



# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

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

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CARROCERÍA  
PARA UN VEHÍCULO TIPO FORMULA SAE**

**AUTORES: ORMAZA RAMOS BRYAN PATRICIO**

**OTO NARVÁEZ DARÍO JAVIER**

**DIRECTOR: ING. JORGE LUIS MELO OBANDO, MSc.**

**Ibarra, 2023**

## CERTIFICADO

### ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

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

### CERTIFICO:

Que una vez analizado el plan de grado cuyo título es “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CARROCERÍA PARA UN VEHÍCULO TIPO FORMULA SAE” presentado por el señor: Ormaza Ramos Bryan Patricio con número de cédula 1004515258 y por el señor: Oto Narváez Darío Javier con número de cédula 0401940267, doy fe que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a presentación pública y evaluación por parte de los señores integrantes del jurado examinador que se designe.

En la ciudad de Ibarra, a los 28 días del mes de noviembre del 2023.

Atentamente:



Ing. Jorge Luis Melo Obando, MSc.

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO**



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

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

#### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

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

DATOS DE CONTACTO			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	1004515258		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Ormaza Ramos Bryan Patricio		
<b>DIRECCIÓN:</b>	Mirador del Colibrí, Otavalo - Ecuador		
<b>EMAIL:</b>	<a href="mailto:bpormazar@utn.edu.ec">bpormazar@utn.edu.ec</a>		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	06-2520958	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0998680442
DATOS DE CONTACTO			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	0401940267		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Oto Narváez Darío Javier		
<b>DIRECCIÓN:</b>	Santa Martha de Cuba, Tulcán - Ecuador		
<b>EMAIL:</b>	<a href="mailto:djoton@utn.edu.ec">djoton@utn.edu.ec</a>		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	06-2967116	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0985704387
DATOS DE LA OBRA			
<b>TÍTULO:</b>	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CARROCERÍA PARA UN VEHÍCULO TIPO FORMULA SAE		
<b>AUTORES:</b>	Ormaza Ramos Bryan Patricio Oto Narváez Darío Javier		
<b>FECHA:</b>	28 de noviembre del 2023		
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO			
<b>PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO		
<b>TITULO POR EL QUE OPTA:</b>	INGENIERÍA AUTOMOTRIZ		
<b>ASESOR/DIRECTOR:</b>	Ing. Jorge Luis Melo Obando, MSc.		

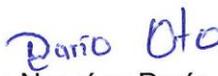
## 2. CONSTANCIAS

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

Ibarra, a los 28 días del mes de noviembre del 2023

### AUTORES:

  
Ormaza Ramos Bryan Patricio  
C.C. 1004515258

  
Oto Narvárez Darío Javier  
C.C. 0401940267

## DEDICATORIA

Dicen que la mejor herencia que nos pueden dejar nuestros padres son los estudios, es por ello que quiero dedicar mi tesis a mis padres, Luis Ormaza y Anita Ramos, ya que, sin su apoyo incondicional, no habría sido capaz de cumplir mi sueño de vida. Sus constantes bendiciones y guía a lo largo de mi vida han sido mi fortaleza, orientándome hacia el camino correcto. Por esta razón, dedico este trabajo como un gesto de gratitud por su paciencia y amor hacia mí. Mi cariño hacia ustedes es inmenso. Igualmente, quiero hacer extensiva mi dedicatoria a mi abuelita Hilda Ramos, quien desde mi infancia ha estado a mi lado, cuidándome y brindándome su amor incondicional en todo momento. Sus palabras y enseñanzas perduran en mi memoria, y su ejemplo es una de mis principales inspiraciones para nunca abandonar y esforzarme por superarme cada día. Aspiro a convertirme en un luchador incansable de la vida, siguiendo el ejemplo de fortaleza que ella representa en mí vida.

Quiero dedicar este logro a mis hermanos, Jennifer, Felipe y Nayeli, quienes estuvieron a mi lado de principio a fin, ofreciéndome sus sabios consejos para que me convirtiera en una mejor persona. Asimismo, a mi tío Ernesto Ramos, quien desde el más allá, sé que ha estado velando por mí y protegiéndome, como solía hacerlo en vida. Aunque su presencia ya no sea visible, estoy seguro de que estaría orgulloso de mi éxito, y siempre guardaré gratitud por las valiosas lecciones de vida que me brindó. Muchas gracias a aquellos seres queridos que siempre guardo en mi alma.

**Bryan Patricio Ormaza Ramos**

Dedico este trabajo de grado a mis padres, Ramiro Oto y Maira Narváez, quienes han sido mi fuente de apoyo a lo largo de mi vida y me han inspirado a cumplir este sueño, sin ellos, todo esto habría quedado como un simple anhelo. A mis hermanos y todas las personas de mi familia que siempre estuvieron a mi lado, brindándome fuerza y ánimo en los momentos más difíciles. A todos mis amigos que creyeron en mí y me motivaron a seguir adelante. Este trabajo es un tributo a su confianza en mí y a su amor inquebrantable. Gracias a todos.

**Darío Javier Oto Narváez**

## **AGRADECIMIENTO**

En un principio, deseo expresar mi profundo agradecimiento a Dios por haberme brindado la oportunidad de alcanzar este punto en mi vida. Solo él conoce la magnitud de mis peticiones pidiendo su guía, cuidado y protección. Reconozco que su presencia fue constante a lo largo de mi trayectoria universitaria.

A mis padres unos profundos agradecimientos a, Luis Ormaza y Anita Ramos. A pesar de los desafíos que la vida nos presenta, siempre han sido ejemplos de perseverancia y determinación, guiándome a enfrentar los obstáculos sin rendirme. Su apoyo incondicional en todos los ámbitos ha sido fundamental para mi logro, sin ellos, no habría sido posible.

Quiero expresar mi agradecimiento al Msc. Jorge Melo, mi tutor de tesis, por ofrecerme la posibilidad de aprovechar su experiencia y conocimiento en el ámbito científico. Además, valoro mucho su paciencia y orientación, las cuales fueron fundamentales para llevar a cabo nuestro proyecto de manera exitosa.

Finalmente agradezco a la Universidad Técnica del Norte y a todos los docentes de la carrera de Ingeniería Automotriz que nos impartieron todos sus conocimientos para poder ser unos excelentes profesionales.

**Bryan Patricio Ormaza Ramos**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento, en primer lugar, a mis padres, Ramiro Oto y Maira Narváez, por su constante apoyo emocional y por creer en mí en cada etapa de mi formación académica.

También agradezco a mi director de tesis, el MSC. Jorge Melo, por su orientación y paciencia a lo largo de este proyecto. Sus conocimientos y consejos fueron esenciales para mi crecimiento profesional y, sobre todo, para culminar con éxito este trabajo de investigación.

Finalmente, quiero expresar mi gratitud a la Universidad Técnica del Norte, junto con todos sus docentes de la carrera de Ingeniería Automotriz, por brindarme sus sólidos conocimientos, sabiduría y experiencias en el transcurso del día a día.

**Darío Javier Oto Narváez**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
<b>DEDICATORIA</b>	v
<b>AGRADECIMIENTO</b>	vi
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS</b>	vii
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	xii
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	xvi
<b>ÍNDICE DE ANEXOS</b>	xvii
<b>ÍNDICE DE ECUACIONES</b>	xviii
<b>RESUMEN</b>	xix
<b>ABSTRAC</b>	xx
<b>INTRODUCCIÓN</b>	xxi
<b>CAPÍTULO I</b>	1
<b>1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN</b>	1
1.1. OBJETIVOS	1
1.1.1. Objetivo General	1
1.1.2. Objetivos Específicos	1
1.2. JUSTIFICACIÓN	1
1.3. ALCANCE	2
1.4. ANTECEDENTES	2
1.5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.6. SITUACIÓN ACTUAL	4
<b>CAPÍTULO II</b>	5
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	5
2.1. FORMULA SAE	5
2.1.1. Normativas de la Formula SAE Para la Carrocería	5
2.2. TÉCNICAS DE DISEÑO E INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADOR	6
2.2.1. Diseño asistido por computador (CAD)	6
2.2.2. Ingeniería Asistida por Computador (CAE)	6
2.2.3. Método de elementos finitos (FEM)	6
2.3. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)	7
2.3.1. Aplicaciones de la CFD en la industria automotriz	7
2.3.2. Estructura de CFD	7
2.3.2.1. Pre-procesamiento	8

2.3.2.2.	Procesamiento para el cálculo CFD o solver	8
2.3.2.3.	Post-procesamiento	8
2.3.3.	Dominio computacional	9
2.3.4.	Tipos de malla	10
2.3.4.1.	Malla tetraédrica	10
2.3.4.2.	Malla hexcore	10
2.3.4.3.	Malla poliédrica	11
2.3.4.4.	Malla Poly hexcore	11
2.3.5.	Calidad de malla	12
2.3.6.	Capa límite	13
2.3.7.	Discretización	15
2.3.8.	Convergencia	16
2.4.	PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA AERODINÁMICA	16
2.4.1.	Eficiencia aerodinámica	16
2.4.2.	Aerodinámica	17
2.4.3.	El entorno del diseño aerodinámico	18
2.4.4.	Líneas de corriente de aire	19
2.4.5.	Flujo de aire interno	19
2.4.6.	Flujo de aire externo	20
2.4.7.	Flujo laminar	20
2.4.8.	Flujo turbulento	20
2.4.9.	Número de Reynolds	20
2.4.10.	Número de Mach	21
2.4.11.	Principio de Bernoulli	22
2.4.12.	Efecto Venturi	23
2.5.	MODELOS PARA EL ANÁLISIS DE TURBULENCIA	24
2.5.1.	Modelo K- $\epsilon$ (Épsilon)	24
2.5.2.	Modelo RNG	25
2.5.3.	Modelo K- $\omega$ (Omega)	25
2.6.	PROPIEDADES DEL FLUIDO	26
2.6.1.	Densidad del aire ( $\rho$ )	26
2.6.2.	Viscosidad	27
2.6.2.1.	Viscosidad dinámica	27
2.6.2.2.	Viscosidad cinemática	28

2.6.3.	Presión	29
2.7.	FUERZAS AERODINÁMICAS	29
2.7.1.	Fuerza de arrastre o resistencia	30
2.7.2.	Fuerza de sustentación	31
2.7.3.	Fuerza lateral	32
2.8.	COEFICIENTES AERODINÁMICOS	32
2.8.1.	Coeficiente de arrastre o de resistencia (CD o CX)	32
2.8.2.	Coeficiente de sustentación (CL o CZ)	34
2.9.	POTENCIA NECESARIA PARA VENCER LA RESISTENCIA AERODINÁMICA	34
2.10.	DISPOSITIVOS AERODINÁMICOS	35
2.10.1.	Difusor	35
2.10.2.	Pontones	35
2.10.3.	Fondo plano	36
2.11.	CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO PARA COMPETENCIAS TIPO FORMULA “SAE”	36
2.11.1.	Configuración Tubular	36
2.11.2.	Configuración Monocasco	37
2.12.	DIVISIÓN POR PARTES DE LA CARROCERÍA	38
2.13.	MATERIALES MÁS UTILIZADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CARROCERÍAS FORMULA SAE	40
2.13.1.	Fibra de carbono	40
2.13.2.	Materiales sintéticos	41
2.13.3.	Aluminio	42
2.13.4.	Fibra de vidrio	43
<b>CAPÍTULO III</b>		45
<b>3.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	45
3.1.	ETAPA DE SELECCIÓN DEL MATERIAL	45
3.2.	MATRIZ DE SELECCIÓN DEL MATERIAL	46
3.3.	CONCEPCIÓN DEL MODELO	47
3.4.	DISEÑO DE LA CARROCERÍA, ASISTIDO POR SOLIDWORKS	48
3.4.1.	Descripción del Software SolidWorks	48
3.4.2.	Espacios considerados en la carrocería	49
3.4.3.	Bosquejos iniciales para el modelamiento	49
3.4.4.	Fases de modelamiento de la carrocería en SolidWorks	49

3.5.	PROCESO DE SIMULACIÓN CFD	54
3.5.1.	Software ANSYS	54
3.5.2.	Ansyz-Fluid Flow (Fluent with Fluent Meshing)	55
3.5.3.	Importación de la geometría del vehículo tipo Formula SAE	55
3.5.4.	Simplificación del modelo CAD	56
3.5.5.	Creación del Túnel de Viento y Simetría	56
3.5.6.	Condiciones de contorno	58
3.5.7.	Generación de malla	58
3.5.8.	Validación de malla	60
3.5.9.	Condiciones de borde	61
3.5.10.	Diagramas del proceso de construcción de la carrocería	69
3.5.10.1.	Proceso 1: Molde de la carrocería	69
3.5.10.2.	Proceso 2: Masillado	70
3.5.10.3.	Proceso 3: Pintura y Acabados	71
3.6.	PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE LA CARROCERÍA	72
3.6.1.	Introducción	72
3.6.2.	Modelación de la carrocería	73
3.6.2.1.	Primera etapa - Planos	73
3.6.2.2.	Segunda Etapa – Aplicación de la fibra de vidrio (molde base)	74
3.6.2.3.	Tercera Etapa – Masillado	77
3.6.2.4.	Cuarta Etapa – Pintura y acabados	80
3.7.	ANÁLISIS DE COSTOS	86
3.7.1.	Costo	86
3.7.2.	Costos directos	86
3.7.3.	Costos indirectos	87
3.7.4.	Costo total	88
<b>CAPÍTULO IV</b>		89
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	89
4.1.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DEL PROTOTIPO	89
4.1.1.	Análisis de Presión	89
4.1.2.	Análisis de la Presión Dinámica	90
4.1.3.	Análisis de Velocidades	91
4.1.4.	Análisis de Turbulencia	91
4.1.5.	Trayectorias de Fluido	92

4.2.	ANÁLISIS Y CÁLCULOS AERODINÁMICOS	93
4.2.1.	Resultados de fuerza de arrastre y fuerza de sustentación	93
4.2.2.	Área transversal del vehículo tipo formula SAE	94
4.2.3.	Número de Reynolds	95
4.2.4.	Número de Mach	96
4.2.5.	Coeficiente de Sustentación	96
4.2.6.	Coeficiente de arrastre	96
4.2.7.	Cálculo de la Potencia necesaria para vencer la fuerza de arrastre	97
	<b>CAPÍTULO V</b>	98
5.	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	98
5.1.	CONCLUSIONES	98
5.2.	RECOMENDACIONES	99
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	100
	<b>ANEXOS</b>	105

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA NÚM.</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>2.1</b>	Competencia Formula Student	5
<b>2.2</b>	Dimensiones principales del dominio computacional	9
<b>2.3</b>	Malla Tetraédrica	10
<b>2.4</b>	Malla Hexcore	10
<b>2.5</b>	Malla Poliédrica	11
<b>2.6</b>	Malla Poli hexcore	11
<b>2.7</b>	Valores de referencia de Skewness	12
<b>2.8</b>	Valores de referencia de Orthogonal Quality	13
<b>2.9</b>	Fuerzas resultantes horizontal y vertical sobre un perfil alar	13
<b>2.10</b>	Capa límite sobre diferentes cuerpos	14
<b>2.11</b>	Capa límite laminar y turbulenta	15
<b>2.12</b>	Discretización de valores	15
<b>2.13</b>	Convergencia de la presión promedio en un análisis	16
<b>2.14</b>	Diseño y modelo de vehículo para competencia	18
<b>2.15</b>	Análisis de Ala de Viento	19
<b>2.16</b>	Líneas de flujo en un perfil del ala de un avión	23
<b>2.17</b>	Tubo de Venturi	24
<b>2.18</b>	Efecto Venturi Adaptado a un F1	24
<b>2.19</b>	Sistema de Coordenadas Presentes en Vehículos	30
<b>2.20</b>	Coefficiente Cx para diversos automóviles	33
<b>2.21</b>	El Difusor	35
<b>2.22</b>	Pontón Automovilístico	36

<b>2.23</b>	Fondo Plano de un F1	36
<b>2.24</b>	Configuración Tubular	37
<b>2.25</b>	Chasis Monocasco	37
<b>2.26</b>	Nariz del prototipo	38
<b>2.27</b>	Trompa del Prototipo Formula SAE	39
<b>2.28</b>	Pontones del vehículo tipo Formula	39
<b>2.29</b>	Fondo Plano	40
<b>2.30</b>	Polímeros en el Automóvil	42
<b>3.1</b>	Distintos materiales en la carrocería	45
<b>3.2</b>	Vista Lateral del Chasis	47
<b>3.3</b>	Vista Superior del Chasis	48
<b>3.4</b>	Bosquejos iniciales	49
<b>3.5</b>	Inicio del modelado	50
<b>3.6</b>	Chasis con componentes de dirección	50
<b>3.7</b>	Superficies delanteras	51
<b>3.8</b>	Superficies delanteras laterales	51
<b>3.9</b>	Superficie de Pontones	52
<b>3.10</b>	Posicionamiento de Pontones	52
<b>3.11</b>	Superficie de recubrimiento parte superior	53
<b>3.12</b>	Superficies con Espesor	53
<b>3.13</b>	Modelamiento final	54
<b>3.14</b>	Ansys-Fluid Flow (Fluent with Fluent Meshing)	55
<b>3.15</b>	Importación del Modelado	55
<b>3.16</b>	Modelo CAD Simplificado	56
<b>3.17</b>	Túnel de Viento	57

<b>3.18</b>	Modelo CAD dividido a la mitad para reducir el número de elementos	57
<b>3.19</b>	Condiciones de Contorno	58
<b>3.20</b>	Malla de superficie	59
<b>3.21</b>	Malla de volumen	59
<b>3.22</b>	Resultado calidad de malla Skewness	60
<b>3.23</b>	Resultado de calidad de malla Orthogonal Quality	60
<b>3.24</b>	Configuración de forma general	61
<b>3.25</b>	Condiciones de operación	61
<b>3.26</b>	Selección del modelo de viscosidad	62
<b>3.27</b>	Propiedades del fluido	62
<b>3.28</b>	Condiciones de entrada a 27.77 m/s	63
<b>3.29</b>	Condición de salida a 0 Pascales	63
<b>3.30</b>	Condiciones de la geometría del vehículo	64
<b>3.31</b>	Condiciones de la zona inferior o calzada	64
<b>3.32</b>	Condiciones para las paredes del dominio computacional	65
<b>3.33</b>	Área frontal del vehículo	65
<b>3.34</b>	Valores de referencia	66
<b>3.35</b>	Configuración para la obtención de la fuerza de arrastre	67
<b>3.36</b>	Configuración para la obtención de la fuerza de sustentación	67
<b>3.37</b>	Selección del sistema de inicialización	68
<b>3.38</b>	Ejecución del estudio	68
<b>3.39</b>	Catalizador Mek	73
<b>3.40</b>	Dimensionamiento de la nariz	74
<b>3.41</b>	Unión de varillas con soldadora Mig	74
<b>3.42</b>	Molde base a través de una lámina de tela	75

<b>3.43</b>	Aplicación de la mezcla	76
<b>3.44</b>	Aplicación de la fibra de vidrio	76
<b>3.45</b>	Molde del pontón listo para masillar	77
<b>3.46</b>	Aplicación de masilla de relleno al pontón	78
<b>3.47</b>	Aplicación de la masilla epoxi de titanio	79
<b>3.48</b>	Diseño listo para la siguiente etapa	80
<b>3.49</b>	Aplicación del fondo base	80
<b>3.50</b>	Aplicación de masilla suave	81
<b>3.51</b>	Lijado suave después de aplicar fondo base	81
<b>3.52</b>	Último lijado para un mejor acabado	82
<b>3.53</b>	Aplicación del primer color base	83
<b>3.54</b>	Pintado de las franjas color blanco y rojo	83
<b>3.55</b>	Aplicación del color negro	84
<b>3.56</b>	Aplicación del barniz	85
<b>3.57</b>	Carrocería finalizada	85
<b>4.1</b>	Presión estática medida en Pascales [Pa]	90
<b>4.2</b>	Presión dinámica medida en Pascales [Pa]	90
<b>4.3</b>	Velocidad plano medio medida en [m/s]	91
<b>4.4</b>	Turbulencia en Porcentajes	92
<b>4.5</b>	Vectores de Velocidad	92
<b>4.6</b>	Vectores de Turbulencia	93
<b>4.7</b>	Fuerzas de arrastre y sustentación	93
<b>4.8</b>	Peso total del vehículo incluido la carrocería	94
<b>4.9</b>	Área frontal del prototipo	95

**ÍNDICE DE TABLAS**

<b>TABLA NÚM.</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>2.1</b>	Propiedades de Fluidos	28
<b>2.2</b>	Propiedades de diferentes fibras de carbono	41
<b>2.3</b>	Propiedades del Aluminio	42
<b>2.4</b>	Propiedades de diferentes fibras de vidrio	44
<b>3.1</b>	Propiedades de Distintos Materiales	46

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>ANEXO NÚM.</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>1</b>	Molde base de la carrocería	105
<b>2</b>	Aplicación de la fibra de vidrio	105
<b>3</b>	Masillado de toda la carrocería	106
<b>4</b>	Lijado suave para un mejor acabado	106
<b>5</b>	Aplicación del primer color base	107
<b>6</b>	Pintado de las franjas de color rojo y blanco	107
<b>7</b>	Carrocería terminada	108
<b>8</b>	Peso total del vehículo con la carrocería	108
<b>9</b>	Peso total del vehículo sin la carrocería	109

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>ECUACIÓN NÚM.</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>2.1</b>	Número de Reynolds	21
<b>2.2</b>	Número de Mach	21
<b>2.3</b>	Velocidad del sonido	21
<b>2.4</b>	Principio de Bernoulli	22
<b>2.5</b>	Densidad	26
<b>2.6</b>	Densidad del aire en función de la presión y temperatura	26
<b>2.7</b>	Viscosidad dinámica	27
<b>2.8</b>	Viscosidad cinemática	28
<b>2.9</b>	Presión	29
<b>2.10</b>	Fuerza de arrastre o resistencia	30
<b>2.11</b>	Fuerza de sustentación	31
<b>2.12</b>	Fuerza lateral	32
<b>2.13</b>	Coefficiente de arrastre o de resistencia	33
<b>2.14</b>	Coefficiente de sustentación	34
<b>2.15</b>	Potencia necesaria para vencer la resistencia aerodinámica	34

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación se centró en el diseño y construcción de una carrocería para un vehículo tipo Formula SAE en la Universidad Técnica del Norte. La necesidad surgió porque la institución ya contaba con un chasis, pero carecía de una carrocería que permitiera usar completamente el vehículo en competiciones o fines académicos. El proyecto se abordó mediante el uso de software de diseño asistido por computadora (CAD) para la creación de la carrocería y un software de ingeniería asistida por computadora (CAE) para analizar su comportamiento aerodinámico. La elección de los materiales fue crucial, ya que influyen en la aerodinámica de la carrocería, por tal motivo se seleccionó la fibra de vidrio debido a su resistencia mecánica, facilidad de manipulación y bajo costo.

Se interpretó el comportamiento aerodinámico del prototipo mediante análisis de presión estática, presión dinámica, velocidad, turbulencia y trayectorias de flujo, en donde se examinó las distintas presiones y velocidades en diferentes partes de la carrocería, destacando la relación entre velocidad y presión según el principio de Bernoulli. En el análisis de turbulencia reveló un bajo porcentaje de turbulencia en la carrocería, lo que fue beneficioso para la estabilidad y las trayectorias de flujo mostraron que el flujo de aire no creaba vórtices o remolinos significativos que pudieran afectar la estabilidad del vehículo.

Se realizaron cálculos aerodinámicos esenciales como el coeficiente de sustentación y el coeficiente de arrastre. Se obtuvo un coeficiente de sustentación bajo, lo que indicó que el diseño de la carrocería no generaría ningún problema tan significativo y a su vez el coeficiente de arrastre se consideró aceptable, también se calculó la potencia necesaria para vencer la fuerza de arrastre, lo que resultó en 4.11 Hp a una velocidad de 100 km/h. Finalmente, se concluyó que el diseño cumplía con los requisitos aerodinámicos necesarios para un rendimiento adecuado.

