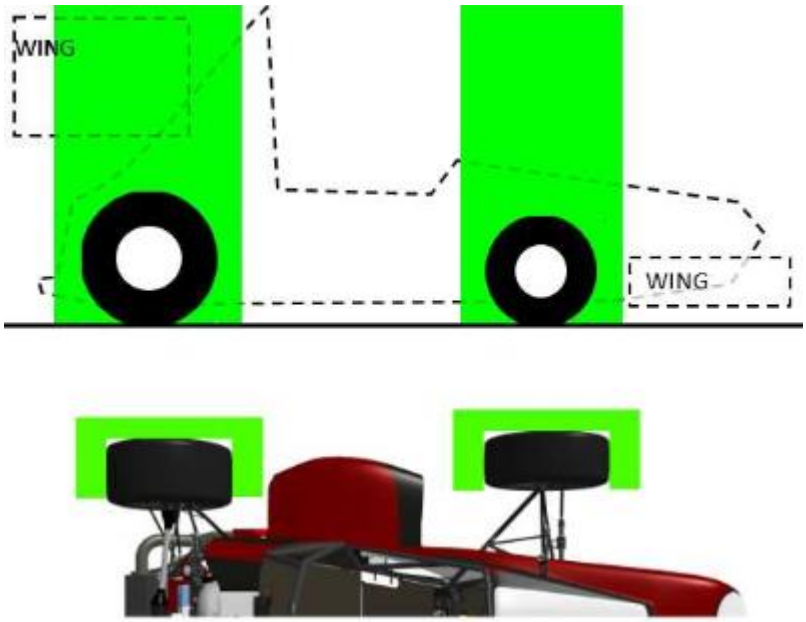
ANEXOS

ANEXO I. Reglamento Fórmula SAE 2017

a) Los 180 grados superiores de las ruedas/neumáticos deben estar sin elementos cuando se ve verticalmente por encima de la rueda

b) Los neumáticos deben estar sin obstrucciones cuando se ve desde el lado.

c) Los neumáticos deben tener una zona de seguridad definida como un circulo a su alrededor de 75 mm mayor radialmente que el diámetro exterior de los neumáticos cuando el piloto este montado en el vehículo.



Espacios libres del vehículo.

Fuente: SAE; 2016

d) Ubicación de dispositivos aerodinámicos en la parte frontal del vehículo

Vista en planta, cualquier parte de cualquier dispositivo aerodinámico, a la, bandeja inferior, divisor o placa final no debe:

a. A más de 700 mm (27,6 pulgadas) adelante de los frentes de los neumáticos delanteros

b. Más ancho que el exterior de los neumáticos delanteros medidos a la altura de los cubos.

c. No debe existir ningún elemento desde el nivel del suelo hasta una altura de 250mm.

e) Ubicación de dispositivos aerodinámicos en la parte trasera del vehículo:

a. En vista en planta, cualquier parte de cualquier dispositivo aerodinámico, ala, subterráneo o divisor no debe ser:

b. Más hacia atrás que 250 mm (9,8 pulgadas) detrás de la parte trasera de los neumáticos traseros

c. Más adelante que un plano vertical a través de la porción más trasera de la cara delantera del soporte de retención de la cabeza del conductor, excluyendo cualquier relleno, fije (si es ajustable) en su posición completamente hacia atrás (excluyendo los bastidores).

d. Más ancho que el interior de los neumáticos traseros, medido a la altura de la línea central del cubo. Ninguna parte del alerón trasero debe ser superior a 1,2 metros sobre el suelo cuando se mide sin conductor en el vehículo

f) Radios mínimos de los bordes de los dispositivos aerodinámicos

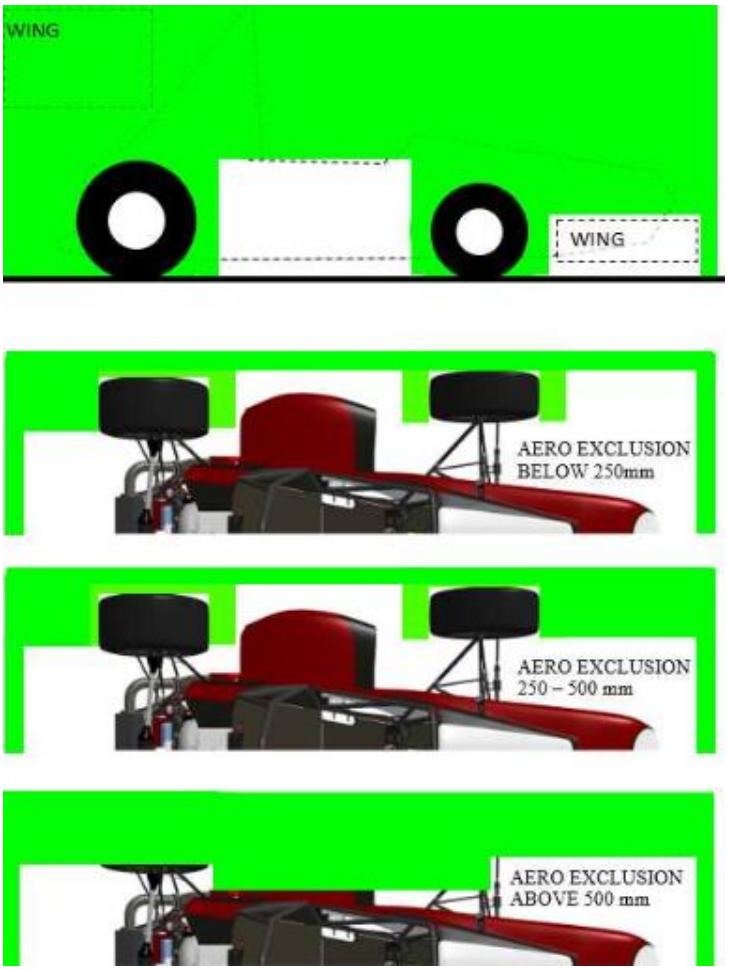
Todos los bordes de las alas que podrían entrar en contacto con un peatón deben tener un radio mínimo de 5 mm (0,2 pulgadas) para todos los bordes horizontales y 3 mm (0,12 pulgadas) para los bordes verticales.

g) Efecto suelo

No se puede usar ningún dispositivo de alimentación para mover o quitar aire de debajo del vehículo, excepto los ventiladores diseñados exclusivamente para enfriamiento. El efecto suelo está prohibido.

h) Estabilidad y resistencia de los dispositivos aerodinámicos

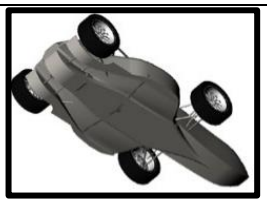
Todos los dispositivos aerodinámicos deben diseñarse de manera que el sistema de montaje proporcione una rigidez adecuada en el estado estático y de tal manera que los dispositivos aerodinámicos no oscilen o se muevan excesivamente cuando el vehículo se está moviendo.



Límite de colocación de alerones en un vehículo FSAE.

Fuente: SAE; 2016

ANEXO II. Tabla de coeficientes aerodinámicos de un monoplaza con diferente configuración.

Configuración	Descripción	Cx	Cz
	Sin elementos aerodinámicos	0.63	0.29
	Uso de Difusores de aire	065	-0.79
	Difusores con alerones	0.66	-1.28
	Difusores, alerones y alas laterales	0.68	-1.56
	Difusores, alerones, alas laterales y flaps	0.90	-2.34
	Difusores junto con múltiples alerones	0.98	-2.58
	Fondo plano, múltiple combinación de alerones	1.30	-3.70