**Palabras clave:** Diseño – Construcción - Carrocería - Formula SAE - Fibra de vidrio - Software CAD - Software CAE - Aerodinámica.

REPÚBLICA DEL ECUADOR



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**EMPRESA PÚBLICA "LA UEMEPRENDE E.P."**



### ABSTRACT

This research work focused on the design and construction of a body for a Formula SAE-type vehicle at the Técnica del Norte University. Such need arose because the institution already had a chassis, but lacked a body that would allow full use of the vehicle in competitions or academic purposes. The project was approached using computer-aided design (CAD) software to create the body and computer-aided engineering (CAE) software to analyze its aerodynamic behavior. The choice of materials was crucial, as they influence the body's aerodynamics, so fiberglass was selected due to its mechanical strength, ease of handling, and low cost. The aerodynamic behavior of the prototype was interpreted through static pressure, dynamic pressure, velocity, turbulence, and flow trajectories analysis, where the different pressures and velocities in other parts of the body were examined, highlighting the relationship between velocity and pressure according to Bernoulli's principle. Turbulence analysis revealed a low percentage of turbulence in the bodywork, which was beneficial for stability; flow paths showed that the airflow did not create significant vortices or eddies that could affect vehicle stability. Essential aerodynamic calculations such as lift coefficient and drag coefficient were performed. A low lift coefficient was obtained, which indicated that the body design would not generate any significant problems, and in turn, the drag coefficient was considered acceptable; the power required to overcome the drag force was also calculated, resulting in 4.11 Hp at a speed of 100 km/h. Finally, it was concluded that the design met the aerodynamic requirements necessary for adequate performance.

**Keywords:** Design - Construction - Body - SAE Formula - Fiberglass - CAD software - CAE software - Aerodynamics.

Reviewed by:  
MSc. Luis Paspuezán Soto  
**CAPACITADOR-CAI**  
November 7, 2023

## INTRODUCCIÓN

En este documento se presenta el diseño aerodinámico y el proceso de construcción de una carrocería para un vehículo de competencia Formula SAE, de acuerdo al reglamento vigente en 2023.

La Formula Student o SAE es una competición universitaria en la que se pone a prueba el conocimiento adquirido por los estudiantes a través del desarrollo de prototipos que involucran el diseño, la construcción y el pilotaje de un monoplaza. Esta necesidad surge debido a la importancia de llevar a cabo un trabajo continuo entre los estudiantes de la carrera y obtener como resultado un vehículo eficiente y aerodinámicamente estable. Como es ampliamente conocido, la Formula SAE promueve la excelencia en Ingeniería Automotriz. Por lo tanto, la selección del mejor diseño y construcción de la carrocería requirió la previa realización de su diseño en un software CAD y su posterior simulación en un software CAE. Esto nos permitió estudiar los efectos del aire a una velocidad específica y aprovechar las corrientes del fluido, con el objetivo de aumentar el desempeño del vehículo y obtener resultados más satisfactorios.

Uno de los puntos más críticos es la selección del material, para lo cual se optó por analizar las propiedades de resistencia mecánica de ciertos materiales que se pueden utilizar en la construcción de carrocerías, como la fibra de carbono, los polímeros termoplásticos, las fibras sintéticas y las naturales.

En este proyecto, se eligió la fibra de vidrio para el proceso de construcción, ya que este material se adapta a las necesidades tanto en cuanto al peso requerido como al costo de fabricación estimado para este proyecto.

# CAPÍTULO I

## 1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. OBJETIVOS

#### 1.1.1. Objetivo General

Diseñar y construir una carrocería para un vehículo de competencia tipo Formula Student.

#### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Investigar sobre los materiales más utilizados para la construcción de carrocerías de vehículos tipo Formula Student.
- Diseñar una carrocería para el vehículo Formula Student mediante software CAD.
- Analizar el comportamiento del flujo de aire con el uso de un software de elementos finitos.
- Construir la carrocería con materiales adecuados que le brinden una buena aerodinámica al vehículo.

### 1.2. JUSTIFICACIÓN

Este proyecto se basa en crear y diseñar una carrocería para un vehículo de competencia tipo formula Student que se encuentra en la Universidad Técnica del Norte que, a base de los conocimientos adquiridos en las aulas de clase, se busca mejorar la aerodinámica del mismo, la cual actualmente es esencial al momento de afrontar una competencia. También, se utilizará fibra de vidrio ya que es la más usada por tener un costo muy bajo a comparación con las fibras de carbono o de aramida, del mismo modo es fácil de moldear y tiene una buena resistencia mecánica que en la mayoría de los casos ayudará a salvaguardar la vida del piloto en caso de tener algún impacto.

El presente tema también está involucrado en promover e incentivar a la investigación de los estudiantes universitarios, por lo que, quedará como base para que futuros proyectos tengan un prototipo en donde apoyarse para mejorar sus diseños que los lleve a construir carrocerías mucho más sutiles y confiables que de seguro ayudarán a la innovación en la industria automotriz, es así como el proyecto está relacionado con el objetivo 7 del Plan de Creación de Oportunidades y se enfoca principalmente en la política 7.4 la cual procura “Fortalecer el Sistema de Educación Superior bajo los principios de libertad, autonomía responsable, igualdad de oportunidades, calidad y pertinencia; promoviendo la investigación de alto impacto” (Secretaría Nacional de Planificación, 2021).

### **1.3. ALCANCE**

En el presente proyecto, se busca diseñar una carrocería para un vehículo tipo Formula “SAE” con el que cuenta la Universidad Técnica del Norte, previo a esto se realizará un estudio de la mejor opción que tenemos actualmente en el mercado sobre el tipo de material que se utilizará para su construcción, es así como hemos optado por utilizar fibra de vidrio para su fabricación. Además de que se diseñará la carrocería del vehículo, por medio de un software de Diseño Asistido por Computador como lo es SolidWorks, para posteriormente realizar un estudio con el software Ansys que cuenta con el método de elementos finitos (FEM), en donde por medio de simulación se tomará en cuenta parámetros de flujo correcto del aire con el diseño planteado. Esto también, nos permitirá elegir el diseño de los componentes más adecuados como la forma, posición, espesor del material, estética, entre otros; es decir, todos los elementos que intervienen en el modelamiento de la carrocería. Finalmente, se realizará la construcción de la carrocería, teniendo en cuenta las normas y parámetros vigentes que establece la Formula SAE para este tipo de vehículos.

### **1.4. ANTECEDENTES**

La Formula Student, popularmente conocida como Formula SAE por sus siglas en inglés (Society of Automotive Engineers), es una competición que se desarrolló en el año de 1981 en la Universidad de Texas en Austin, esta tenía como principal propósito lograr que estudiantes de diferentes universidades se interesen más sobre el diseño, fabricación y buen funcionamiento de un vehículo monoplaza, que posteriormente debe pasar por una serie de pruebas para verificar su correcto y óptimo rendimiento (Perlález, 2008).

Al momento de crear el prototipo se busca que los estudiantes apliquen todos sus conocimientos adquiridos en las aulas y, a su vez, se pretende alcanzar un mayor nivel de aprendizaje, ya que es un gran desafío técnico que los estudiantes deben abordar detrás de todo el proceso de diseño y construcción del vehículo.

La finalidad de la carrocería es alojar y proteger a los pasajeros que se trasladan en un automóvil. En el año de 1934 salieron por primera vez los vehículos autoportantes que contaban con un diseño único ya que sus carrocerías eran fabricadas totalmente con acero y se dejó atrás el uso de la madera, este coche era el Citroen Traction Avant, el cual tuvo un alto impacto en el área automotriz que incentivo a muchos fabricantes a mejorar las

características de este sistema, haciéndolo más ligero pero sobre todo más seguro para los ocupantes (Epifanio, 2020).

El aspecto que más influye en el rendimiento de un automóvil es principalmente el peso de sus componentes, por tal motivo, se deduce que a menor peso, el vehículo de competencia tiene un mejor rendimiento. Los ingenieros, junto con la tecnología, buscan día tras día mejorar dichos componentes con materiales compuestos más ligeros, pero sin que estos pierdan sus propiedades, incentivando así a utilizar fibras naturales, con el objetivo de reducir la contaminación ambiental del planeta, pero sobre todo, lo que se intenta es mejorar las prestaciones del vehículo a la hora de que este se enfrente a una competencia (Bautista & Mena, 2018).

## **1.5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La Universidad Técnica del Norte cuenta con una estructura de chasis realizada en años anteriores por estudiantes junto con la ayuda de sus docentes, por esta razón, es necesario la construcción de una carrocería para poder hacer uso del vehículo tipo formula SAE completamente terminado, ya sea para competición o fines académicos. Es así que se realizará ante todo la contextura que tendrá la carrocería mediante el uso de un Software de diseño Asistido por Computador (CAD), para posteriormente efectuar un análisis del flujo de aire del vehículo en un Software de Ingeniería Asistida por Computador (CAE), en donde se verificará mediante simulación el mejor diseño de carrocería, estudiando su aerodinámica y comportamiento cuando este se encuentra en avance y definitivamente proceder a su elaboración siguiendo normas de diseño que se encuentran estipuladas en el reglamento de la competición de la formula SAE.

También se encuentra involucrado el tipo de material que se utilizará para su construcción, ya que de este depende el comportamiento aerodinámico que presente la carrocería cuando esta se encuentre en pista. Según (Caiza & Vilaña, 2015) la aerodinámica de un automotor en la actualidad juega un papel fundamental al momento de competir, ya que un diseño efectivo permite que el flujo de aire no afecte en gran parte al vehículo y, a su vez, generará un desplazamiento sutil a elevadas velocidades. Finalmente, cabe recalcar que la fabricación de vehículos tipo formula SAE tiene un alto impacto a nivel internacional.

## **1.6. SITUACIÓN ACTUAL**

La Universidad Técnica del Norte dispone de un prototipo formula SAE el cual contiene un chasis ya construido, con sus demás complementos como ruedas, sistema de suspensión, dirección y motor, por lo que se ve necesario realizar el diseño y construcción de una carrocería que permita satisfacer las necesidades de este vehículo, tomando como premisa principal la existencia de dicho chasis.

En la actualidad, la mayoría de las universidades del mundo que se ven involucradas con el área de Mecánica-Automotriz están siendo participe en la competencia de formula SAE. Esta competencia reúne a las mejores universidades y pone a prueba el conocimiento adquirido a través de su formación académica, ya que en este punto es donde se requiere poner en práctica el conocimiento en diseño, modelamiento por medio de softwares y además de procesos de construcción, es por ello que en el presente proyecto se desarrollará la carrocería del vehículo monoplace, teniendo en cuenta las mejores opciones de fabricación, enfocándonos principalmente en la aerodinámica, ya que de esta depende en gran medida obtener un óptimo desempeño y un mejor rendimiento del automotor.

Según (Granda & Tapia, 2018) el material más usado en la elaboración de carrocerías hoy en día es la fibra de vidrio, esto se debe a que posee diversas particularidades que lo hacen un material idóneo y apropiado para la construcción de las mismas; algunas de las características de este material es su buena rigidez mecánica, conserva un peso relativamente bajo, es cómodo para manipular y su costo no es muy elevado.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. FORMULA SAE

Es una competencia cuyo objetivo radica en que los participantes expresen su creatividad e imaginación en la creación y construcción de un prototipo, que a su vez debe cumplir una serie de normas avaladas por la organización SAE Internacional.



**Figura 2.1** Competencia Formula Student  
(Fernández, 2020)

El desafío es crear un vehículo tipo formula que logre competir con éxito en dos aspectos fundamentales que son eventos estáticos y dinámicos. La competencia en definitiva brinda la oportunidad a que distintos institutos de todo el mundo demuestren su creatividad y habilidades de ingeniería.

##### 2.1.1. Normativas de la Formula SAE Para la Carrocería

Para realizar los bosquejos y construcción de la carrocería nos basaremos en el Reglamento de la Formula SAE 2023, el cual establece lo siguiente:

- No debe haber ninguna abertura en la carrocería, especialmente en el habitáculo del conductor, que se extiende desde la parte delantera del vehículo hasta el cortafuegos o mamparo. Además, sólo se permiten aberturas mínimas cerca de los elementos de la suspensión delantera.
- Los bordes afilados o elementos sobresalientes en la carrocería, esencialmente en la parte delantera, están completamente prohibidos.
- Todos los bordes frontales de la carrocería que pueden contactar o causar daño a las personas, incorporada la nariz del vehículo, deben poseer radios delanteros mínimos de 38 mm (1,5 pulgadas). Estos radios mínimos deben expandirse por lo menos 45° o más en relación con la trayectoria de desplazamiento hacia enfrente, a lo largo de

la sección superior, inferior y lateral de todos los bordes relevantes (SAE International, 2023, pág. 68).

## **2.2. TÉCNICAS DE DISEÑO E INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADOR**

Los ingenieros mecánicos utilizan estas aplicaciones computacionales que funcionan bajo principios científicos y matemáticos, esto con el fin de resolver problemas de diferentes tipos. Por medio de la simulación, se logra obtener una prospectiva de cómo sería el producto final permitiendo así reducir el consumo de recursos económicos que podrían ser aprovechados de mejor manera.

### **2.2.1. Diseño asistido por computador (CAD)**

Esta innovación nos brinda la facilidad de poder diseñar y crear piezas o elementos con una geometría compleja. Además, nos brinda una visualización tridimensional de cómo se vería el prototipo que estemos modelando, en donde nos permite trabajar identificando ciertos inconvenientes como acoples o futuros ensambles que se podrían realizar con dicho elemento en el que se está trabajando. También nos brinda la facilidad de poder obtener planos de construcción con sus respectivas acotaciones, lo que resulta de gran ayuda para fines de construcción.

### **2.2.2. Ingeniería Asistida por Computador (CAE)**

Los softwares CAE permiten trabajar dentro de prototipos diseñados de manera virtual, identificando el comportamiento de los mismo frente a diferentes fenómenos físicos ya pueden ser estas fuerzas aplicadas entre los cuales tenemos que se pueden aplicar de forma: campo acoplado, estructurales, electromagnéticos y térmicos.

Los programas CAE funcionan resolviendo ecuaciones diferenciales parciales utilizando el método de elementos finitos como principio fundamental, por lo que, su proximidad a la realidad es bastante considerable y su implementación en distintas áreas de la ingeniería se ve cada vez con mayor aceptabilidad.

### **2.2.3. Método de elementos finitos (FEM)**

Este sistema es de suma importancia para la resolución de problemas mecánicos, civiles, industriales, físicos e ingenieriles. Considerando que su método está basado en resolver de manera matemática problemas que en su gran mayoría resultarían muy complicados de realizar, evitando de esta manera el desarrollo de prototipos laboriosos, lo que generaría

elevados gastos económicos y pérdida de tiempo que se podrían optimizar de mejor manera para el desarrollo del elemento final. El FEM permite la creación y visualización de un modelo matemático para calcular el sistema real, ofreciendo una alternativa más rentable y adaptable a los prototipos. No obstante, conserva las cualidades de ser una técnica aproximada debido a las hipótesis fundamentales involucradas. Todavía se necesitan prototipos, aunque en cantidades reducidas, ya que esta herramienta puede aproximarse al diseño óptimo sin las complejidades asociadas con la prueba y error en los prototipos experimentales.

### **2.3. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)**

La CFD, por sus siglas en inglés Computational Fluid Dynamics es una herramienta poderosa que usa algoritmos y métodos numéricos para analizar y solucionar problemas relacionados con el flujo de fluidos. Se emplean computadoras para ejecutar millones de cálculos necesarios para modelar la interacción entre gases y líquidos con sólidos complejos vinculados con la ingeniería.

Existen varios softwares de CFD en el mercado, algunos de estos son: Ansys, STAR-CD, OpenFOAM, Flow-3D, CFD de Autodesk, entre otros.

#### **2.3.1. Aplicaciones de la CFD en la industria automotriz**

La CFD encuentra una amplia aplicación en el sector automotriz para la optimización y el diseño de vehículos y componentes que están directamente relacionados con el flujo de fluidos.

Las aplicaciones más comunes en la industria del automóvil son:

- Aerodinámica en la carrocería
- Refrigeración del motor
- Sistema de ventilación

En CFD el objetivo es predecir los valores tanto de momentos como de fuerzas, los cuales se obtienen generalmente al realizar un túnel de viento y, por ende, se tiene una idea de las distintas fuerzas que intervienen sobre el automóvil.

#### **2.3.2. Estructura de CFD**

Realizar una simulación en CFD implica una serie de etapas que se siguen cuidadosamente para obtener resultados precisos y confiables. Principalmente, se divide en tres etapas que

son el pre-procesamiento, el procesamiento para el cálculo CFD o solver y el post-procesamiento (Fernández, 2019).

### **2.3.2.1. Pre-procesamiento**

En la fase de pre-procesamiento se establece la configuración necesaria al sistema que será objeto de simulación. Esto implica:

- Realizar o exportar la geometría 3D que se desea simular, lo que implica diseñar desde cero o importar modelos CAD existentes.
- Crear un dominio computacional o también conocido como túnel de viento.
- Crear la malla, es decir, el dominio se divide en una cantidad apropiada de celdas. Estos elementos pueden ser triángulos o cuadriláteros si se trata de 2D (dos dimensiones o bidimensional) o tetraedros, hexaedros u otros poliedros si son 3D (tres dimensiones o tridimensional). La eficacia y precisión de la simulación se ven influenciadas por la calidad de la malla.
- Definir las condiciones de contorno apropiadas.
- Especificar las cualidades físicas del fluido (densidad, viscosidad, peso específico, entre otras).

### **2.3.2.2. Procesamiento para el cálculo CFD o solver**

Representa el fragmento primordial del proceso de resolución y asume la responsabilidad de solucionar iterativamente las ecuaciones que fueron previamente activadas en la fase de pre-procesamiento (Fernández, 2012).

En esta fase, el software resuelve el problema mediante el uso de modelos matemáticos, y el tiempo de ejecución está condicionado por la complejidad del modelo deseado y la capacidad de procesamiento del ordenador.

### **2.3.2.3. Post-procesamiento**

En esta parte se lleva a cabo la visualización de resultados, es decir, mediante herramientas de visualización se puede crear imágenes y animaciones que muestran los resultados del estudio aerodinámico, como patrones de flujo, distribuciones de presión, velocidades, temperaturas y otras propiedades más que se encuentran presentes alrededor del prototipo.

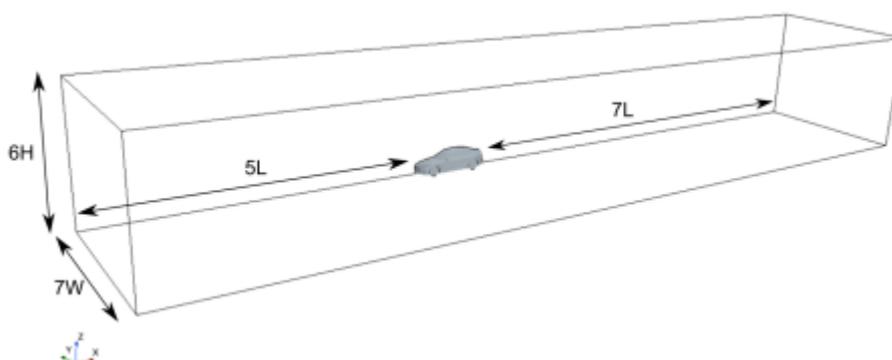
Además, se efectúa un análisis de datos en el que se extrae información cuantitativa de los resultados para responder preguntas específicas y evaluar si los objetivos de simulación se

han cumplido. Los resultados también deben mostrar mapas de curvas de los contornos, la malla numérica, las trayectorias del flujo y los patrones de velocidad (Xáman & Gijón, 2016).

Es importante destacar que realizar simulaciones CFD puede ser un proceso complejo y requerir conocimientos especializados en dinámica de fluidos y matemáticas. Además, la elección de software de simulación y hardware de computación adecuados también son fundamentales para el éxito de la simulación.

### 2.3.3. Dominio computacional

Durante la etapa de configuración del dominio computacional, es de suma importancia tomar en cuenta diversos aspectos tales como el tamaño de la región en la que se sitúa el vehículo, establecer los límites de los lados, asegurándose de que tanto la entrada como la salida estén a una distancia considerable del diseño debido a que es necesario dejar que el flujo de aire se normalice antes de entrar en contacto con el modelo de estudio.



**Figura 2.2** Dimensiones principales del dominio computacional  
(Alegre, 2022, pág. 24)

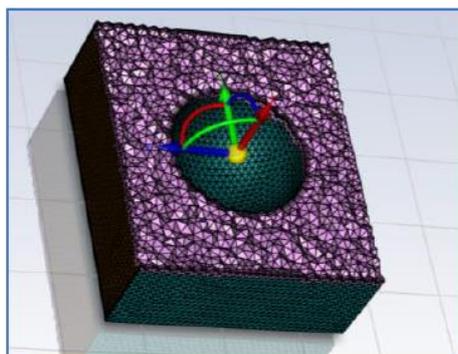
La figura 2.2 ilustra las medidas del dominio computacional empleado en el estudio de investigación sobre el efecto en la resistencia aerodinámica, rendimiento y consumo de vehículos eléctricos mediante un análisis CFD. En la cual (H) representa la altura, (W) se refiere al ancho y (L) indica la longitud del vehículo. Las dimensiones asignadas al dominio no tienen efecto alguno en los resultados finales de la simulación; teniendo en cuenta que estas dimensiones se derivaron de investigaciones posteriores que realizaron simulaciones en un vehículo tipo Formula “SAE” (Alegre, 2022, pág. 24).

De acuerdo con el trabajo de investigación de (Carenzo et al., 2013), se afirma que en situaciones donde los dominios poseen dimensiones grandes, se necesitarán mayores recursos de hardware o capacidad computacional, así como también un tiempo de

procesamiento más largo, llegando a la conclusión de que un aumento en el tamaño del dominio no afecta en los resultados finales. En resumen, esto implica que no es necesario dimensionar excesivamente los túneles de viento.

### 2.3.4. Tipos de malla

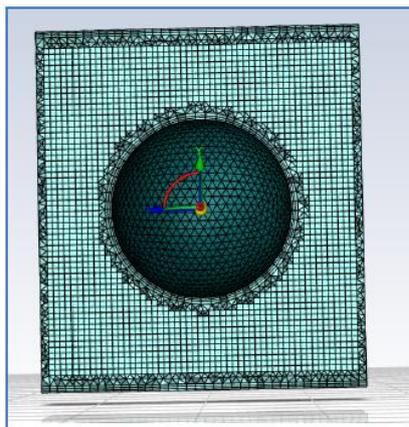
#### 2.3.4.1. Malla tetraédrica



**Figura 2.3** Malla Tetraédrica  
(ANSYS, 2015)

La malla tetraédrica es adecuada para geometrías complejas, ya que al generar elementos tetraédricos se adapta fácilmente a la forma geométrica sin requerir una generación de malla demasiado elaborada. No obstante, la exactitud de los resultados no ha alcanzado los niveles deseados, ya que, en comparación con otros tipos de malla como por ejemplo la poliédrica, la malla tetraédrica requerirá más elementos para representar la misma geometría, lo que genera un aumento en el gasto computacional y a su vez la calidad en el mallado no es muy buena (ANSYS, 2018). Un ejemplo se presenta en la figura 2.3.

#### 2.3.4.2. Malla hexcore

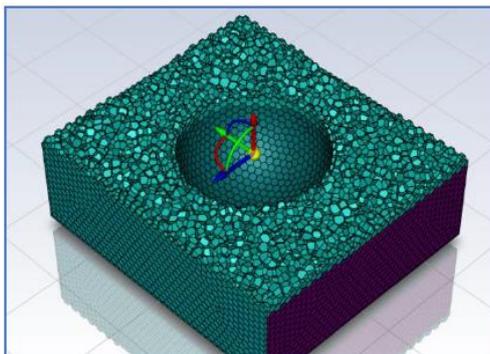


**Figura 2.4** Malla Hexcore  
(ANSYS, 2015)

La malla hexcore se desarrolló con el propósito de conseguir resultados de mejor calidad en comparación con el mallado poliédrico. El enfoque de hexcore es utilizar una mayor

proporción de mallas hexagonales octree para cubrir la mayor parte de la geometría. No obstante, presenta la desventaja de prolongar los tiempos de solución y requiere un mayor uso de memoria RAM, lo que implica una necesidad de almacenamiento más amplia al momento de obtener los resultados (ANSYS, 2015). En la figura 2.4 se aprecia un ejemplo de este tipo de malla.

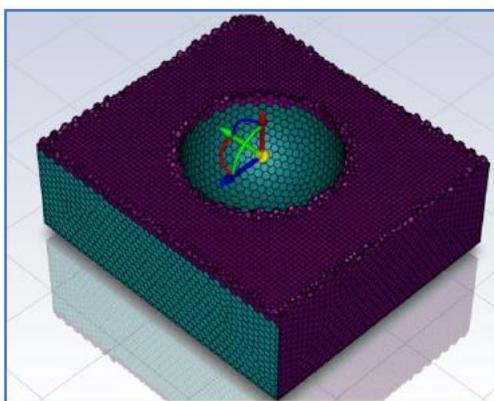
#### 2.3.4.3. Malla poliédrica



**Figura 2.5** Malla Poliédrica  
(ANSYS, 2015)

La malla poliédrica, en cada una de las celdas o elementos, posee múltiples conexiones, lo que da lugar a una aproximación más precisa de los gradientes. A diferencia de los tetraedros, son menos perceptibles a la deformación, lo que conduce a una malla de mayor calidad y estabilidad en el modelo. La malla tetraédrica se transforma en malla poliédrica a través de la subdivisión de cada celda en varios sub-volúmenes, los cuales luego se adaptan y fusionan con las celdas adyacentes (Sosnowski et al., 2018). Un claro ejemplo se indica en la figura 2.5.

#### 2.3.4.4. Malla Poly hexcore



**Figura 2.6** Malla Poli hexcore  
(ANSYS, 2015)

A comparación de la malla hexcore estándar, esta malla posee una mayor calidad y se destaca por su capacidad para producir una mejor velocidad para el solucionador, dependiendo de la aplicación específica. En el ámbito de la CFD, esta configuración de malla habilita la implementación de estrategias innovadoras para resolver con mayor nivel de exactitud y velocidad el flujo alrededor de geometrías complejas (Zore et al., 2019). En la figura 2.6 se aprecia un ejemplo preciso de este tipo de malla.

### 2.3.5. Calidad de malla

La malla define los lugares donde las ecuaciones de flujo serán resueltas, de esto influye en que tan precisa puede ser la simulación de acuerdo al tipo y calidad de malla que se produzca. Aproximadamente el 70% del procedimiento de simulación CFD se concentra en la generación de una malla de alta calidad, la cual está sujeta al rendimiento del ordenador que se tenga a disposición. Los dos parámetros principales para determinar la calidad de malla se muestran a continuación:

- **“Skewness” (Oblicuidad):** Da a conocer qué tan próxima se encuentra una celda o elemento de conseguir su forma ideal (Molina & Vilaña, 2018, pág. 22). Para elementos triangulares, esto significa qué tan cerca está el elemento de ser un triángulo equilátero.

Un Skewness de cero representa un elemento equilátero, por el contrario, un valor de 1 indica un elemento deformado. En otras palabras, un valor alto de skewness indica que los ángulos entre los lados de cada una de las celdas son muy diferentes, lo que conlleva a dificultades de convergencia y, por ende, ocasiona errores en la simulación. Idealmente, se buscan valores bajos de skewness para ser considerados como excelentes. No se aconseja un valor elevado de oblicuidad, por tal motivo, el valor más alto que puede llegar a tener debe estar por debajo de 0.95 para ser considerado como aceptable.



**Figura 2.7** Valores de referencia de Skewness  
(ANSYS, 2015)

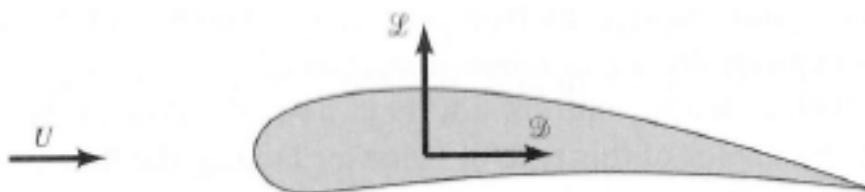
- **“Orthogonal Quality” (Calidad Ortogonal):** Guarda relación con la longitud existente entre los ángulos y las caras de los elementos de malla adyacentes, con el propósito de alcanzar un ángulo ideal, generalmente este ángulo debe ser de 90 grados, es decir, dicho parámetro indica cuan perpendiculares están las caras de los elementos entre sí. Esto conduce a una estimación de la calidad de malla estableciendo valores que oscilan entre 0 y 1, en donde 1 indica una calidad excelente y 0 indica una calidad inaceptable (Valencia, 2017, pág. 15).



**Figura 2.8** Valores de referencia de Orthogonal Quality  
(ANSYS, 2015)

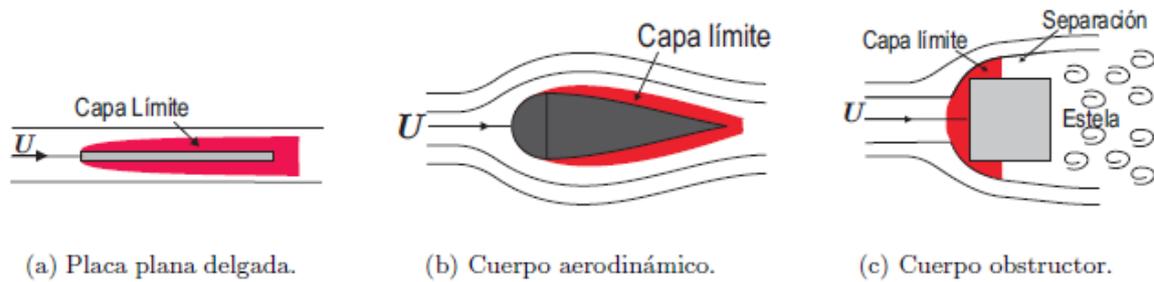
### 2.3.6. Capa límite

Cuando un objeto se encuentra involucrado con un flujo, sufre una fuerza neta generada por la interacción entre el objeto y el flujo. Esta fuerza neta surge tanto de las fuerzas de fricción en la superficie del objeto, conocidas como esfuerzos de corte en la pared del objeto ( $\tau_w$ ), como de las fuerzas perpendiculares a la superficie. La suma de las fuerzas horizontales resultantes se conoce como fuerza de arrastre (D), mientras que las fuerzas verticales se denominan empuje o sustentación (L).



**Figura 2.9** Fuerzas resultantes horizontal y vertical sobre un perfil alar  
(Gherardelli, 2007)

La intensidad de estas fuerzas varía en función de cómo se direcciona el flujo alrededor del cuerpo, lo cual a su vez está influenciado por la geometría del cuerpo, las condiciones del flujo y la relación espacial entre el cuerpo y el flujo. La figura a continuación muestra el flujo alrededor de 3 cuerpos con distintas geometrías.

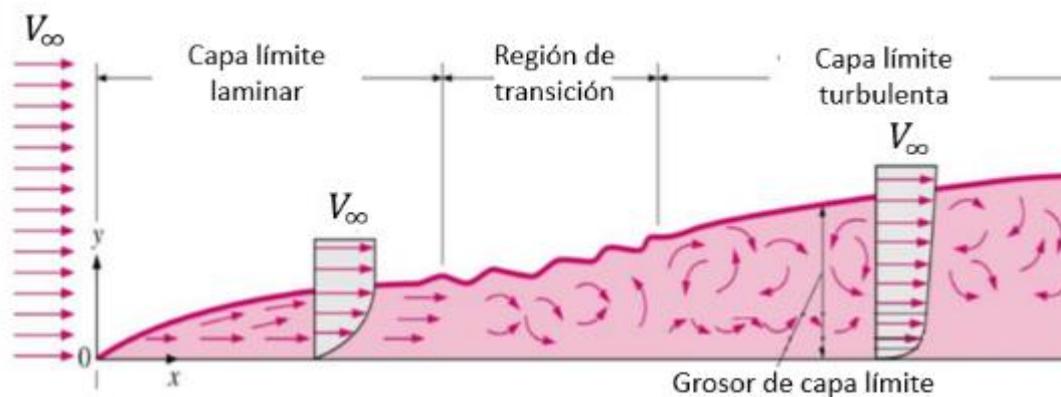


**Figura 2.10** Capa límite sobre diferentes cuerpos  
(Gherardelli, 2007)

Dentro de la aerodinámica, se hace referencia a la capa límite como la región del flujo de aire que se forma en las zonas cercanas a la superficie de un objeto que está expuesto al movimiento del aire, tales como un avión, un automóvil u otro cuerpo en desplazamiento. Esta capa límite representa una zona de transición entre el flujo del aire sin restricciones y la superficie del objeto, donde puede ocurrir un cambio abrupto en la velocidad del aire y otras propiedades.

La capa límite presenta una gran relevancia en la aerodinámica, ya que incide en cómo el flujo de aire se comporta en torno a un objeto, lo cual, a su vez, impacta en factores como la resistencia aerodinámica, la sustentación y otros aspectos del desempeño. Esta capa puede ser dividida en dos categorías primordiales:

- **Capa límite laminar:** En esta área, la corriente de aire fluye de manera más suave y ordenada. La velocidad se incrementa gradualmente desde cero en la superficie del objeto hasta alcanzar la velocidad del flujo sin obstrucciones. Esta capa límite es más delgada y tiende a causar menos resistencia en comparación con la capa límite turbulenta.
- **Capa límite turbulenta:** En tanto que nos distanciamos de la superficie del objeto, la capa límite puede volverse turbulenta. En esta zona, el flujo se vuelve más inestable, con distintas velocidades variando en diferentes direcciones y escalas. Este tipo de capa límite es más espesa que la laminar y puede producir mayor resistencia debido a la mayor interacción y fricción entre las distintas capas del fluido.

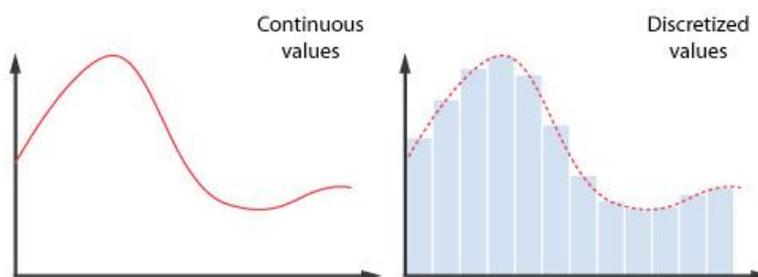


**Figura 2.11** Capa límite laminar y turbulenta  
(Fernández, 2019)

Supervisar y administrar la capa límite resulta fundamental para conseguir vehículos con una eficiencia aerodinámica sobresaliente y aceptable. La reducción de la resistencia generada por la capa límite tiene el potencial de optimizar el consumo de combustible y la estabilidad de los vehículos. Para alcanzar un mejor rendimiento, se aplican tácticas como el diseño de superficies aerodinámicas específicas, el control activo del flujo y tecnologías que dilatan la transición entre capa límite laminar y turbulenta.

### 2.3.7. Discretización

La discretización se refiere al proceso de aproximar una variable continua en una representación que contiene un conjunto finito de puntos (Sánchez, 2004).



**Figura 2.12** Discretización de valores  
(Ueyama, 2019)

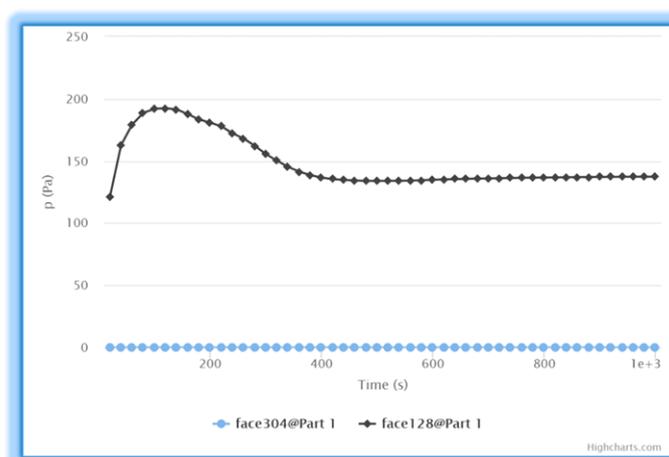
El proceso de discretización en CFD involucra dividir el dominio de interés en elementos finitos o celdas de malla. Cada celda almacena valores aproximados de las propiedades del flujo en sus puntos nodales. Las ecuaciones diferenciales de la física del flujo se reemplazan por ecuaciones algebraicas aproximadas que se pueden resolver en una malla computacional. La discretización que usa la CFD es la espacial y se realiza generalmente utilizando métodos numéricos como los métodos de elementos finitos, diferencias finitas y volúmenes finitos.

La elección de la discretización adecuada y la resolución numérica eficiente son cruciales para lograr resultados precisos y confiables en las simulaciones de flujo de fluidos.

### 2.3.8. Convergencia

La convergencia se refiere a la aptitud que posee un grupo de ecuaciones algebraicas para reproducir la solución analítica del grupo de ecuaciones diferenciales. La convergencia de las ecuaciones sucede al momento de que la solución numérica se parece o es similar a la solución analítica, lo cual generalmente ocurre cuando se utiliza un tipo de mallado más fino.

En el caso de un sistema de ecuaciones algebraicas que se asemeja a un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales, la convergencia se logra cuando la solución aproximada tiene un valor constante para cada valor de la variable independiente, especialmente cuando el tamaño del espacio en la malla se reduce entre cada celda de mallado.



**Figura 2.13** Convergencia de la presión promedio en un análisis (Oezcan, 2020)

## 2.4. PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA AERODINÁMICA

### 2.4.1. Eficiencia aerodinámica

Una aerodinámica eficaz proporciona al vehículo beneficios específicos en su avance, lo que lleva a una reducción del tiempo en pista. El diseño tiene como objetivo minimizar el coeficiente de resistencia aerodinámica ( $C_x$ ), el cual interviene en la potencia del motor necesaria para superar la fuerza de resistencia y, por lo tanto, conserva la energía mecánica producida por el motor. Además, la geometría del vehículo debe facilitar un flujo de aire adicional que ayude al sistema de refrigeración sin comprometer el control y la aerodinámica (Granda & Tapia, 2018, pág. 4).

Después de tomar en cuenta las consideraciones de diseño, a continuación, se debe integrar los aspectos estéticos con una aerodinámica efectiva, es decir, que el vehículo sea veloz y seguro, para esto se deben considerar ciertos aspectos de la reglamentación y seguridad que se imponen, y a partir de ahí, se puede realizar el modelamiento.

#### **2.4.2. Aerodinámica**

La aerodinámica es un campo de la física que se basa en analizar cómo los fluidos se comportan cuando interactúan con objetos inmersos en ellos, y su relevancia reside en la necesidad de predecir dicho comportamiento.

Es fundamental deducir las formas geométricas que mostrarán los objetos para aprovechar al máximo su aplicación. El objetivo fundamental de la geometría es minimizar la resistencia que opone el vehículo cuando se encuentra en marcha, producida principalmente por el rozamiento que existe entre el aire y su paso a través de él.

En los automóviles modernos, camiones y vehículos de competición, la aerodinámica busca contribuir a las cargas que se producen en la calzada. Las fuerzas aerodinámicas se involucran en el automóvil provocando elevación, fuerzas laterales, resistencia, derrape y ruido que por lo general es lo que se busca evitar dentro de la conducción, además de que esto afecta considerablemente sobre la economía de combustible y el manejo (Caiza & Vilaña, 2015, pág. 7).

En la aerodinámica del vehículo, tanto las fuerzas como los momentos se ven afectados en el desempeño, firmeza y control del automóvil, y estos efectos se vuelven significativamente más pronunciados a medida que aumenta la velocidad. Además del impacto directo de las fuerzas aerodinámicas, la interacción de las ruedas también puede ejercer una influencia importante en el desempeño de aceleración lateral.

La aerodinámica de un prototipo de competición se ve examinada por desafíos tales como:

- Generación de fuerza lateral y sustentación aerodinámica evitando al mismo tiempo una resistencia excesiva.
- Minimización de la resistencia aerodinámica mediante consideraciones de la forma externa, control del flujo y optimización del diseño del ducto para la eficacia del flujo de aire interno (Pauta & Sánchez, 2014, pág. 5).

### 2.4.3. El entorno del diseño aerodinámico

Al comenzar con un nuevo diseño en una concepción de un vehículo tipo FSAE se deben tener en cuenta aspectos como la habitabilidad, ergonomía, desempeño, aerodinámica y seguridad que presente el vehículo. Es importante que cada uno de estos aspectos se logre consolidar de manera adecuada para lograr generar una buena aceptación del prototipo.

Dentro del diseño óptimo que abarca todos los aspectos ya mencionados, existe la oportunidad de utilizar materiales de construcción de carrocerías con los que se consigue cada vez mejorar el diseño de una nueva percepción de vehículo.

Se debe considerar una serie de aspectos como:

- Establecer flujos de aire para enfriar el motor
- Resistencia según las necesidades del material
- Espacio apropiado para el escape
- El nivel de ergonomía y espacio interior en relación al diseño
- Uso de neumáticos adecuados - más anchos
- Costo de fabricación
- Estética



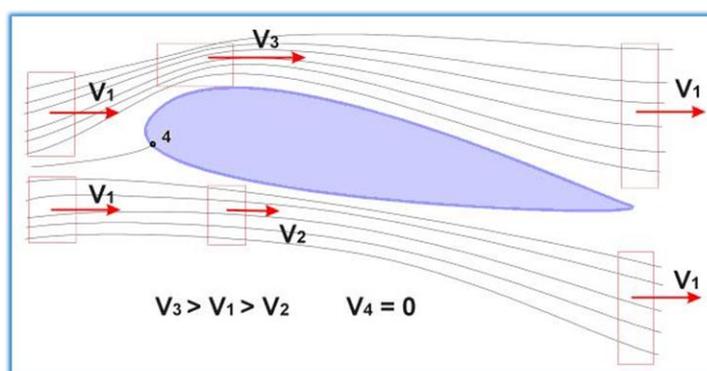
**Figura 2.14** Diseño y modelo de vehículo para competencia  
(GRUPO CARMAN, 2014)

En este proyecto, el objetivo primordial es crear una carrocería que sea liviana, compacta y segura en términos de aerodinámica. El diseño debe tener como objetivo minimizar la resistencia del aire durante el movimiento del vehículo y al mismo tiempo garantizar la estabilidad a altas velocidades.

Es importante considerar que la aerodinámica en sí misma constituye el 40% de la eficacia total del vehículo, siendo el motor el único componente que puede igualar este porcentaje, mientras que el 20% sobrante corresponde a otros aspectos (Pauta & Sánchez, 2014, pág. 6).

#### 2.4.4. Líneas de corriente de aire

Las líneas de corriente representan las curvas que se relacionan con una representación gráfica del movimiento de un flujo. Cuando observamos que el vehículo se mueve a una velocidad permanente, estamos percibiendo un estado de equilibrio en el flujo de aire, donde el aire y sus partículas se mueven de manera constante a lo largo de las líneas de transición.



**Figura 2.15** Análisis de Ala de Viento  
(Toledo, 2018)

Al examinar diferentes patrones en el flujo de aire, es posible confirmar si este se ajusta a la forma del perfil en toda su superficie (Caiza & Vilaña, 2015, pág. 8).

La interacción entre el aire y el vehículo implica dos flujos distintos:

- Flujo de aire interno
- Flujo de aire externo

#### 2.4.5. Flujo de aire interno

Hace referencia al aire presente en el habitáculo del piloto, que se utiliza para ventilación y puede influir en la entrada y ventilación del motor. Este flujo de aire representa un 20% de la resistencia aerodinámica, incidiendo el confort climático del piloto y mejorando la eficacia térmica del motor (Pauta & Sánchez, 2014, pág. 9).

Desde una perspectiva de ventilación, la aerodinámica interior debe cumplir los siguientes objetivos:

- Conservar la temperatura estable en el habitáculo del piloto, independientemente de las condiciones climáticas y la velocidad a la que este se encuentre el automóvil.

- Facilitar el intercambio de aire sin alterar su flujo interno.
- Preservar la humedad interior sin cambios.

#### **2.4.6. Flujo de aire externo**

Este tipo de flujo se describe al aire que fluye alrededor de la carrocería y el que circula entre esta y el pavimento. Dando lugar como el primordial factor que interviene frente a la resistencia aerodinámica.

Los factores cruciales que predominan en este aspecto incluyen:

- Dimensión y forma de la carrocería.
- Velocidad del vehículo en relación con su avance.
- Densidad del aire.
- Tipo de superficie del cuerpo.
- Fricción con la capa de aire que entra en contacto con la carrocería.

Para analizar este flujo, se utilizan dos tipos de estudios:

- Flujo laminar
- Flujo turbulento

#### **2.4.7. Flujo laminar**

También denominado flujo uniforme, en este tipo de flujo, cada partícula de aire se desplaza con relación a la carrocería en la misma velocidad y dirección con referente a los agentes que lo rodean, lo que resulta en un tránsito del aire de manera organizada.

#### **2.4.8. Flujo turbulento**

Una vez que el fluido del aire deja de ser parte del flujo laminar, se convierte en un flujo turbulento. Esto ocurre cuando ciertas partículas de aire pierden su velocidad e incluso su dirección se ve afectada con respecto a las demás partículas, es decir, se vuelve un tránsito de partículas desorganizadas.

#### **2.4.9. Número de Reynolds**

Es un parámetro adimensional empleado para caracterizar el tipo de flujo que ocurre alrededor de un objeto o en un ducto, teniendo en cuenta que se relaciona directamente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas presentes en el flujo de un fluido (Çengel & Cimbala, 2006, pág. 324).

Para calcular dicho parámetro se utiliza la siguiente fórmula:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad [2.1]$$

En donde:

$\rho$ : Densidad del fluido  $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

V: Velocidad del fluido  $\left[\frac{m}{s}\right]$

L: Longitud característica del objeto inmerso en el fluido [m]

$\mu$ : Viscosidad dinámica del fluido [Pa \* s], a una temperatura de 18 °C la viscosidad dinámica es de  $1.8158 \times 10^{-5}$  [Pa \* s].

Este parámetro es esencial porque permite clasificar el flujo en diferentes regímenes:

- Flujo laminar: Se presenta cuando  $Re \leq 2300$ .
- Flujo transicional: Se encuentra en el rango de  $2300 \leq Re \leq 4000$ , considerando que la región de transición el flujo varía aleatoriamente entre laminar y turbulento.
- Flujo turbulento: Sucede cuando  $Re \geq 4000$ .

Igualmente, dicho parámetro es de gran utilidad para comprender cómo se comporta el flujo en distintas situaciones, incluyendo el diseño de aeronaves, automóviles, sistemas de tuberías y en muchas otras aplicaciones de ingeniería y ciencia relacionadas con fluidos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta clasificación es una simplificación, y en situaciones prácticas, el flujo puede ser más complejo, especialmente en situaciones de flujo transicional o en geometrías complicadas.

#### 2.4.10. Número de Mach

Es una medida clave que define la velocidad de flujo de un fluido con respecto a la velocidad del sonido en ese mismo entorno (Paccieri, 2020). Se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$Ma = \frac{V}{c} \quad [2.2]$$

$$c = \sqrt{K * R * T} \quad [2.3]$$

Donde:

Ma: es el número de Mach

V: es la velocidad del flujo  $\left[\frac{m}{s}\right]$

c: es la velocidad del sonido en el medio donde se mueve el objeto  $\left[\frac{m}{s}\right]$

K: es la razón de calor específico con un valor de 1.4

R: es la constante de gas específica para el aire, con un valor de  $287.05 \left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$

T: es la temperatura del medio local en grados Kelvin [K]

Esta medida es relevante en la mecánica de fluidos debido a su conexión con la compresibilidad de un gas. Cuando el número de Mach se encuentra por debajo de 0.3, se clasifica el flujo como incompresible en el análisis de aerodinámica y modelos que involucran aire o gases. Esta categorización reduce considerablemente los cálculos efectuados mediante ordenadores, contribuyendo a una mayor facilidad en el proceso de estudio (Çengel & Cimbala, 2006).

#### 2.4.11. Principio de Bernoulli

Es un principio esencial en la aerodinámica, ya que describe que la energía total en un sistema de fluidos con flujo laminar se mantiene constante en el transcurso de toda su trayectoria. Esto implica que cuando la velocidad del fluido aumenta, su presión disminuye y viceversa (Skybrary, 2021).

En términos matemáticos, el principio de Bernoulli se puede expresar de la siguiente manera:

$$P + \frac{1}{2} * \rho * V^2 + \rho * g * h = constante \quad [2.4]$$

Donde:

P: Presión del fluido en una zona considerada.

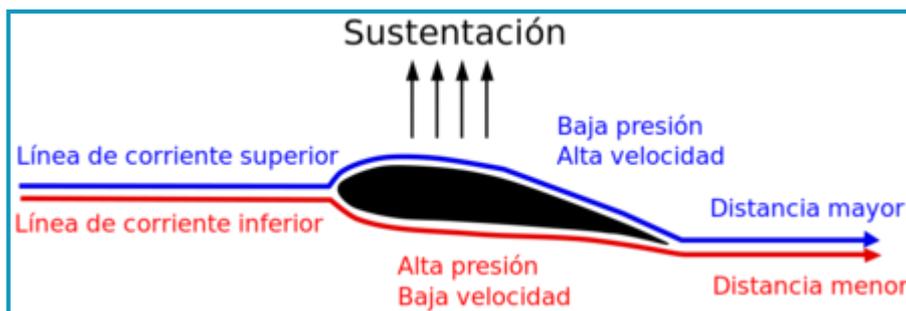
$\rho$ : Densidad del fluido.

V: Velocidad del fluido en esa zona.

g: Aceleración gravitatoria.

h: Altura en dirección a la gravedad respecto a una referencia.

Esta ecuación muestra que la suma de la energía de presión estática (P), la energía cinética ( $\frac{1}{2} * \rho * V^2$ ) y la energía potencial gravitatoria ( $\rho * g * h$ ) es constante en el transcurso de toda la corriente de fluido (Zapata, 2021).



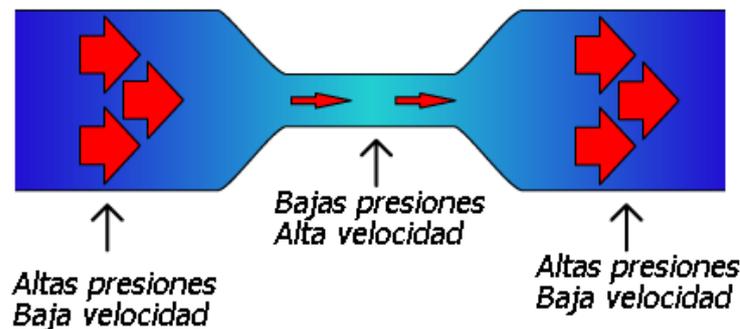
**Figura 2.16** Líneas de flujo en un perfil del ala de un avión  
(Martínez, 2020)

Al emplear este principio a un perfil aerodinámico, observamos que la corriente de aire aumenta su velocidad en la parte superior ya que posee una distancia superior de recorrido por tal motivo disminuye su presión. Por otro lado, en la parte inferior, la velocidad es menor, lo que resulta en una mayor presión; esta diferencia de presión es lo que genera la fuerza de sustentación que facilita volar a los aviones y conservar a los vehículos adheridos al suelo cuando se invierte el perfil aerodinámico.

Es importante tener en cuenta que el principio de Bernoulli en su forma original es válido solo para flujos incompresibles y sin viscosidad, es decir, para flujos que tengan un número de Mach de hasta aproximadamente un valor de 0.3. Cuando el flujo es compresible o viscoso, se requieren modelos matemáticos más avanzados y complejos, lo que limita su aplicabilidad a ciertos casos específicos.

#### 2.4.12. Efecto Venturi

Este efecto, se fundamenta en el teorema de Bernoulli, ya que cuando el fluido atraviesa la sección estrecha del conducto (donde su velocidad es mayor), la presión en esa sección disminuye debido a la correlación inversa entre la velocidad y la presión según el teorema de Bernoulli. Luego, en la sección más ancha, la velocidad del fluido reduce y la presión vuelve a incrementar.



**Figura 2.17** Tubo de Venturi  
(Rodríguez, 2014)

De esta manera, el fenómeno que se origina cuando el flujo de aire se acerca a un automóvil de competición se asemeja notablemente al que se observa en un tubo de Venturi situado en la parte inferior del automóvil. En esta zona, el aire pasa desde su sección inicial, que es naturalmente más amplia, a una sección considerablemente más estrecha en el fondo plano del vehículo. Como resultado, el flujo de aire aumenta su velocidad, lo que da lugar a una reducción de presión y, en consecuencia, genera una fuerza aerodinámica hacia abajo, es decir, se genera una carga en el vehículo en dirección al pavimento.



**Figura 2.18** Efecto Venturi Adaptado a un F1  
(Díaz, 2013)

## 2.5. MODELOS PARA EL ANÁLISIS DE TURBULENCIA

Se examinará brevemente varios modelos matemáticos disponibles, abordando los diversos modelos incorporados en el software ANSYS, con el objetivo de seleccionar el modelo más apropiado que se ajuste a los parámetros y requisitos específicos de nuestra simulación.

- Modelo K- $\epsilon$  (Épsilon)
- Modelo RNG
- Modelo K- $\omega$  (Omega)

### 2.5.1. Modelo K- $\epsilon$ (Épsilon)

Ejecuta el cálculo de flujos que involucran recirculación. Aquí, "k" representa la energía cinética de la turbulencia y se determina como la variación en las fluctuaciones de velocidad.

Puede poseer dimensiones, por ejemplo, en  $\frac{m^2}{s^2}$ , lo que indica la tasa de disipación de los

vórtices de turbulencia (la velocidad a la que las fluctuaciones en la velocidad se dispersan), con magnitudes por unidad de tiempo, expresadas en  $\frac{m^2}{s^3}$ .

Este modelo ofrece resultados satisfactorios para numerosos flujos industriales, como capas de corte, recirculaciones, entre otros. Sin embargo, su desempeño se deteriora en flujos no confinados (como estelas a larga distancia), flujos con capas límite altamente curvadas, flujos que presentan rotación y flujos que se desarrollan en conductos no circulares, entre otros.

Según (Cumbe & Rockwood, 2009) las ventajas y desventajas del modelo K- $\epsilon$  son las siguientes:

Ventajas:

- Es factible obtener resultados altamente precisos para una amplia gama de flujos.
- Solo se necesitan establecer las condiciones preliminares de operación y las condiciones de frontera.

Desventajas:

- Requiere un tiempo de iteración considerablemente más largo.
- Los resultados para flujos restringidos y flujos con gradientes longitudinales considerables son insatisfactorios.

### 2.5.2. Modelo RNG

Se utiliza para predecir la generación de remolinos de turbulencia y funciona de manera apropiada en situaciones de flujos con gradientes de presión desfavorables. También tiene la capacidad de considerar los efectos en situaciones de bajo número de Reynolds. Sin embargo, una desventaja es que se requiere configurar las leyes de pared, lo que conlleva a un aumento en el costo computacional (Cumbe & Rockwood, 2009, pág. 69).

### 2.5.3. Modelo K- $\omega$ (Omega)

Es un método ampliamente adoptado para abordar la turbulencia. Se compone de un sistema de dos ecuaciones, lo que implica que incorpora dos ecuaciones adicionales de transporte destinadas a simbolizar las características turbulentas del flujo. Esta configuración de dos ecuaciones permite que el modelo capture efectos tales como la difusión de la energía turbulenta y la convección.

La primera variable en este modelo es la energía cinética turbulenta, denotada como "k", mientras que la segunda variable es la disipación específica, que se utiliza para establecer la proporción de la turbulencia ( $\omega$ ). La primera variable, "k", tiene la función de cuantificar la energía presente en la turbulencia, mientras que la segunda variable ( $\omega$ ), desempeña un papel crucial al determinar la magnitud de la turbulencia (Pauta & Sánchez, 2014, pág. 42).

## 2.6. PROPIEDADES DEL FLUIDO

La carga que se ejerce en un vehículo de competencia en movimiento depende de varias cualidades de los fluidos, como la presión, densidad, viscosidad, temperatura, entre otras.

### 2.6.1. Densidad del aire ( $\rho$ )

Es una propiedad física que describe la correlación entre la masa (m) y el volumen (v) de un elemento o sustancia, como puede ser el aire. Sus unidades de medida más comunes son gramos por centímetro cúbico  $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$  o kilogramos por metro cúbico  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ , aunque esto depende sobre todo del sistema de unidades que se esté utilizado (Ruiz, 2023). Matemáticamente, se calcula con la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad [2.5]$$

Para calcular la densidad del aire en un medio dado, utilizamos la ley de los gases ideales en función de la presión y temperatura, que se expresa de la siguiente manera:

$$\rho = \frac{P}{R * T} \quad [2.6]$$

Donde:

$\rho$ : Densidad del aire  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

P: Presión del aire [Pa]

R: Constante de gas específica para el aire con un valor de 287.05  $\left[\frac{J}{kg*K}\right]$

T: Temperatura en grados Kelvin [K]

## 2.6.2. Viscosidad

La viscosidad en un fluido, ya sea un gas como el aire o un líquido, indica la resistencia interna que se opone al flujo de un fluido. Es una magnitud de la fricción entre las distintas capas del fluido mientras se desplazan entre sí, es decir, esta propiedad determina la cantidad de resistencia que el fluido experimentará al fluir debido a la fricción entre sus partículas.

En el caso del aire, al ser un gas, la viscosidad es considerablemente menor en comparación con los líquidos debido a la mayor separación entre las moléculas de gas. Esto implica que el aire fluye con mayor facilidad y rapidez en comparación con un líquido más viscoso, como el agua u otro líquido.

Aspectos como la temperatura y la presión inciden en la viscosidad del aire. A temperaturas más bajas, la viscosidad aumenta, lo que significa que el aire se vuelve más denso y opone más resistencia al flujo. Por otro lado, a temperaturas más altas, la viscosidad disminuye y el aire fluye más libremente. Existen dos principales tipos de viscosidad, las cuales se describirán a continuación.

### 2.6.2.1. Viscosidad dinámica

La viscosidad dinámica en un flujo de aire describe a la propiedad del aire que rige su resistencia interna al movimiento y su capacidad para transmitir fuerzas tangenciales entre las distintas capas de aire en movimiento. En términos más simples, la viscosidad dinámica del aire describe qué tan "adherente" o "resistente" es el aire mientras fluye con respecto a su interacción con sus moléculas (Sanguinetti, 2020).

Si el aire posee una viscosidad dinámica elevada, las capas de aire cercanas tendrán dificultades para moverse entre sí, resultando en un flujo más lento y menos uniforme. Por otro lado, si la viscosidad dinámica del aire es baja, las capas de aire podrán desplazarse con mayor facilidad, generando un flujo más rápido y suave. Se mide en unidades como poises (P) o newton por segundo por metro cuadrado  $\left(\frac{N*s}{m^2}\right)$ , también conocidos como pascal por segundo ( $Pa * s$ ). Su fórmula matemática es la siguiente:

$$\mu = \frac{\tau}{dv/dy} \quad [2.7]$$

En donde:

$\mu$ : Viscosidad dinámica

$\tau$ : Esfuerzo cortante (fuerza por unidad de área) que actúa en el fluido

$dv/dy$ : Velocidad de deformación, es decir, la variación en la velocidad en la dirección del flujo ( $v$ ) con respecto a la distancia ( $y$ ) en la dirección perpendicular al flujo.

### 2.6.2.2. Viscosidad cinemática

Se utiliza para describir la relación entre la viscosidad dinámica y la fluidez del fluido. Se mide en unidades como centistokes (cSt) o metros cuadrados por segundo ( $\frac{m^2}{s}$ ). Su fórmula es la siguiente:

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad [2.8]$$

En donde:

$v$ : Viscosidad cinemática  $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

$\mu$ : Viscosidad dinámica  $\left[\frac{Kg}{m*s}\right]$

$\rho$ : Densidad del fluido  $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

Los valores más comunes para la densidad y la viscosidad del aire y el agua se indican en la siguiente tabla:

**Tabla 2.1** Propiedades de Fluidos

FLUIDO	DENSIDAD $\rho = \left[\frac{Kg}{m^3}\right]$	VISCOSIDAD $\mu = \left[\frac{N*s}{m^2}\right]$
<b>Aire</b>	1.22	$1.8 * 10^{-5}$
<b>Agua</b>	1000	$1.0 * 10^{-3}$

Fuente: (Çengel & Cimbala, 2006)

De esta tabla, se determina que tanto la densidad como la viscosidad del aire son bajas a diferencia de otros fluidos. No obstante, a elevadas velocidades, la carga aerodinámica sigue siendo considerable, a pesar de la baja magnitud en sus propiedades.

### 2.6.3. Presión

La presión es una propiedad física que se determina como la fuerza que actúa perpendicularmente por cada unidad de superficie. En términos más simples, es la cantidad de la fuerza ejercida en una región dividida por el área sobre la cual dicha fuerza actúa. Su fórmula es la siguiente:

$$P = \left(\frac{F}{A}\right) \left[\frac{N}{m^2}\right] = Pa \quad [2.9]$$

En el caso de fluidos como el aire, la presión es crucial en la creación de fuerzas, la circulación de los fluidos y en cómo estos interactúan con superficies y objetos en su ambiente.

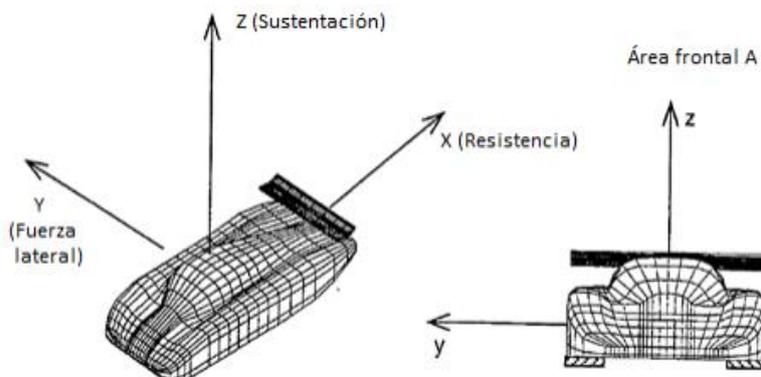
La unidad más convencional para medir la presión es el pascal (Pa), que se establece como la fuerza de un newton (la unidad de fuerza) por cada metro cuadrado (la unidad de área), todo esto dependerá del sistema de unidades de medida que se esté utilizando.

## 2.7. FUERZAS AERODINÁMICAS

En este apartado se hace referencia a dos clasificaciones esenciales de fuerzas aerodinámicas que actúan directamente alrededor del automóvil. Estas fuerzas se dividen según el número de ejes del plano cartesiano y por las fuerzas que se producen. El objeto presenta una longitud  $L$  a su centro de gravedad en sus tres ejes por la actuación de las fuerzas que se producen lo que genera ciertos momentos de fuerzas.

La primera de estas fuerzas es la presión, que actúa en sentido normal a la superficie y es la causante de la sustentación y parte de la resistencia de un automóvil. La segunda fuerza es la fricción, que se encuentra de forma paralela a la superficie del objeto y aporta únicamente a la resistencia.

Dentro de un sistema de coordenadas, se definen tres fuerzas, pero se hará énfasis en las fuerzas más habituales que son sustentación y resistencia. La fuerza lateral se vuelve relevante cuando se producen fuertes vientos, pero en vehículos de competencias tipo Fórmula se requiere que sean veloces, en donde, esta fuerza puede ser pasada por alto (Caiza & Vilaña, 2015, pág. 13).



**Figura 2.19** Sistema de Coordenadas Presentes en Vehículos  
(Katz, 1995)

Las fuerzas aerodinámicas que se producen en un automóvil son:

### 2.7.1. Fuerza de arrastre o resistencia

La fuerza de arrastre es la resistencia que enfrenta un cuerpo en movimiento al avanzar a través de un fluido, como el aire. Entre las tres fuerzas (arrastre, sustentación y lateral), esta es la que más presenta la mayor oposición al movimiento de un objeto (McBeath, 2011, pág. 18).

La fuerza de resistencia (arrastre) tiende a frenar o dificultar el movimiento del objeto y se ve condicionada por aspectos como la forma, la dimensión y la velocidad del objeto, así como las características del fluido. Esta fuerza se presenta a lo largo del eje “X” y expresa matemáticamente a través de la siguiente fórmula:

$$F_x = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * C_x * A_f \quad [2.10]$$

Donde:

$C_x$  = Coeficiente de arrastre (adimensional)

$F_x$  = Fuerza de arrastre [N]

$\rho$  = Densidad del aire  $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

$V$  = Velocidad del vehículo [m/s]

$A_f$  = Área frontal del vehículo [m<sup>2</sup>]

La resistencia al avance es uno de los valores que más se ve afectado en la aerodinámica del vehículo, debido aspectos como:

- Forma en la parte frontal o delantera
- Spoilers frontales y posteriores
- Apertura en la separación de las piezas
- Cabina del piloto
- Neumáticos
- Parabrisas
- Techo

### 2.7.2. Fuerza de sustentación

En los automóviles, la fuerza de sustentación actúa en sentido opuesto a la que se genera en las aeronaves, y se conoce como sustentación negativa o “downforce” (Fernández, 2019).

Controlar esta fuerza es de suma importancia en el diseño aerodinámico, ya que genera una fuerza aerodinámica que actúa perpendicularmente a la dirección del flujo de aire, es decir, hacia abajo. Esto mejora la estabilidad, el agarre y el manejo del vehículo, especialmente en curvas a alta velocidad. Esta fuerza se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$F_z = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * C_z * A_f \quad [2.11]$$

Donde:

$C_z$ : Coeficiente de sustentación vertical adimensional

$F_z$ : Fuerza de sustentación [N]

$\rho$ : Densidad del aire  $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

$V$ : Velocidad del vehículo [m/s]

$A_f$ : Área frontal del vehículo [m<sup>2</sup>]

Para mejorar la fuerza de sustentación negativa y aumentar la carga aerodinámica se puede utilizar dispositivos aerodinámicos como:

- Fondo plano
- Difusores
- Spoilers delanteros y posteriores

Estos componentes manipulan el flujo de aire en torno al automóvil de manera que se genera una presión más alta en la parte superior del vehículo y una presión más baja en la parte inferior. Esta diferencia de presiones crea una fuerza neta hacia abajo, que aumenta la carga en las ruedas y aumenta la tracción, permitiendo al vehículo mantenerse pegado al suelo y mejorar su capacidad de maniobra en curvas.

Es importante tener en cuenta que la fuerza de sustentación negativa es principalmente beneficiosa en situaciones de alta velocidad y en pistas de carreras, donde la estabilidad y el agarre son claves para el desempeño y la seguridad. Sin embargo, es primordial encontrar el equilibrio adecuado, ya que un exceso de “downforce o carga aerodinámica” puede aumentar la resistencia al avance y reducir la velocidad máxima.

### **2.7.3. Fuerza lateral**

Esta fuerza tiene relación directa con vehículos de grandes dimensiones, es decir, afecta principalmente a camiones y automóviles comerciales, sobre todo por su diseño. Se genera en mayor cantidad cuando existen vientos fuertes de forma lateral. Esta fuerza se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$F_y = \frac{1}{2} * \rho * A_f * C_y * V^2 \quad [2.12]$$

## **2.8. COEFICIENTES AERODINÁMICOS**

Los coeficientes más relevantes en la aerodinámica del vehículo son el de arrastre (CD) y sustentación (CL), los mismo que dentro de los vehículos de competencia tienen una gran importancia. Estos coeficientes son directamente proporcionales a distintos aspectos en el diseño como el peso total del vehículo y el uso de dispositivos aerodinámicos que mejoren la eficacia del automóvil.

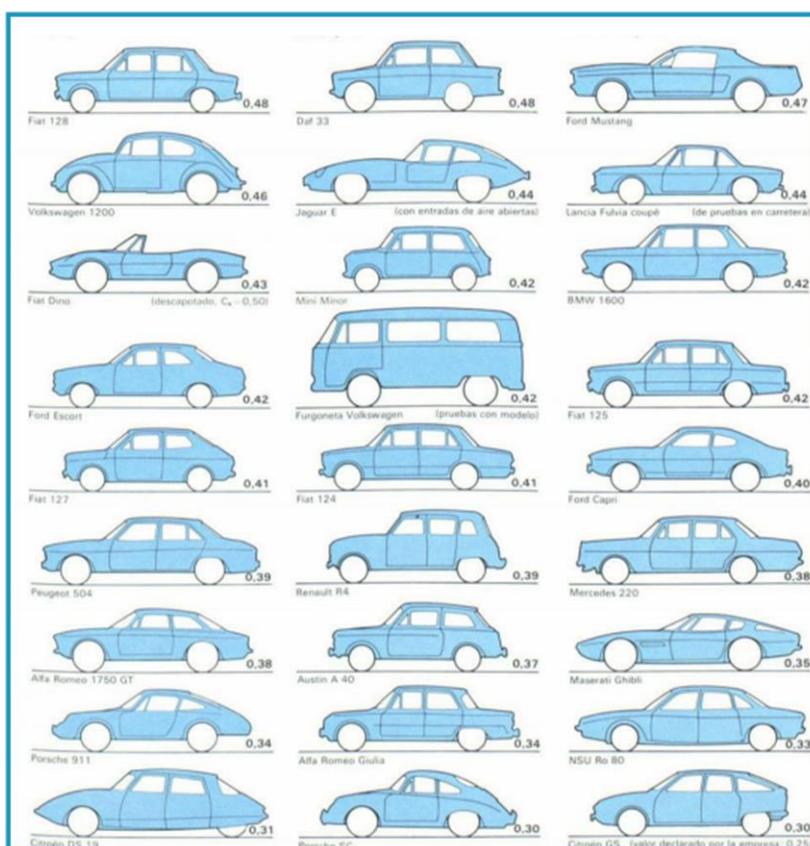
Primordialmente, hay dos métodos predominantes para calcular los valores numéricos de estos coeficientes. El primero involucra el uso de un túnel de viento, mientras que el segundo implica la aplicación de simulaciones CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) (Fernández, 2020).

### **2.8.1. Coeficiente de arrastre o de resistencia (CD o CX)**

Es conocido como CX o CD por sus siglas en inglés (Coefficient of Drag), representa un valor adimensional que se emplea para determinar la cantidad de resistencia aerodinámica que un cuerpo experimenta al desplazarse a través de un fluido, que por lo general es aire.

En definitiva, es una medida de cómo la forma y la superficie del cuerpo u objeto afectan la resistencia al aire.

Lo que nos muestra el (CD), es la medida de la eficacia aerodinámica de un vehículo, es decir cuanto más inferior sea el (CD) menor resistencia aerodinámica tiene el automóvil y, por tanto, menos consumo y mayores prestaciones durante la conducción. Es importante recalcar que para obtener un buen coeficiente arrastre, se debe lograr un flujo de aire uniforme y de baja fricción en toda la superficie del vehículo.



**Figura 2.20** Coeficiente Cx para diversos automóviles (Rodríguez, 2014)

El coeficiente de arrastre se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2} * \rho * A_f * V^2} \quad [2.13]$$

Normalmente, el valor del coeficiente de arrastre o de resistencia (CX) en automóviles convencionales varía entre 0.25 y 0.40 y para camiones se sitúa alrededor de 0.6 o 0.7 (Fernández, 2020).

### 2.8.2. Coeficiente de sustentación (CL o CZ)

Es un valor adimensional y se representa como CZ o CL por sus siglas en inglés (Coefficient of Lift). Este coeficiente resulta beneficioso debido a que refleja la eficacia de la forma de un objeto para generar sustentación, lo que facilita la creación de los diseños (Bayas & Rosero, 2015, pág. 21)

En vehículos terrestres, como automóviles de alto rendimiento y deportivos, el coeficiente de sustentación se refiere principalmente a la generación controlada de sustentación negativa, es decir, cuantifica la eficiencia con la que el vehículo genera carga aerodinámica hacia abajo (downforce) mientras se desplaza a alta velocidad. Un mayor coeficiente aerodinámico de sustentación negativa “downforce” mejora la tracción y la estabilidad del vehículo a altas velocidades y en curvas, optimizando así el manejo y la seguridad del conductor.

Su fórmula general es la siguiente:

$$Cz = \frac{Fz}{\frac{1}{2} * \rho * Af * V^2} \quad [2.14]$$

En resumen, en un prototipo Formula “SAE”, se pretende minimizar el valor del coeficiente de arrastre aerodinámico (CD o CX), lo que resultaría en una reducción de la resistencia aerodinámica al avance. Por otro lado, se busca maximizar el coeficiente aerodinámico de downforce para generar una mayor fuerza hacia abajo (carga aerodinámica).

## 2.9. POTENCIA NECESARIA PARA VENCER LA RESISTENCIA AERODINÁMICA

Una vez conocidos los valores aerodinámicos de un objeto, tales como fuerzas y coeficientes, podemos encontrar el valor de la potencia necesaria que se debe utilizar para superar dicha fuerza aerodinámica y proseguir con su trayectoria. La mejor perspectiva que se debe considerar es que esta sea baja, por lo que está es directamente proporcional al coeficiente de arrastre (Granda & Tapia, 2018, pág. 26).

Su fórmula habitual es la siguiente:

$$Pot = \frac{1}{2} * Cx * Af * \rho * V^3 \quad [2.15]$$

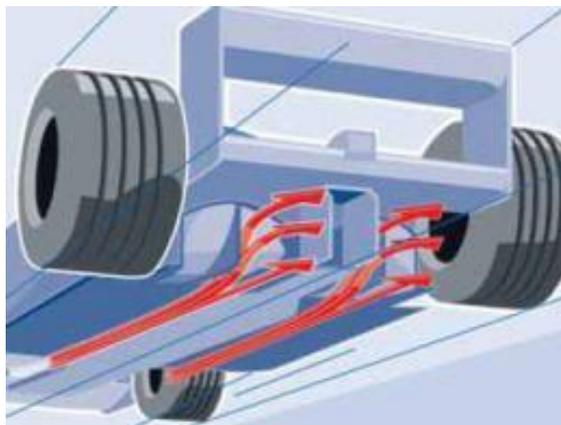
## 2.10. DISPOSITIVOS AERODINÁMICOS

Estos componentes son altamente beneficiosos, ya que contribuyen a una dispersión más eficaz del flujo de aire, lo que conduce a una reducción de la resistencia aerodinámica y a la generación de sustentación negativa, también conocida como "downforce".

### 2.10.1. Difusor

Se menciona que una parte significativa de la carga aerodinámica se genera mediante un difusor que se sitúa abajo del eje de las ruedas posteriores y presenta una geometría diseñada para mejorar las características aerodinámicas del automóvil. Su función es crear un espacio para que el flujo de aire debajo del vehículo se desacelere y se expanda, lo que resulta en una capa de aire menos turbulenta entre el flujo de aire del automóvil y el entorno exterior.

En sí, el difusor acelera el flujo de aire que transita debajo del monoplaza, lo que resulta en la creación de una zona de presión más baja que aumenta la adherencia del automóvil al suelo. En síntesis, el objetivo principal del difusor es generar lo que se denomina el efecto suelo, una característica habitual en vehículos de competición como los de la Fórmula 1.



**Figura 2.21** El Difusor  
(Truzonef1, 2012)

### 2.10.2. Pontones

Estos elementos se sitúan en la parte inferior de la carrocería, abarcando prácticamente todo el espacio desde la cabina del vehículo hasta la parte final del radiador. Tienen una forma de botella en la silueta del automóvil que va desde esta parte hacia la zona central trasera cubriendo toda esta parte por completo.



**Figura 2.22** Pontón Automovilístico  
(Hydrox, 2013)

### 2.10.3. Fondo plano

Esta zona representa la sección más próxima al suelo en el vehículo monoplace. Su propósito principal es reducir la circulación de aire debajo del vehículo, lo que evita la pérdida de fuerza en su avance y previene la influencia de posibles elevaciones que puedan ocurrir al alcanzar altas velocidades, permitiendo así mantener una aerodinámica estable durante su recorrido.



**Figura 2.23** Fondo Plano de un F1  
(Fernández, 2019)

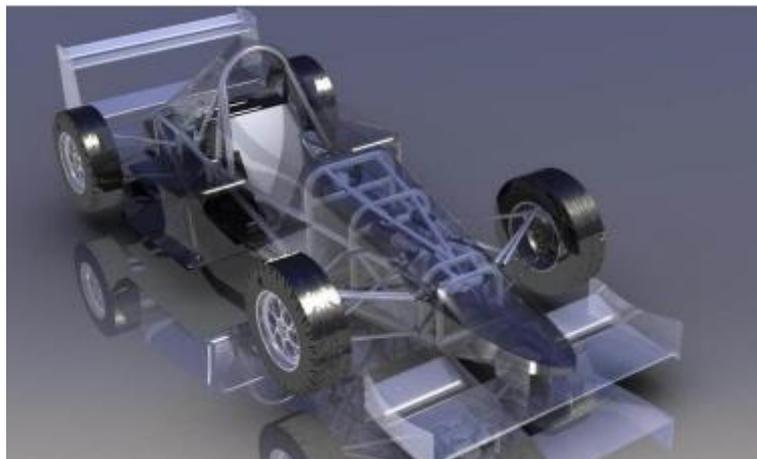
## 2.11. CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO PARA COMPETENCIAS TIPO FORMULA “SAE”

Se encuentran dos categorías de clasificaciones para el diseño de prototipos Formula “SAE”: la de forma tubular y la de monocasco.

### 2.11.1. Configuración Tubular

Para este tipo de configuración, tanto el chasis como la carrocería se presentan como dos componentes separados. Por tal motivo, la carrocería se encarga de las funciones estéticas y aerodinámicas, mientras que el chasis asume la responsabilidad de proveer resistencia estructural.

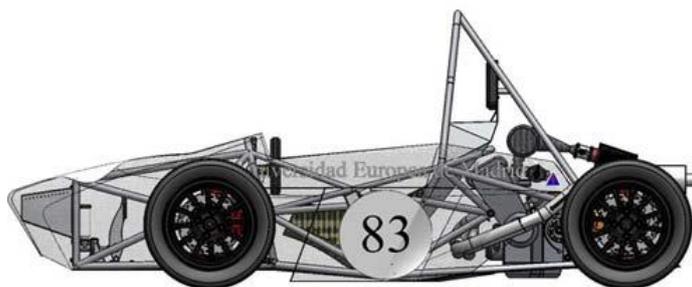
Este tipo es uno de los más utilizados en la competencia de la formula “SAE” debido a la configuración de los tubos del chasis, que los convierte en estructuras más eficientes. Esto se debe a su bajo peso, su alta durabilidad a la torsión y la flexión que presentan. Además, proporciona una buena seguridad durante el desplazamiento y en situaciones de colisión.



**Figura 2.24** Configuración Tubular  
(CARMAN GRUPO, 2014)

### 2.11.2. Configuración Monocasco

Para este caso, el chasis y la carrocería constituyen un solo cuerpo. Uno de los graves inconvenientes de este sistema es su elevado costo de fabricación y la implementación de maquinaria especializada para su construcción, aunque cabe mencionarse que son más rígidos, livianos y aguantan gran cantidad de carga.



**Figura 2.25** Chasis Monocasco  
(FuelWasters, 2011)

La elección entre estos dos enfoques se basa principalmente en los recursos disponibles, los procesos de fabricación y los materiales que se encuentren a disposición.

## 2.12. DIVISIÓN POR PARTES DE LA CARROCERÍA

Se basa en las distintas secciones que componen un prototipo formula SAE, ya que su evolución con el pasar del tiempo se refleja en la incorporación de nuevos elementos. A continuación, se enumeran los componentes más significativos.

- **Nariz:** Esta parte marca el punto inicial de interacción con el aire y es el sitio donde se genera una presión elevada a causa del contacto frontal con las corrientes de aire. Asimismo, desempeña una función esencial al dirigir el flujo de aire hacia otras partes de la carrocería. La configuración y dimensiones adoptadas aquí desempeñan una función significativa, ya que tienen un impacto significativo en términos de aerodinámica y eficiencia general del vehículo.

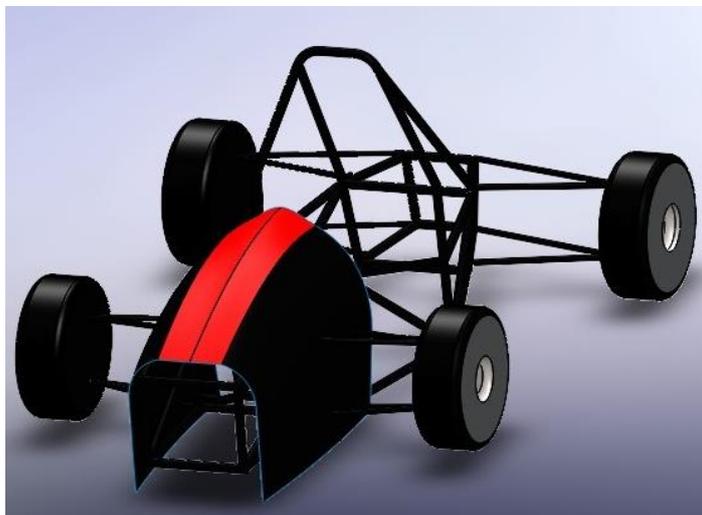


**Figura 2.26** Nariz del prototipo

- **Trompa:** La sección de la carrocería que sigue a la nariz se la conoce como la trompa y cumple varias funciones cruciales. Esta área tiene la tarea de canalizar el flujo de aire hacia la parte posterior del automóvil mediante la optimización de su forma integral. Además, permite que el aire llegue a los pontones lateralmente para el enfriamiento y facilita que el aire circule hacia la toma de admisión desde la parte superior. La forma y los ángulos empleados desempeñan un papel vital para lograr estas tareas, incluyendo la implementación de líneas aerodinámicas que canalizan el flujo de aire hacia las partes laterales del vehículo.

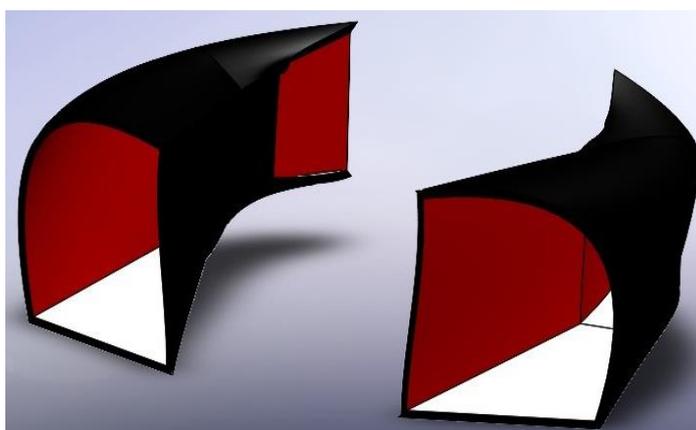
Los criterios para seleccionar el diseño frontal incluyen garantizar una presión equilibrada en toda su superficie, minimizar al máximo el coeficiente de resistencia o arrastre, generar resistencia aerodinámica en la zona superior para inducir carga en el eje delantero, y asegurar que la velocidad del flujo de aire supere la de la nariz para lograr un flujo eficiente y finalmente, que el flujo alcance la toma de admisión

a través de la cubierta del piloto para así de esta manera tratar de disipar el aire de mejor manera y que este sirva posteriormente como sistema de enfriamiento.



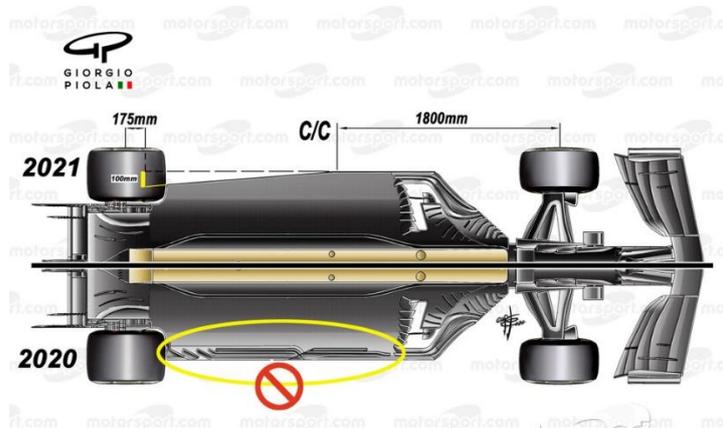
**Figura 2.27** Trompa del Prototipo Formula SAE

- **Pontones:** Estos elementos de la carrocería son de vital importancia, ya que se emplean para el proceso de enfriamiento del motor y demás componentes, como los radiadores destinados al agua y al aceite. En la tarea de refrigerar el motor, es esencial contar con una corriente de aire sustancial y abundante, y esto se logra a través de la aplicación del principio de Venturi. Esta técnica implica la reducción de la sección, con el fin de obtener una menor presión y, en consecuencia, incrementar la velocidad del aire circulante para así de esta manera enfriar toda el área donde se encuentra el motor.



**Figura 2.28** Pontones del vehículo tipo Formula

- **Fondo plano:** Se trata de una superficie plana y lisa que se encuentra en la parte inferior del chasis del automóvil de competición. Esta característica es esencial para el diseño aerodinámico y el rendimiento general del vehículo.



**Figura 2.29** Fondo Plano  
(Sommerfield, 2021)

## 2.13. MATERIALES MÁS UTILIZADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CARROCERÍAS FORMULA SAE

### 2.13.1. Fibra de carbono

Es un resultado del proceso químico de síntesis, que implica la formación de enlaces químicos a partir de sustancias con compuestos más simples. El tejido de estas fibras está combinado con una resina epoxi, y los endurecedores o catalizadores, ya que, sin estos, la fibra por sí sola no cumple ninguna utilidad. Una vez combinados, son capaces de formar el material compuesto además de adherirse y moldearse dependiendo la necesidad que presente su implementación.

Las fibras de carbono se categorizan según los módulos de tensión que poseen. Estos módulos cuantifican la resistencia de acuerdo con los distintos módulos de tensión de cada fibra. Este material encuentra numerosas aplicaciones en la industria aeroespacial y automotriz, gracias a su resistencia mecánica notable, baja densidad en comparación con elementos metálicos, alta resistencia a la corrosión externa, eficiente capacidad de aislamiento térmico y su peso relativo dentro de una estructura. La principal complicación al utilizar este material en la fabricación de la carrocería radica en el proceso de construcción, lo que implica el uso de maquinaria especializada y, por ende, resulta en un incremento en los costos finales de producción.

**Tabla 2.2** Propiedades de diferentes fibras de carbono

Propiedad	Fibras SM <sup>a</sup>	Fibras IM <sup>a/b</sup>	Fibras HM <sup>b</sup>	Fibras *LM <sup>b</sup>	Fibras *UHM <sup>b</sup>
Contenido en carbono (%)	95	95	>99	>97	>99
Diámetro (µm).	6-8	5-6	5-8	11	10
Densidad (gtm)	1,8	1,8	1,9	1,9	2,2
Resistencia a la tracción (mpa)	3.800	3450 - 6200	3450 - 5520	1380 - 3100	2410
Alargamiento a la rotura	1,6	1,3 – 2,0	0,7 – 1,0	09	0,4 -0,27
Resistencia eléctrica (µ_cm)	1650	1450	900	1300	220 - 130
Conductividad térmica (w/m.k)	20	20	50-80	-	-

Fuente: (Alcaraz, 2007)

### 2.13.2. Materiales sintéticos

Durante los últimos años, el uso de los derivados de los polímeros y el plástico han ido en constante incremento motivado por su peso ligero las amplias oportunidades de diseño que proporciona este material, su resistencia a la oxidación y su costo de fabricación reducido. No obstante, sus principales inconvenientes son que su degradación es notoria con el paso del tiempo si a este no se le ha dado un tratamiento de recubrimiento especial, además los procedimientos para preparar la base del material son altamente detallados y demandan el uso de maquinaria especializada.

Los polímeros utilizados dentro de la automoción se agrupan de la siguiente manera:

- Plásticos termoplásticos.
- Plásticos termoestables.
- Elastómeros, que comprenden derivados del caucho y poliuretanos.

En resumen, las características que convierten a los plásticos en uno de los materiales más empleados en la producción de componentes de carrocería son:

- Reducción en su peso.
- Excelente resistencia a la corrosión.
- Alta estabilidad frente a variaciones de temperatura.
- Resistencia a sustancias líquidas como aceites, gasolina, etc.



**Figura 2.30** Polímeros en el Automóvil  
(Mexpolimeros, 2014)

### 2.13.3. Aluminio

En la actualidad, en el campo automotriz, surge la necesidad de utilizar materiales más ligeros y con mejores propiedades, al igual que el aluminio, este material es ampliamente disponible y se emplea en la fabricación de ciertos componentes en vehículos de competición.

Dado su carácter respetuoso con el medio ambiente, este material tiene la capacidad de ser reciclado y reutilizado en su totalidad, permitiendo su implementación en otras áreas del vehículo. Además, cumple con las normativas de la fórmula SAE, que establece la preferencia por vehículos altamente reciclables o reutilizables.

En el caso de un impacto o colisión, brinda más seguridad. Debido a que exhibe una deformación más gestionada y su peso contribuye a lograr un sistema de frenado más eficiente

Sin embargo, el aluminio tiene desafíos cuando se utiliza para construir la carrocería de un vehículo. En el caso de vehículos tipo Formula SAE, el proceso de conformado con este material resulta altamente complejo, ya que se requiere de maquinaria especializada para la laminación y doblado, lo que hace que su aplicación en carrocerías no sea adecuada.

A continuación, se describen las cualidades físicas y mecánicas del aluminio.

**Tabla 2.3** Propiedades del Aluminio

Propiedad		Aluminio	Acero 371
1	Esfuerzo ( $N/m^2$ )	250	400
2	Elasticidad E Modulo de Young (MPa)	70.000	210.000
3	Densidad ( $g/cm^3$ )	2.7	7.8

4	Punto de fusión (°C)	660	1500
5	Rango de temperatura de trabajo (°C)	-250 a 150	-50 a 500
6	Conductividad eléctrica ( $m/Ohm\ mm^2$ )	29	7
7	Conductividad térmica ( $W/m\ ^\circ C$ )	200	76
8	Coefficiente de expansión lineal $\times 10^{-6}/^\circ C$	24	12
9	No magnético	SI	No
10	Toxico	NO	No
11	Resistente a la corrosión	SI	Si
12	Mecanizado	Fácil	Fácil
13	Maleable	Si	Si
14	Costo	Barato	Caro

Fuente: (Aluvirefor, 2019)

#### 2.13.4. Fibra de vidrio

Hoy en día, destaca como uno de los principales materiales empleados en la fabricación de carrocerías para vehículos de competición. Sus atributos incluyen un peso más ligero que el aluminio, una resistencia mecánica notable, facilidad de moldeo y un proceso de curado que no requiere maquinaria compleja ni especializada, lo que conduce a una reducción significativa en los costos finales de producción.

En la competición de la Formula SAE, es frecuente que la carrocería se fabrique utilizando fibra de vidrio, principalmente si se está incursionando en este tipo de competencias debido a su fácil maniobrabilidad y su bajo costo en comparación con otros materiales. Los procesos para su elaboración son mucho más simples, por lo que se trabaja con moldes que se pueden realizar en yeso, barro, madera etc. Y después de esto, aplicar la fibra con sus respectivas resinas hasta conseguir la figura deseada.

Actualmente, hay cinco variedades de fibras de vidrio, cada una con propiedades distintas según su construcción y componentes, adaptándose a las necesidades específicas de la aplicación requerida.

- **Tipo E:** Esta fibra es ampliamente empleada, compuesta por vidrio de aluminio-borosilicato con menos del 1% de óxidos alcalinos. Se utiliza principalmente en plásticos reforzados con vidrio, destacando por su sólida resistencia mecánica y dieléctrica.

- **Tipo R:** Esta fibra se distingue por ofrecer notables propiedades mecánicas y está compuesta por vidrio de aluminio-silicato. Su aplicación se encuentra en sectores como la aviación, la ingeniería mecánica, la industria espacial, así como en la fabricación de piezas y armamento.
- **Tipo C:** Se destaca por su resistencia significativa frente a sustancias químicas, ya que contiene una elevada proporción de óxido de boro.
- **Tipo S:** Esta fibra se distingue por su resistencia notable a la tracción y está compuesta por vidrio derivado del aluminio, el cual presenta un elevado contenido de óxido de magnesio.
- **Tipo Advandex:** Este tipo de fibra presenta una modificación del vidrio ECR, donde presenta un bajo porcentaje de óxidos alcalinos y una mejora en sus propiedades fisicoquímicas.

En la siguiente figura se presentan las cualidades físicas y mecánicas de las diversas variedades de fibras de vidrio disponibles:

**Tabla 2.4** Propiedades de diferentes fibras de vidrio

Propiedades	Fibras de vidrio				
	Vidrio E	Vidrio R	Vidrio ECR	Advantex	Vidrio S
Densidad [ $kg/m^3$ ]	2620	2550	2670	2620	2840
Coefficiente de dilatación [ $K^{-1}$ ]	$5.4 * 10^{-6}$	$4.1 * 10^{-6}$	$5.9 * 10^{-6}$	$6.0 * 10^{-5}$	$2.* 10^{-5}$
Viscosidad	---	---	---	---	---
Punto de reblandecimiento [ $^{\circ}C$ ]	850	950	880	915	1050
Resistencia a la tracción [ $MPa$ ]	3450	3400	3450	3500	4890
Módulo de elasticidad [ $GPa$ ]	72.0	85.0	72.0	81.0	87.0
Alargamiento	4.8	4.6	4.8	4.6	5.7
Índice de permisividad a 1 MHz	6.6	6.0	6.9	6.8	5.3

Fuente: (Richter, 2010)

## CAPÍTULO III

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. ETAPA DE SELECCIÓN DEL MATERIAL

Para construir la carrocería del vehículo monoplaza, fue fundamental elegir un material adecuado que desempeñara un papel clave en su proceso de fabricación. Este material debía poseer cualidades específicas, como ser ligero para maximizar la potencia del motor y minimizar el peso total del coche. En la selección del material se tuvieron en cuenta ciertos factores:

- Soporte a la tracción
- Densidad
- Fuerza compresiva
- Dureza
- Durabilidad a la fatiga
- Durabilidad a la abrasión
- Mecanizado
- Conductividad
- Persistencia al calor
- Compatibilidad de resina
- Costo
- Disponibilidad en el mercado



**Figura 3.1** Distintos materiales en la carrocería  
(Hernández, 2018)

Para la selección del material adecuado, fue necesario realizar una comparación de las características de cada material que se encontraban opcionales en el mercado actual, así como la disponibilidad del material, los requisitos estructurales y físicos de los componentes, junto con el costo en relación al presupuesto establecido, fueron factores clave para poder avanzar desde este punto y tomar una decisión.

### 3.2. MATRIZ DE SELECCIÓN DEL MATERIAL

El primer aspecto a tener en cuenta en el proceso de construcción de la carrocería fue la selección del material base para su desarrollo. En este sentido, se llevó a cabo una matriz de decisión que evaluó las propiedades particulares de cada material. El objetivo fue identificar varios parámetros, incluyendo la accesibilidad al material, la familiaridad con el proceso de trabajo, los métodos necesarios para la fabricación, los requisitos físicos y estructurales de los componentes, así como el costo del material en relación con el presupuesto establecido.

La matriz de decisión determinó los pesos de ponderación para lograr un resultado numérico, asignando estos valores en relación con los parámetros previamente mencionados, con la ayuda de personas que tenían experiencia adquirida y que trabajaban en esta área y estaban en contacto con estos materiales.

**Tabla 3.1** Propiedades de Distintos Materiales

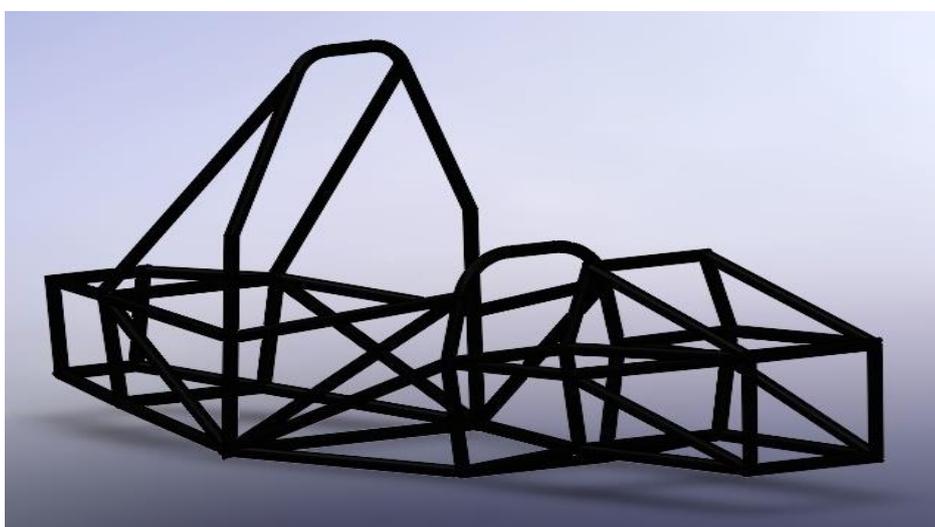
Características	Factor de ponderación	Fibra de Vidrio	Aluminio	Fibra de Carbono
Costo	0.2	1	0.6	0.2
Resistencia mecánica	0.3	0.9	1.5	1.5
Rugosidad	0.1	0.4	0.4	0.4
Manufactura	0.3	1.5	0.3	0.3
Corrosión	0.1	0.4	0.4	0.5
Total	1	4.2	3.2	2.9

La fibra de vidrio obtuvo la puntuación más alta, alcanzando un valor de 4.2, lo que la convirtió en la elección más adecuada para la construcción de la carrocería en nuestro proyecto.

Ya que se seleccionó el material base con el que se iba a trabajar, se establecieron las diferentes partes que conformarían la carrocería, la misma que debía tener una estructura acorde con el reglamento vigente a la Formula SAE 2023.

### 3.3. CONCEPCIÓN DEL MODELO

Basándonos en el chasis que se había realizado anteriormente, se empezó a conceptualizar el diseño de la carrocería y, a su vez, nos permitió obtener una idea general en lo que respecta a proporciones y dimensiones que fueron muy útiles para el trazo de líneas en la creación de la carrocería.

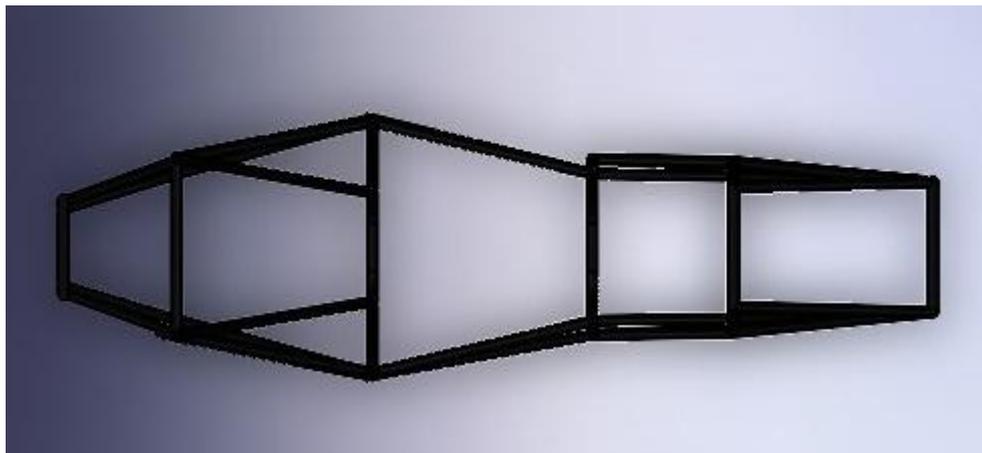


**Figura 3.2** Vista Lateral del Chasis

En el diseño del chasis se observa que se configura como una "canastilla" alargada que se compone de tres secciones distintas, las cuales son:

- Cabina del motor.
- Cabina del piloto.
- Cabina frontal.

Hay que tener en cuenta que en los espacios exteriores van ubicados los sistemas de dirección, suspensión y del tren de propulsión.



**Figura 3.3** Vista Superior del Chasis

Una vez comprendido tanto los espacios de uso externo como interno del chasis podemos tener en cuenta otros aspectos de espacio que son fundamentales al momento de diseñar una carrocería, estos son:

- Espacios asignados para la instalación de los pontones laterales.
- Áreas designadas para la colocación del fondo plano.
- Espacios asignados para el montaje de la nariz frontal.

### **3.4. DISEÑO DE LA CARROCERÍA, ASISTIDO POR SOLIDWORKS**

La carrocería juega un papel crucial en un monoplaza para la Fórmula Student, donde se logran coeficientes muy efectivos. Estos coeficientes contribuyen a un comportamiento y rendimiento adecuados en diversas condiciones de conducción, mostrando una reducción en la resistencia al avance, una mejora en la tracción con respecto al suelo y una mayor estabilidad durante la marcha.

En este apartado se describió en detalle el procedimiento de modelado utilizando el software SolidWorks, para posteriormente analizar factores aerodinámicos que presenta la carrocería.

#### **3.4.1. Descripción del Software SolidWorks**

Se utilizó el software SolidWorks debido a su fácil manejo al momento de plasmar ideas, lo que permite reducir el tiempo en el diseño. Se trata de un programa de diseño mecánico que brinda múltiples herramientas para el diseño de piezas, dibujos y ensambles. Además, también incluye herramientas de presentación de análisis, productividad, simulación y gestión de proyectos, lo que lo posiciona como uno de los programas de diseño mecánico más destacados en el mercado.

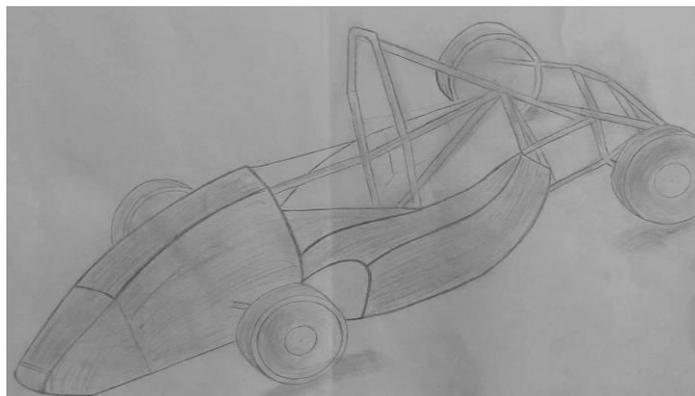
### 3.4.2. Espacios considerados en la carrocería

En la carrocería, los espacios a tener en cuenta están directamente vinculados a las dimensiones del chasis y los componentes operativos del motor, como la palanca de cambios y los pedales de funcionamiento mecánico. La seguridad del piloto es otro aspecto crucial, y esto se relaciona con la comodidad que experimenta al maniobrar tanto el volante como los pedales. La comodidad es esencial y no debe comprometerse, ya que podría afectar el rendimiento del piloto durante una competición, generando problemas significativos.

Para garantizar la seguridad del piloto, el punto más relevante se considera el espacio que debe existir entre el piloto y el arco principal en caso de que exista un choque o volcamiento.

### 3.4.3. Bosquejos iniciales para el modelamiento

En primera instancia se realiza bosquejos manuales, sobre lo que se quiere alcanzar digitalmente. Es así que se crea una imagen previa del resultado final que se intenta diseñar, donde se incluye todas las partes que intervienen en la carrocería, tomando en consideración ciertos criterios económicos y técnicos que conviertan a este en un proyecto sustentable.

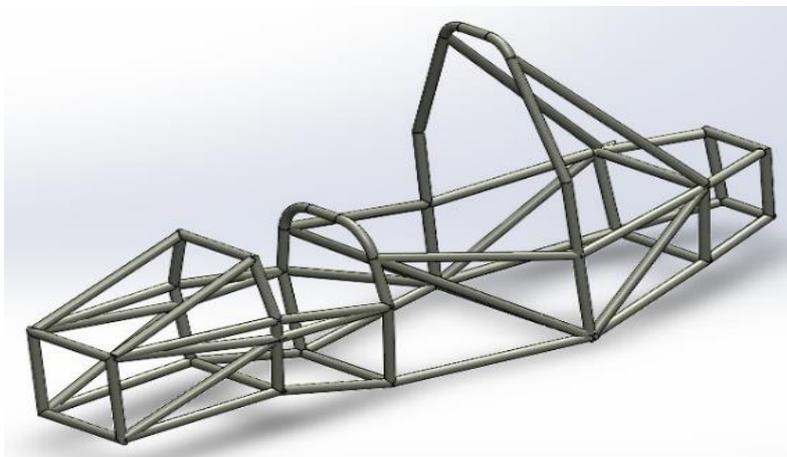


**Figura 3.4** Bosquejos iniciales

### 3.4.4. Fases de modelamiento de la carrocería en SolidWorks

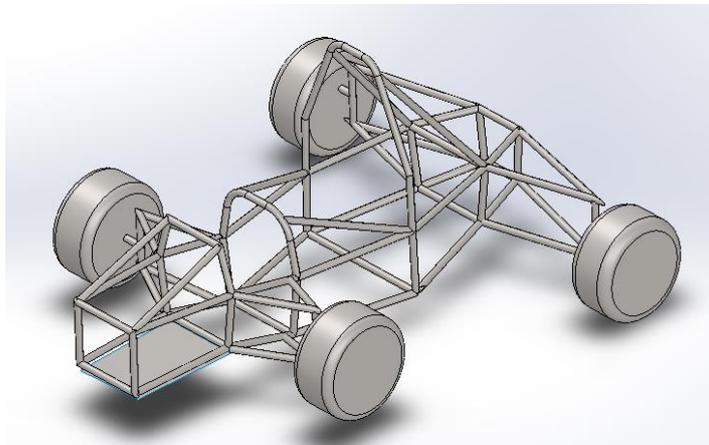
Por medio del Software SolidWorks y tomando en consideración las dimensiones que presentaba el chasis, tanto de su contorno interior como exterior con sus componentes (palanca de cambios), se comenzó a realizar un boceto de las partes para llevar a cabo el modelamiento de cada parte que intervenían en el diseño de la carrocería. Esto se hizo tomando en consideración las dimensiones que tenía el atenuador de impactos en su parte delantera, el alto y ancho de la cabina, teniendo en cuenta el velocímetro que se encontraba en la parte superior, el tamaño de los pontones y la dirección que tendrían los mismo con

respecto a la disipación del calor, así como a la cantidad de aire que ingresa y ciertos aspectos aerodinámicos que se mencionaba en la normativa de la Formula SAE.



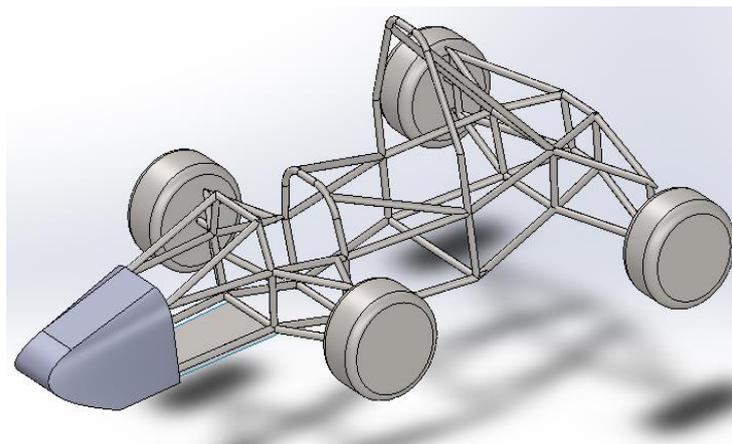
**Figura 3.5** Inicio del modelado

Para tener una previsualización más completa del trabajo que se llevó a cabo, se procedió a implementar en el croquis 3D los componentes externos que acompañaban a la carrocería, como lo es parte del sistema de dirección y sus neumáticos, para obtener una comprensión más precisa de las dimensiones reales que se tomarían en consideración a continuación.



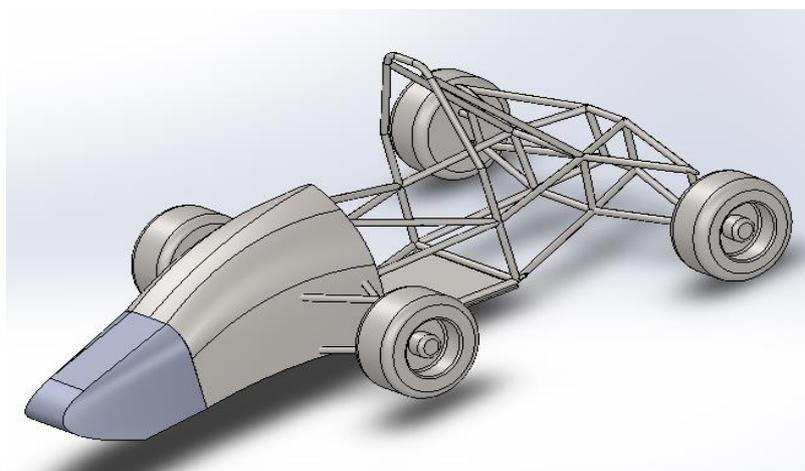
**Figura 3.6** Chasis con componentes de dirección

Con las dimensiones del chasis ya definidas dentro de un plano 3D de croquis, se procedió a la creación de la primera superficie, siendo esta la parte de la nariz, considerando las dimensiones del atenuador de impactos previamente construido.



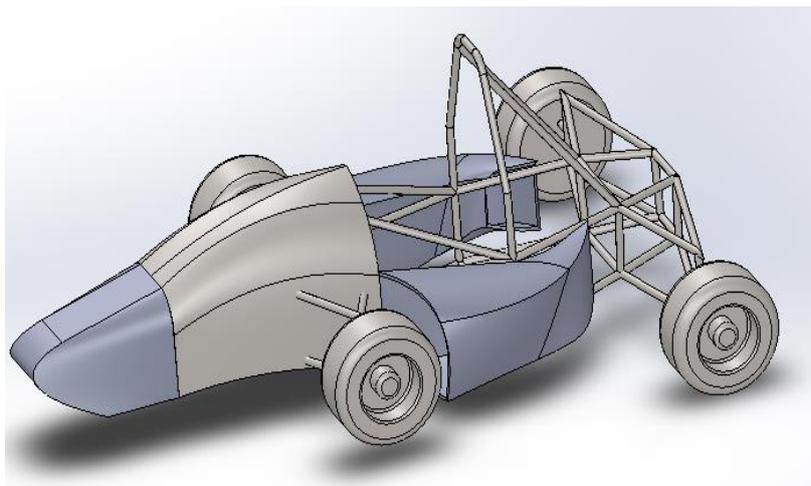
**Figura 3.7** Superficies delanteras

Utilizando el mismo enfoque metodológico, se llevó a cabo la elaboración de varios bocetos para obtener las secciones laterales traseras y configurar la parte frontal, dando forma a lo que sería la trompa y del habitáculo de algunos componentes, como el sistema de suspensión, la bomba de frenos y componentes adicionales como el velocímetro, que se involucraban dentro de la geometría trasera a la nariz de la carrocería.



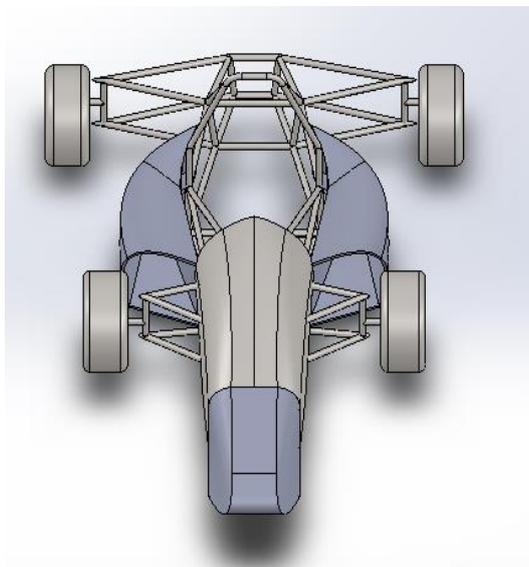
**Figura 3.8** Superficies delanteras laterales

Una vez que se creó la delantera del vehículo, se realizó el área que recubriría la parte lateral, donde se encontraría el piloto y que a su vez serviría de pared para la geometría del pontón lateral, con el propósito de establecer el área destinada a la toma de aire, que funcionaría para guiar el flujo de aire y simultáneamente actuaría como sistema de enfriamiento del motor. En la definición de su forma, era esencial considerar la longitud de los ejes, ya que no debía exceder de la mitad del centro de sus neumáticos, tanto para que no existiera un sobrepeso en el diseño de la carrocería como para que no afectara al momento de girar la dirección delantera.



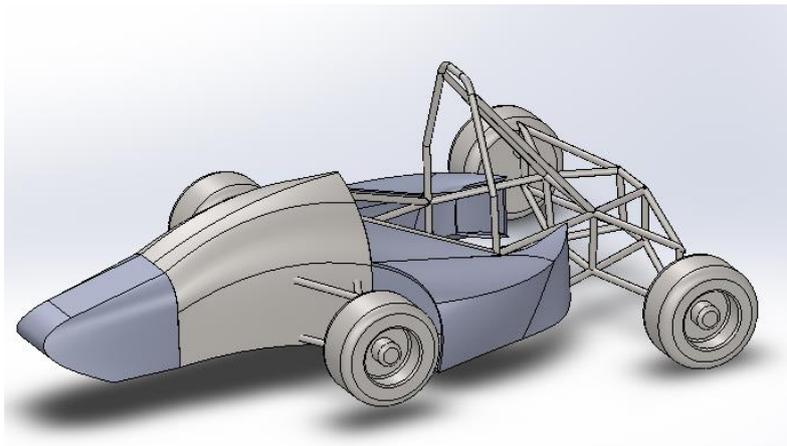
**Figura 3.9** Superficie de Pontones

Una vez obtenido el diseño de los pontones, se procedió a realizar ciertas modificaciones, como en este caso sería el direccionamiento directo hacia la cámara de combustión, en donde se encontraban los pistones, con el fin de direccionar correctamente el aire que ayudaría a disipar el calor en la posición en la que ya se encontraba el motor. Esto se lo realizó tomando en consideración las dimensiones reales del motor y su posicionamiento.



**Figura 3.10** Posicionamiento de Pontones

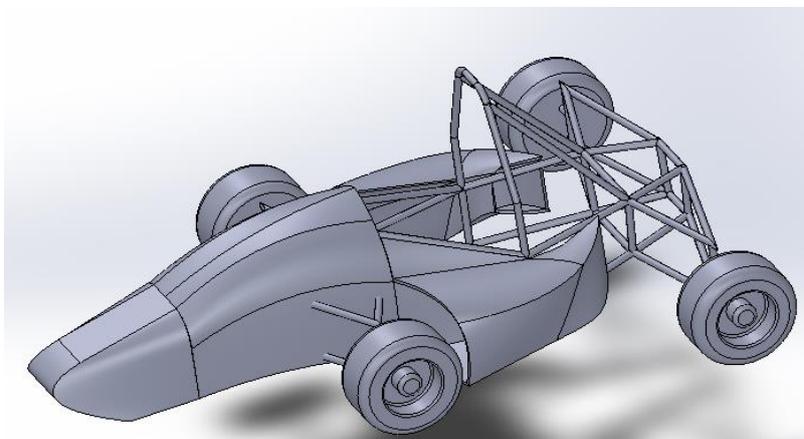
Teniendo una vez ya definido el modelo de las superficies de la carrocería, se procedió a recubrir la parte final que componía la estructura de la carrocería, es decir, la parte superior de los pontones, con el fin de que no existiera parte de la estructura visible, ya que esto no se veía bien estéticamente, además de que servía de protección para el piloto. Esto se lo realizó con el molde principal de la parte superior de los pontones y con un acabado uniforme con relación a la parte delantera de la carrocería.



**Figura 3.11** Superficie de recubrimiento parte superior

Para completar con el modelado de la carrocería, se procedió a coser cada una de las superficies con el fin de formar un solo sólido uniforme y compacto, esto se lo realizó de manera simultánea a medida que se desarrollaba el modelo. En este caso, ya se podía apreciar que todas las superficies se habían convertido en una sola superficie.

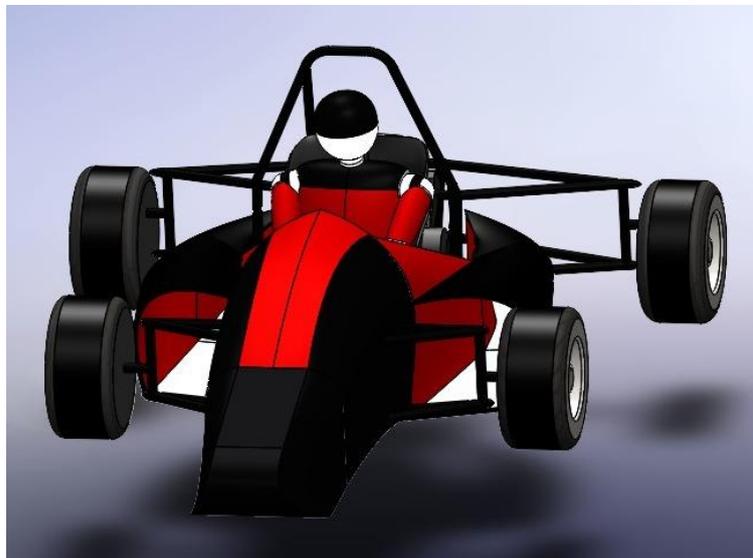
Por lo tanto, ya se podía dar un grosor con el fin de transformar las áreas en un cuerpo sólido, posibilitando que el software determinara el volumen del prototipo, ajustándose más a la realidad que en su etapa de construcción presentaría el modelo de la carrocería diseñado.



**Figura 3.12** Superficies con Espesor

Cabe recalcar que cada una de las superficies creadas se realizó mediante la opción de simetría, para replicar las diversas formas en el lado contrario mediante un plano visto lateralmente, esto con el fin de optimizar el trabajo tanto del diseñador como de los recursos computacionales del software.

Para concluir el diseño de la carrocería y conseguir una comprensión más nítida del verdadero propósito que se deseaba alcanzar, se procedió a dar apariencias a cada una de sus partes para poder apreciar cómo se vería ensamblado cada parte en conjunto con el chasis.



**Figura 3.13** Modelamiento final

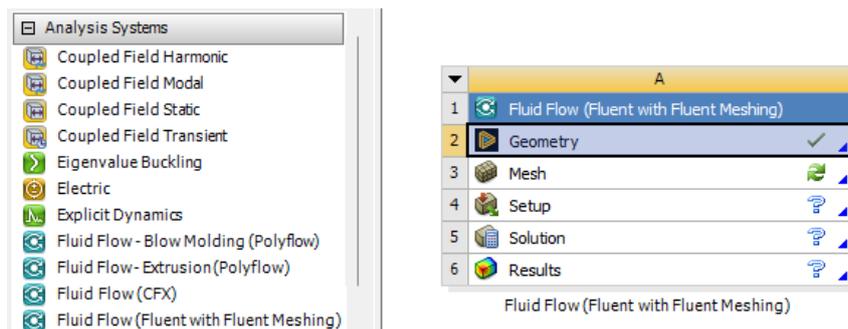
## **3.5. PROCESO DE SIMULACIÓN CFD**

### **3.5.1. Software ANSYS**

Es un software líder de la dinámica computacional (CFD) que permite realizar simulaciones de manera eficiente y rápida en cuanto a la conducción de calor y el flujo de fluidos. Además, es muy amigable de utilizar, lo que permite configurar varias opciones como tipo de flujo, unidades de medida, velocidad, temperatura, entre otras.

Ansys FLUENT es un paquete que nos permite simular el comportamiento de un fluido que pasa a través de un elemento, lo que nos ayuda a entender de una mejor manera el actuar del objeto, lo cual es clave para el éxito del diseño. También es muy útil para calcular las fuerzas del fluido y a su vez entender el efecto que se tiene en el rendimiento del objeto.

Una vez que se culminó el diseño de la carrocería en SolidWorks, del prototipo Formula SAE, se procedió a usar dicho software con el objetivo de ratificar la aerodinámica del prototipo.



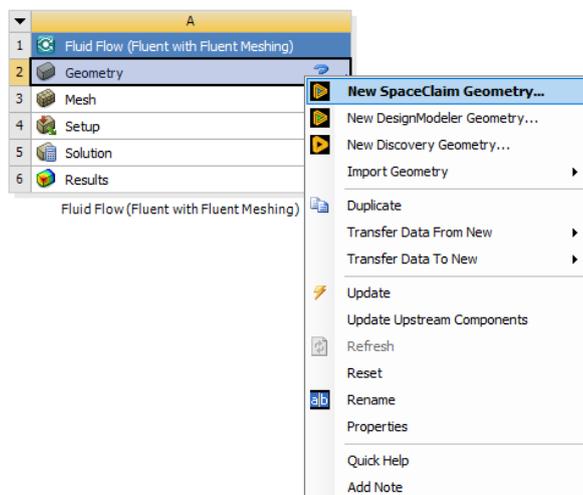
**Figura 3.14** Ansys-Fluid Flow (Fluent with Fluent Meshing)

### 3.5.2. Ansys-Fluid Flow (Fluent with Fluent Meshing)

Se empleó esta herramienta, muy fundamental para ejecutar el análisis de fluido, ya que era muy confiable en cuanto a los resultados que se obtenían y además se podía deducir si la carrocería del monoplaza tipo SAE se encontraba dentro del rango establecido con respecto a la influencia aerodinámica. Para conseguir parámetros apropiados en el análisis aerodinámico, el software se configuró con las condiciones climáticas de la ciudad de Ibarra (temperatura del fluido, presión y densidad), velocidad del vehículo y área transversal, factores que daban resultados más precisos.

### 3.5.3. Importación de la geometría del vehículo tipo Formula SAE

Para el análisis aerodinámico de la carrocería se examinaron resultados de velocidad, trayectorias de flujo, presiones y presión total. Para iniciar la simulación, se procedió a importar el diseño de SolidWorks al módulo de Ansys Fluent with Fluent Meshing 2022 R1, teniendo en cuenta que el archivo que iba a ser importado estaba guardado como parasolid o, a su vez, denominado formato (x\_t). Seguidamente se procedió a abrir en SpaceClaim.

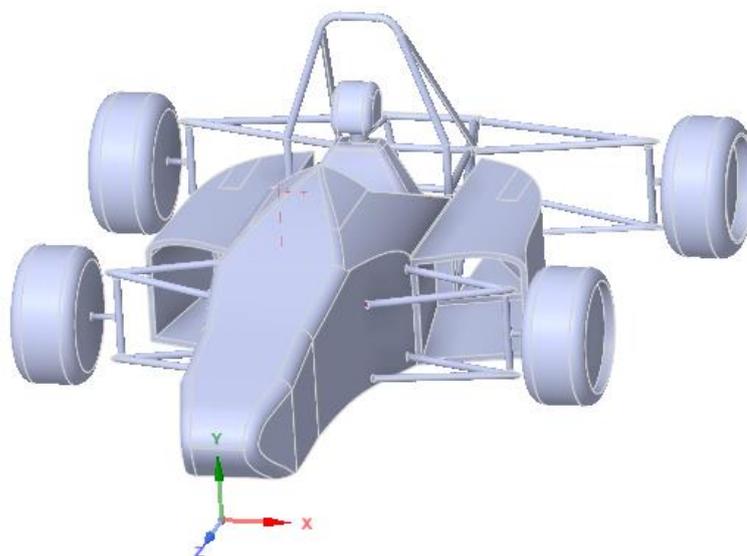


**Figura 3.15** Importación del Modelado

### 3.5.4. Simplificación del modelo CAD

En muchos casos, el modelo CAD de un vehículo formula SAE contiene muchos componentes innecesarios desde la perspectiva de llevar a cabo una interpretación aerodinámica. Por lo tanto, casi siempre es necesario simplificar y limpiar el modelo CAD que será preparado posteriormente para una simulación CFD. Piezas o cuerpos pequeños crean un refinamiento de malla no deseado, lo que genera un alto número de celdas que no contribuye a una mejor precisión en la simulación. Asimismo, los pequeños espacios generan una creación de malla de mala calidad. Piezas como conectores pequeños, tuercas, pernos, largueros y algunas piezas pequeñas del chasis que están encerradas dentro del cuerpo principal y no entran en contacto directo con el flujo no se consideran al crear el modelo CAD simplificado.

Componentes como motor, radiador, sistema de admisión, entre otros que estén presentes detrás del conductor no entran en contacto directo con el flujo, sin embargo, si se requiere adaptarlos para la simulación, se los debe simplificar a una forma más simple o en algunos casos no se toma en cuenta para simulaciones CFD. Por último, no debe haber cuerpos de superficie, bordes divididos, caras pequeñas, interferencias, curvaturas redundantes, caras duplicadas, entre otros. Todo esto se debe solucionar antes de comenzar con el análisis CFD.



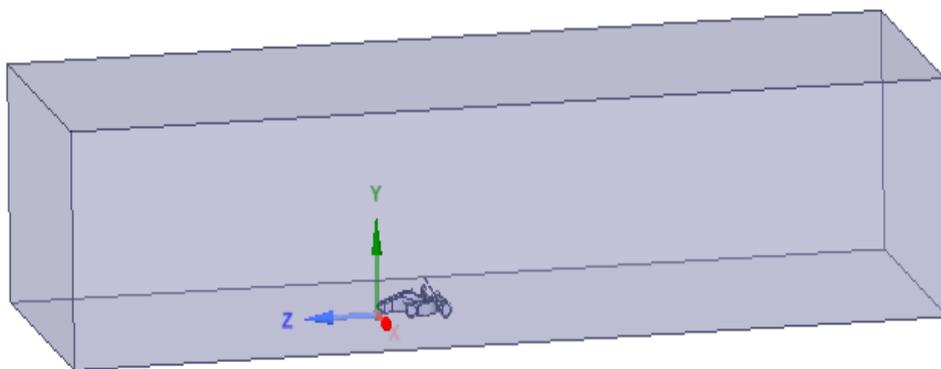
**Figura 3.16** Modelo CAD Simplificado

### 3.5.5. Creación del Túnel de Viento y Simetría

Después de importar el diseño, se procedió a crear el dominio computacional, también denominado túnel de viento, con la opción “enclosure” que se encontraba desplegando el menú “prepare” de la plataforma SpaceClaim. Para proporcionar la posición al diseño o

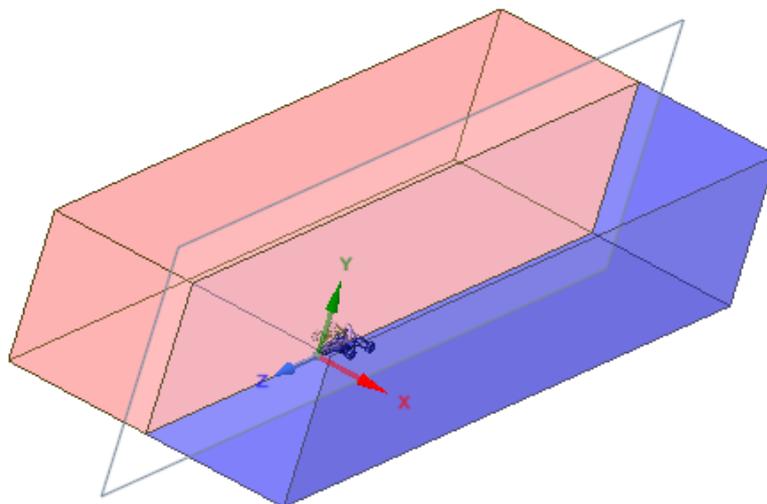
modelo en el túnel de viento, se marcaron sus dimensiones basándose en el punto de gravedad provisional para un prototipo completo, con la intención de obtener datos más precisos. El tamaño real del dominio computacional es:

- Altura: 7,18 m
- Ancho: 13,80 m
- Longitud frontal: 15,88 m
- Longitud posterior: 22,23 m



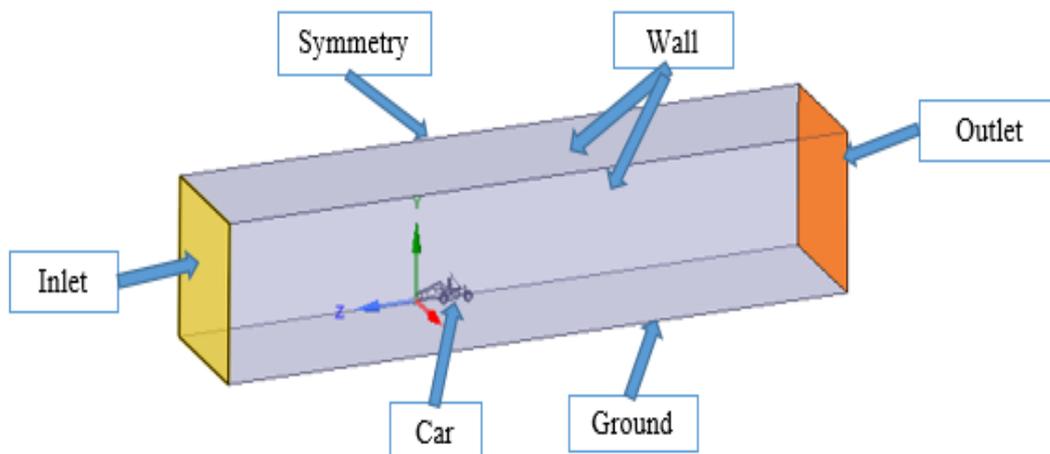
**Figura 3.17** Túnel de Viento

Con el propósito de disminuir la cantidad de elementos, ahorrando gasto computacional, menor tiempo de cálculo y facilitar el procedimiento de enmallado del automóvil, se llevó a cabo la creación de un plano medio entre el túnel de viento con el objetivo de dividir el vehículo en dos partes idénticas que posteriormente se estableció como una condición de simetría.



**Figura 3.18** Modelo CAD dividido a la mitad para reducir el número de elementos

### 3.5.6. Condiciones de contorno



**Figura 3.19** Condiciones de Contorno

Una vez definido el dominio computacional, se proporcionaron a las distintas superficies las condiciones de contorno apropiadas. Teniendo en cuenta que un vehículo formula SAE en pruebas de pista cuenta con velocidades que varían alrededor de los 40 a 100 km/h o incluso más en algunos casos, todo esto dependiendo de la longitud y el diseño de la pista.

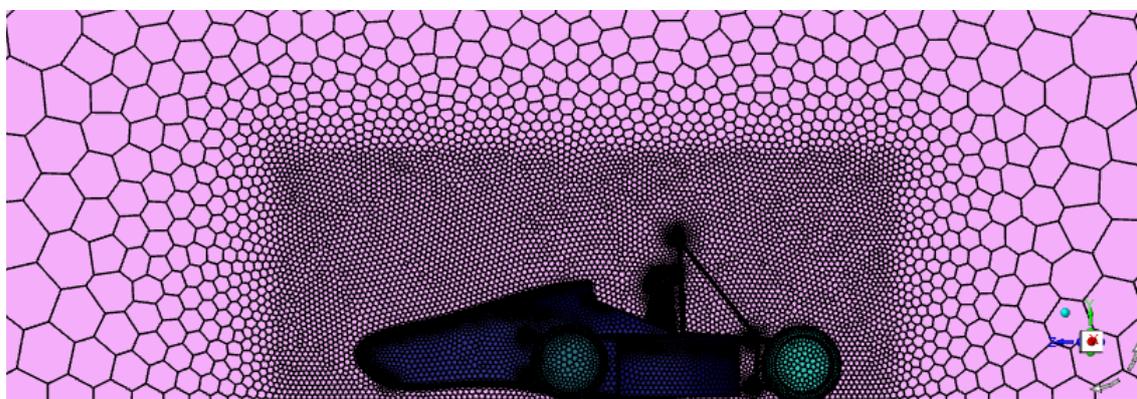
- Inlet: Entrada de aire, configurada como “velocity inlet” con una velocidad de 27.77 m/s en dirección normal a la superficie.
- Outlet: Región de salida del aire, tipo “pressure outlet” con una presión de salida de 0 Pascales.
- Wall: Zona lateral y superior del volumen que pertenece a la zona límite de la región del aire, configurada como un corte especificado 0 “specified shear” para simular una pared de deslizamiento libre.
- Symmetry: Zona lateral que pertenece a una zona límite de la región del aire, configurada como tipo “symmetry”.
- Car: Es de tipo “Wall” correspondiente a la geometría del vehículo, configurada como pared sin deslizamiento “no slip”.
- Ground: Área inferior de la superficie que representa el asfalto o calzada en el problema real. Configurada como tipo “Wall” y cuenta con una velocidad tangencial de 27.77 m/s en dirección a la circulación del fluido.

### 3.5.7. Generación de malla

Al hablar de malla se refiere a una capa compuesta por nodos y líneas que producen figuras tetraédricas y se reflejan sobre los objetos de estudio. Al momento de realizar la simulación

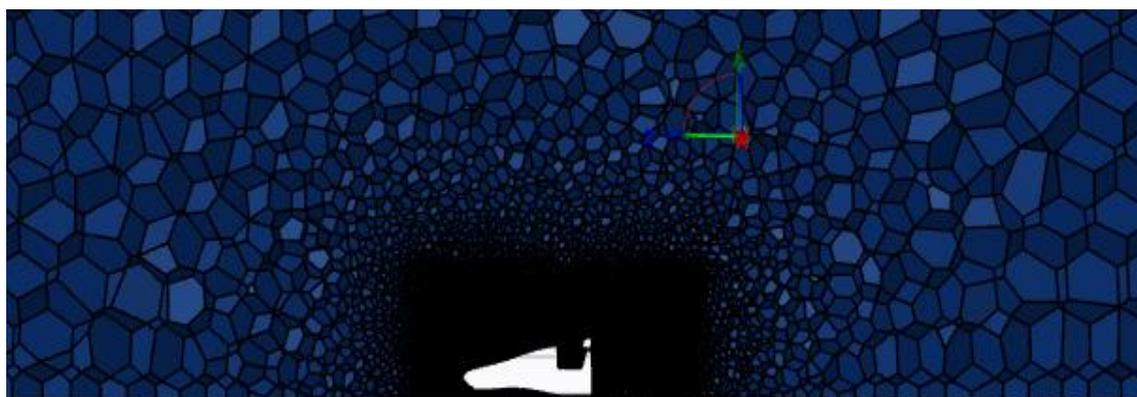
fue crucial garantizar la calidad de mallado, ya que estaba directamente relacionado con los resultados de la simulación.

Para evaluar la calidad de malla, se utilizaron dos criterios de validación de mallado, los cuales son: 1) “Skewness” se encarga de verificar la calidad de malla en la superficie y 2) “Orthogonal Quality” ayuda a evaluar la calidad de malla de volumen. El software de simulación proporciona los resultados del mallado, los cuales se comparan de acuerdo a los criterios de mallado descritos en el Capítulo II, en donde se establecía si la malla es (excelente, muy buena, buena, aceptable, mala e inaceptable) según los valores obtenidos que variaban en un intervalo de 0 a 1.



**Figura 3.20** Malla de superficie

El valor de Skewness se logrará verificar en la figura 3.20 ya que da a conocer el resultado de mallado de superficie.



**Figura 3.21** Malla de volumen

El valor de Orthogonal Quality se puede conseguir del resultado de la malla de volumen, que se indica en la figura 3.21.

### 3.5.8. Validación de malla

Console					
	ground:8	0	0.019331435	0.47747313	13766
	ground:9	0	0.018448884	0.39727149	10272
	ground:10	0	0.018662318	0.34578428	4554
	ground:11	0	0.027206066	0.33107578	706
	ground:12	0	0.030007567	0.39977643	742
-----					
	name	skewed-cells (> 0.80)	averaged-skewness	maximum-skewness	face count
-----					
	enclosure-enclosure1	0	0.022323353	0.56280481	177440

**Figura 3.22** Resultado calidad de malla Skewness

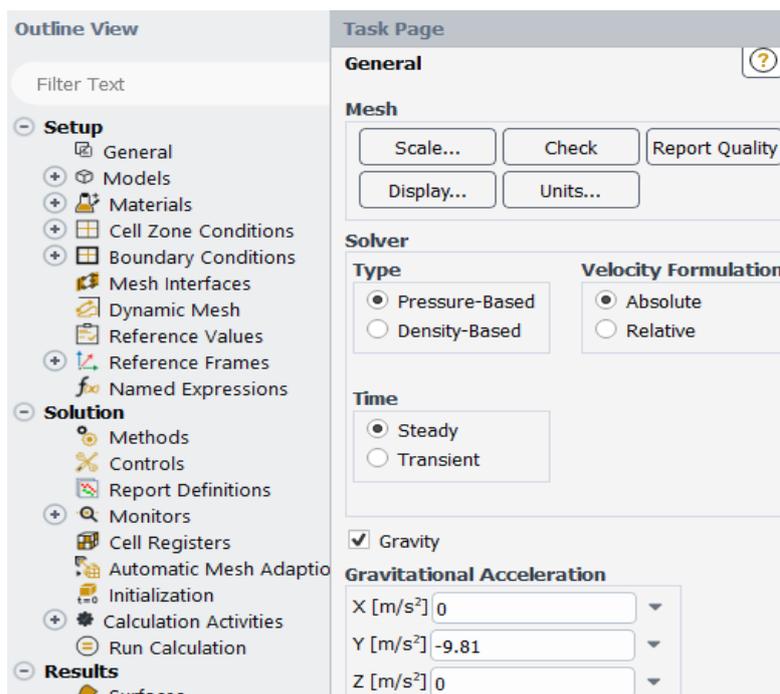
Según el criterio de Skewness, la calidad de malla es crucial para conseguir resultados confiables. En la figura 3.22 se observa un resultado de 0.022, lo que indica que el mallado es excelente. La figura 2.7 da a conocer los rangos de calificación en función del valor obtenido, en lo cual cuando los valores se acercan a 1, señalan que la eficacia de la estructura de la malla no es aceptable, es decir, no es fiable. En contraste, los resultados más cercanos a 0 indican una eficacia de la estructura de la malla excelente, lo que implica que es confiable.

Console					
	dead0	11058	0	0.30146233	5803
	enclosure-enclosure1	10053	0	0.28760948	1207065
	dead12	10048	0	0.31645583	11490
	dead4	10033	0	0.30936906	13807
	name	id	cells (quality < 0.10)	minimum quality	cell count
-----					
	Overall Summary	none	0	0.22800126	1388570

**Figura 3.23** Resultado de calidad de malla Orthogonal Quality

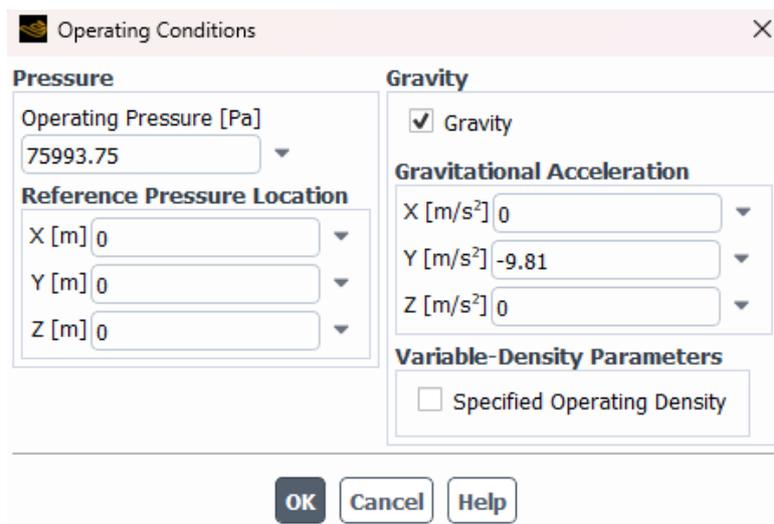
El criterio de Orthogonal Quality es otra manera de comprobar la calidad de mallado. En la figura 3.23 se puede ver que el valor mínimo es de 0.22, lo que indica que la malla se encuentra dentro del rango de “Buena” calidad. Esta evaluación se realiza de acuerdo a la figura 2.8.

### 3.5.9. Condiciones de borde



**Figura 3.24** Configuración de forma general

En el menú “General” se eligió el estado estacionario, tal como se ilustra en la figura 3.24. Además, se empleó el solucionador basado en la presión y, a su vez, se introdujo el valor de la gravedad de  $-9.81 \text{ m/s}^2$  en el eje “y” con respecto a la orientación del diseño.



**Figura 3.25** Condiciones de operación

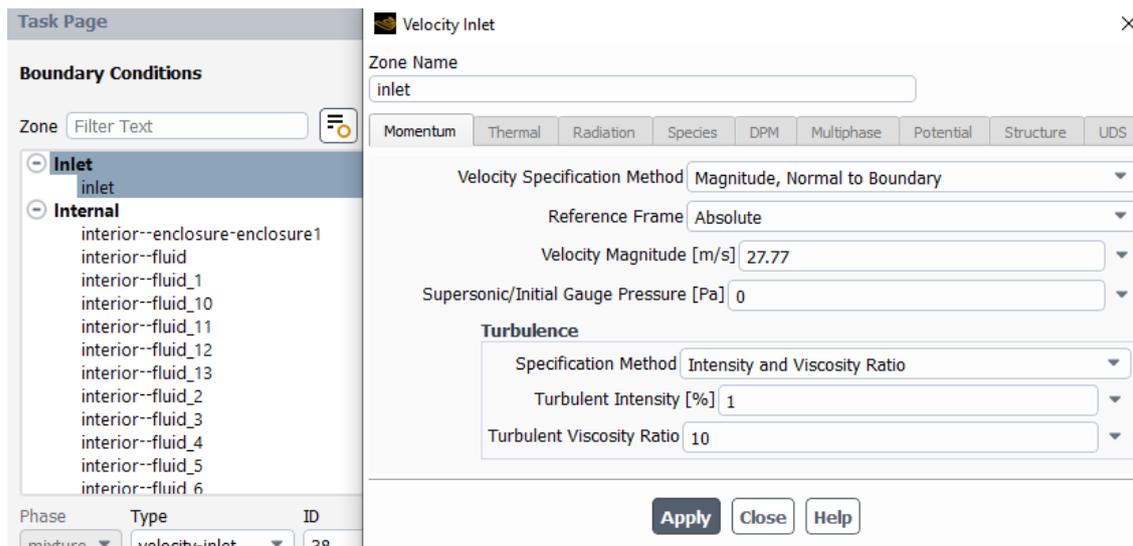
En la opción “Condiciones de Operación”, se verificó que la presión de operación este ajustada a la presión atmosférica de la ciudad de Ibarra, que es de 75993.75 Pascales.

**Figura 3.26** Selección del modelo de viscosidad

En la figura 3.26 se eligió el modelo de viscosidad k-omega, ya que es un modelo diseñado para trabajar en condiciones turbulentas, así mismo determina los factores de turbulencia muy próximos a la pared.

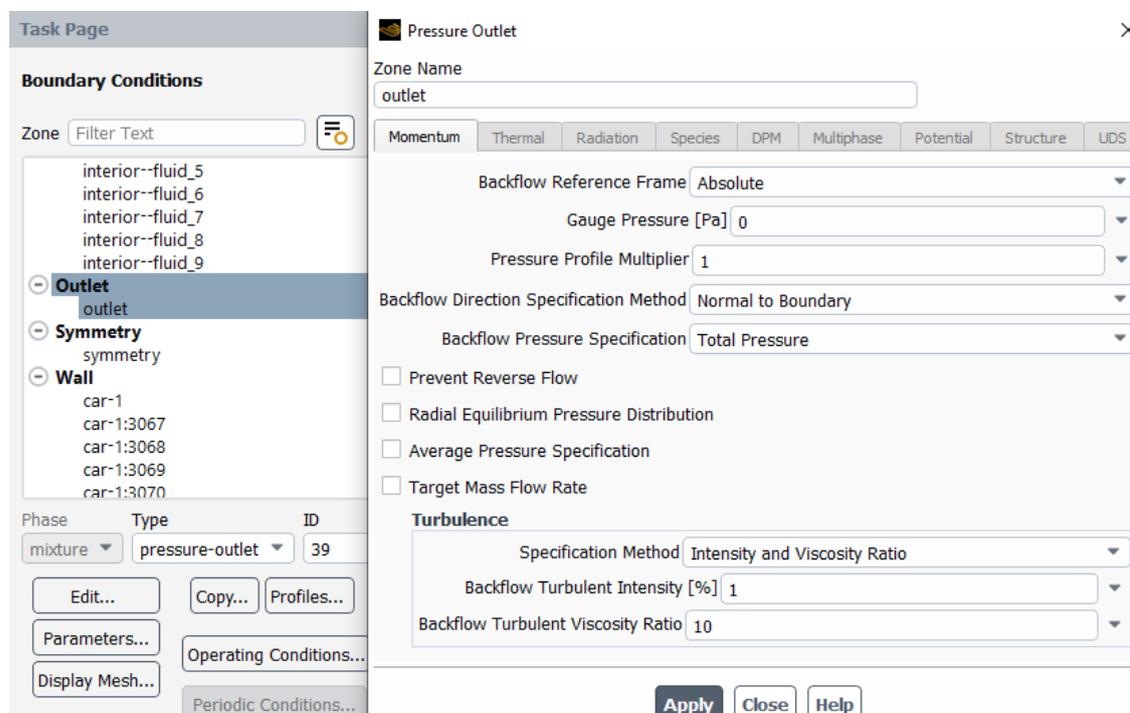
**Figura 3.27** Propiedades del fluido

La figura 3.27 indica las propiedades del aire en la ciudad de Ibarra que cuenta con una altura de 2215 (m. s. n. m) a 0.75 atm. Además, la masa volumétrica del aire fue de  $0.9093 \text{ kg/m}^3$  con una temperatura promedio de  $18 \text{ }^\circ\text{C}$  y la viscosidad dinámica fue de  $1.8158 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ .



**Figura 3.28** Condiciones de entrada a 27.77 m/s

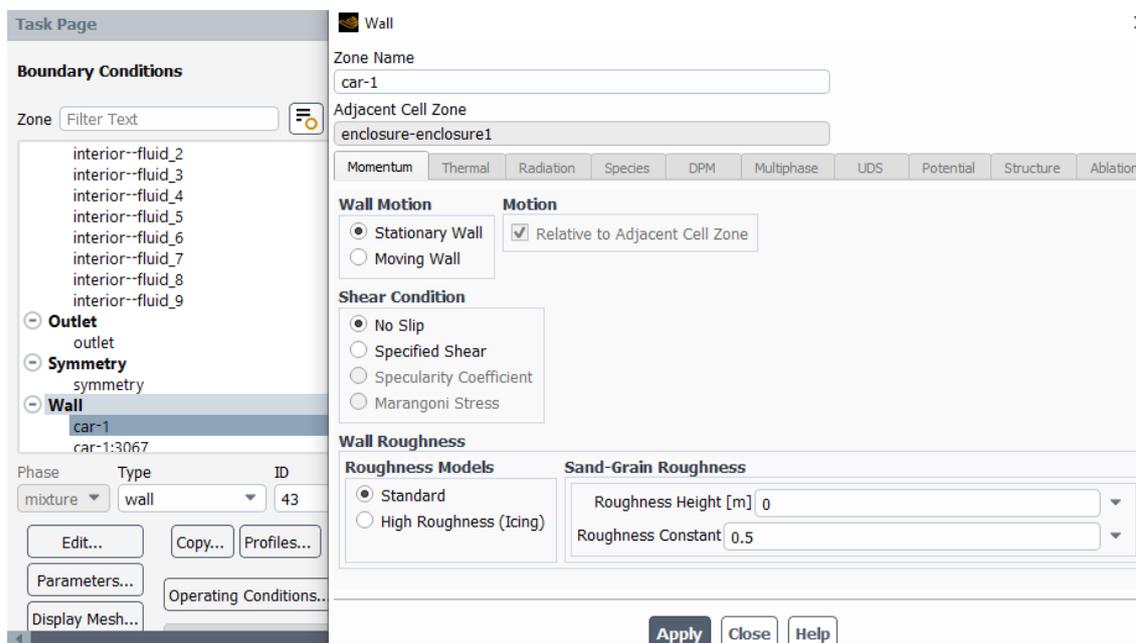
La figura 3.28 muestra una velocidad de entrada de 27.77 m/s o 100 km/h. En lo que respecta a la intensidad de turbulencia, se eligió un valor de 1 %, ya que en las entradas de los túneles de viento suele ser muy baja y, además, se trata de un túnel de viento sin condiciones complejas, esto significa que no se consideran flujos rotativos ni intercambios de calor en las paredes del mismo.



**Figura 3.29** Condición de salida a 0 Pascales

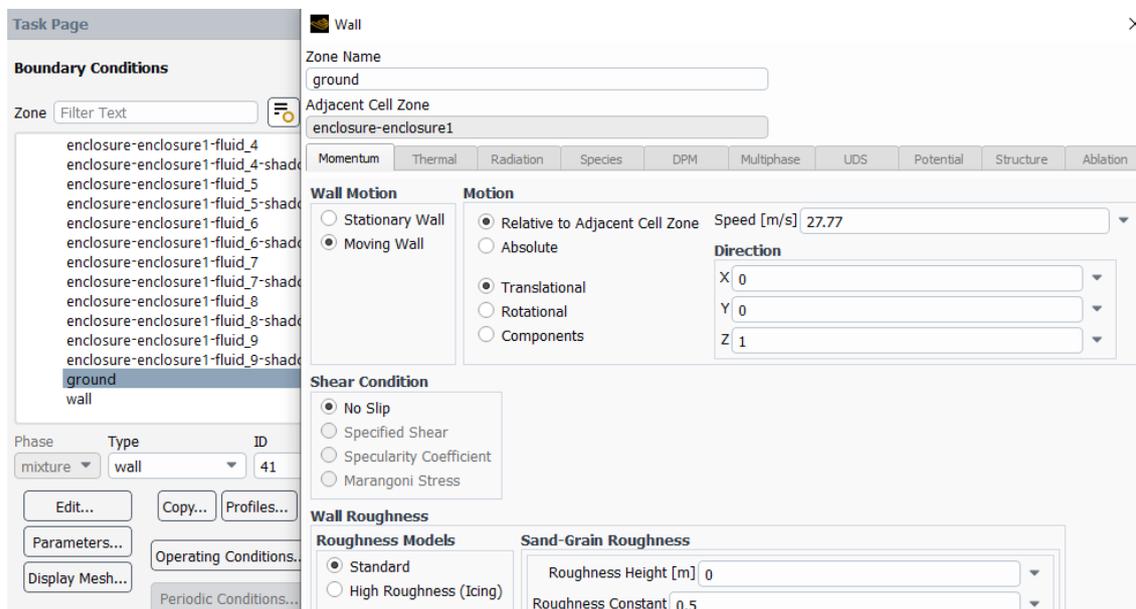
En la condición de salida del aire, se revisó que la presión manométrica o presión relativa este en cero (0) Pascales porque la salida está expuesta a la atmósfera. Además, se modificó

la intensidad de turbulencia al 1 %, ya que el túnel de viento no presenta configuraciones muy complejas.



**Figura 3.30** Condiciones de la geometría del vehículo

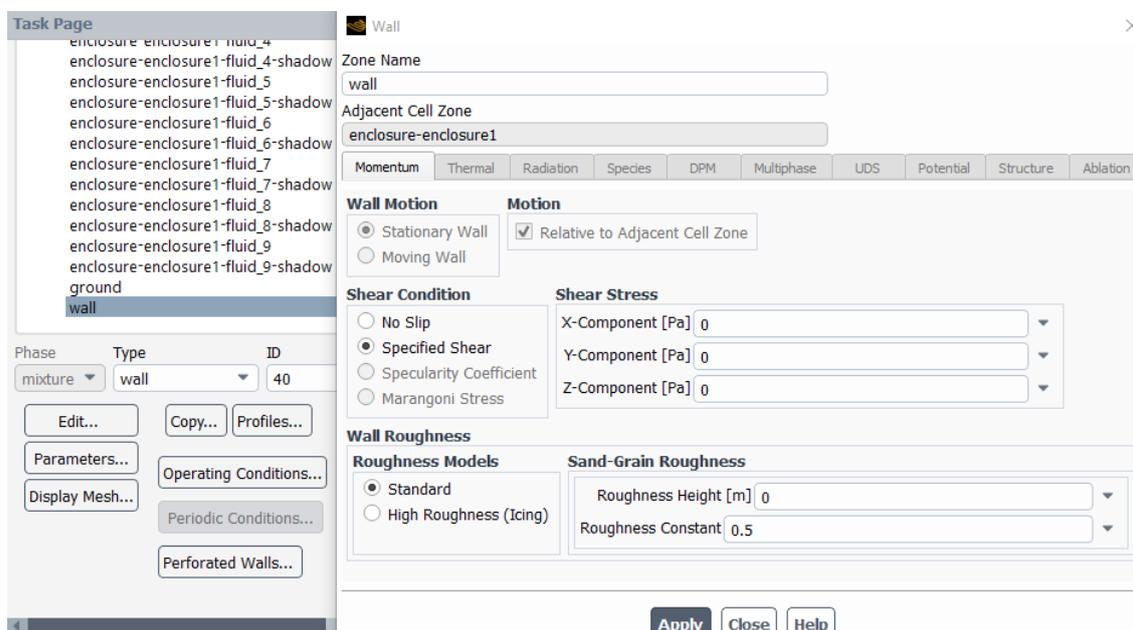
En la figura 3.30, nos percatamos que todas las partes de la geometría del vehículo estén colocadas como una pared estacionaria y sin deslizamiento (No Slip).



**Figura 3.31** Condiciones de la zona inferior o calzada

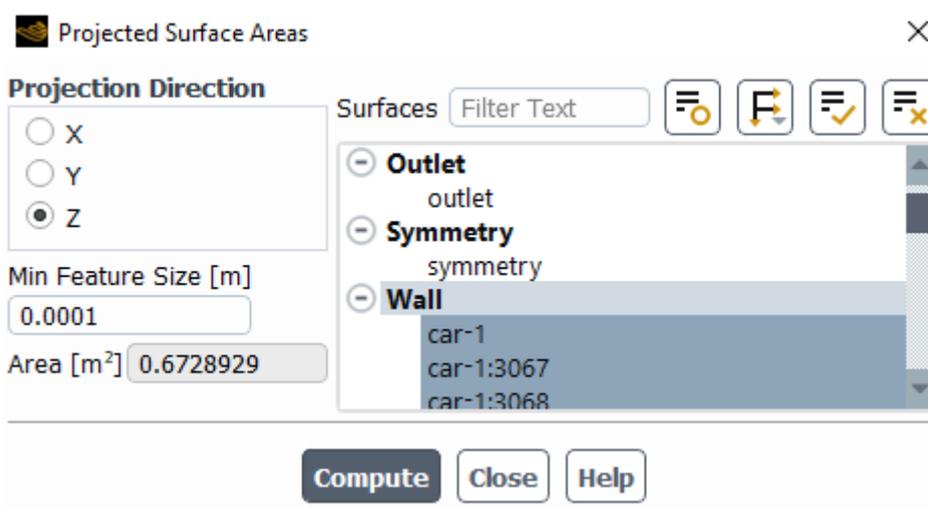
En la figura 3.31, nos indica que la condición de zona inferior o calzada está considerada como una pared móvil con una velocidad tangencial de 27.77 m/s ya que se moverá con

respecto al automóvil y además debe ser la misma velocidad del aire de entrada, en dirección al avance del fluido.



**Figura 3.32** Condiciones para las paredes del dominio computacional

En la figura 3.32 se observa las condiciones para la pared lateral y superior del dominio computacional, en donde se tomaron en cuenta como un corte especificado cero “specified shear”, todo esto para simular una pared resbaladiza o con deslizamiento libre, considerando que, al estar lejos de la geometría del vehículo, esto no afectaría en los resultados finales de la simulación.



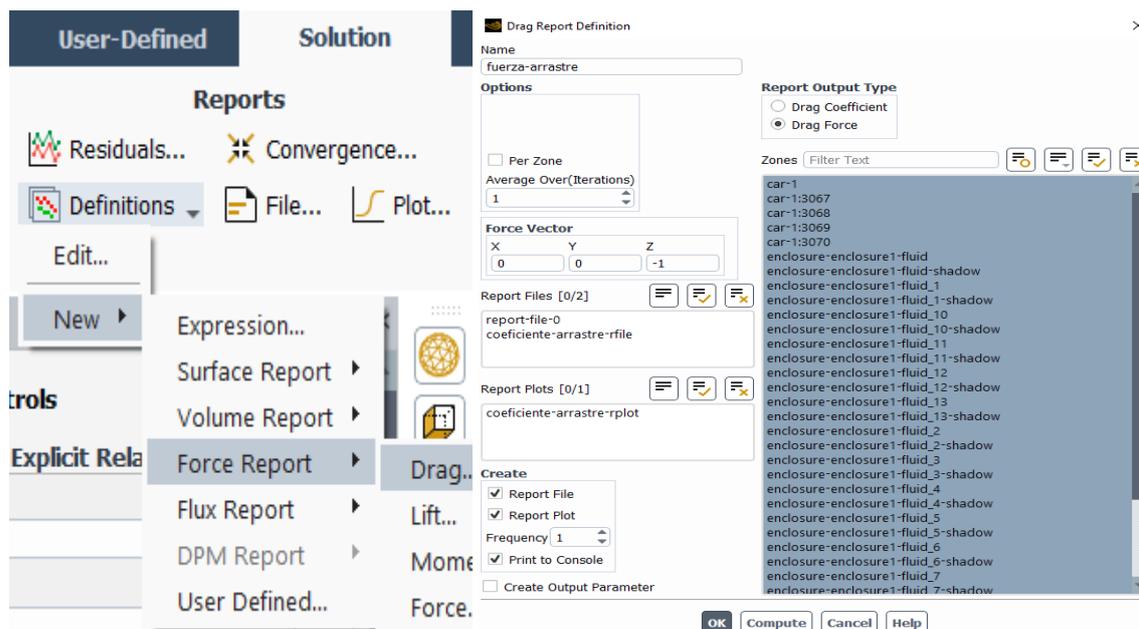
**Figura 3.33** Área frontal del vehículo

Para determinar el área de referencia del vehículo, se tuvo en cuenta que era el área frente al flujo o el área frontal del mismo. Por tal motivo, se empleó la herramienta “Proyección de áreas” y a continuación se seleccionó el eje “z”, ya que era la trayectoria del flujo. Seguidamente, en la lista de superficies, se seleccionó todas las superficies que correspondían al automóvil. Un parámetro importante fue el tamaño mínimo característico, por lo tanto, se redujo este valor hasta que el área de superficie proyectada comience a converger hacia un valor en particular. En nuestro caso, se utilizó un tamaño mínimo característico de 0.0001, ya que, en dicho valor el área converge a un valor de 0.67 m<sup>2</sup>.

Parameter	Value
Area [m <sup>2</sup> ]	0.67
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	0.9093
Enthalpy [J/kg]	0
Length [m]	3.18
Pressure [Pa]	0
Temperature [K]	291.16
Velocity [m/s]	27.77
Viscosity [kg/(m s)]	1.8158e-05
Ratio of Specific Heats	1.4
Yplus for Heat Tran. Coef.	300

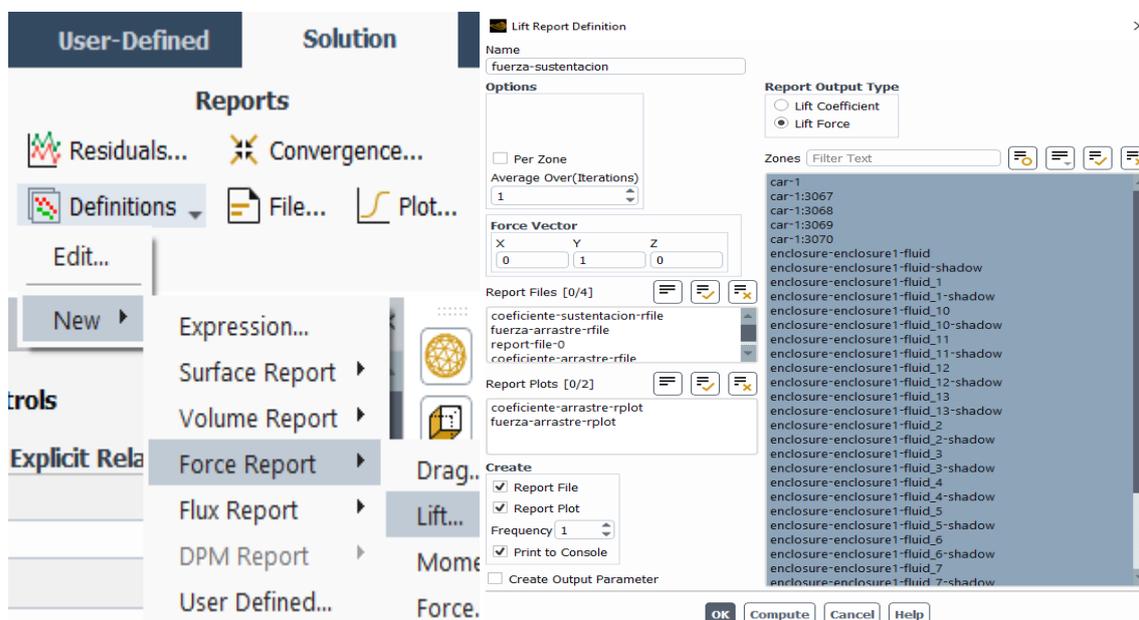
**Figura 3.34** Valores de referencia

En la figura 3.34, se introdujeron valores característicos del automóvil, como la longitud total y el área frontal. Por tal motivo, se comprobó que la densidad del aire, velocidad, viscosidad dinámica, temperatura y presión manométrica coincidieran con los valores ingresados previamente.



**Figura 3.35** Configuración para la obtención de la fuerza de arrastre

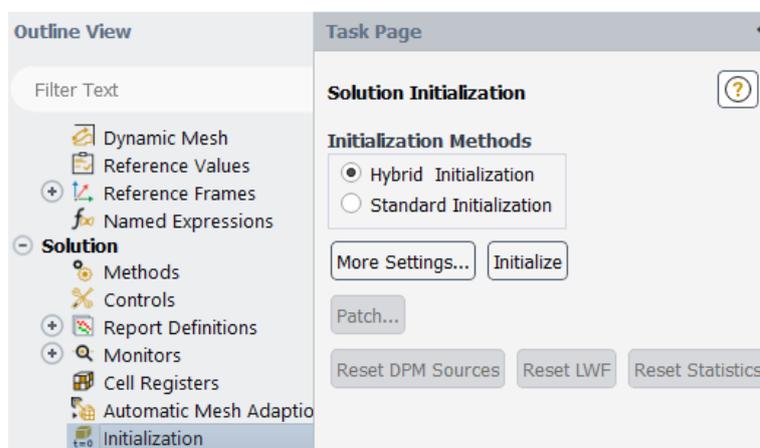
Con el fin de obtener la fuerza de arrastre, se estableció una nueva configuración siguiendo una serie de pasos señalados en la figura 3.35. A continuación, se eligieron todos los sólidos que estaban relacionados con la geometría del automóvil, y finalmente se estableció la dirección del vector según la orientación del diseño, que en este caso era en dirección al eje “z” negativo.



**Figura 3.36** Configuración para la obtención de la fuerza de sustentación

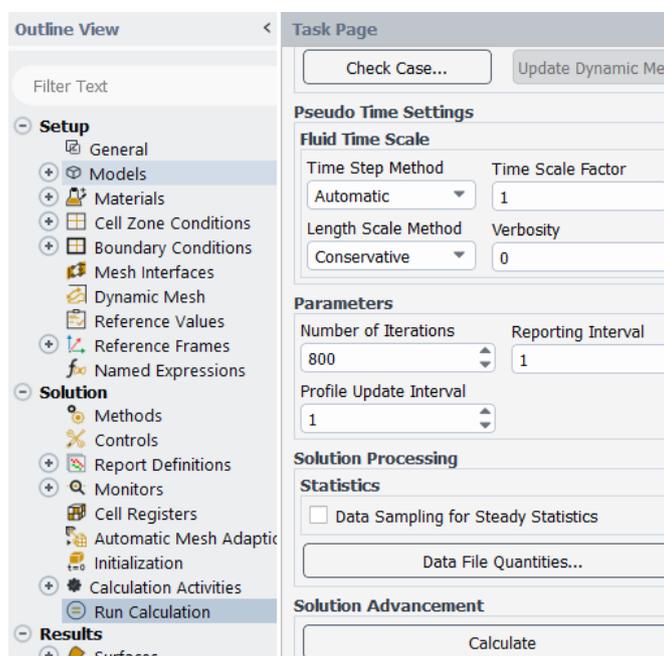
Para obtener la fuerza de sustentación, se establecieron una serie de pasos señalados en la figura 3.36. Seguidamente, se eligieron todos los sólidos relacionados con la geometría del

automóvil, y finalmente se estableció la dirección del vector según la orientación del diseño, que en este caso era en dirección al eje “y” positivo.



**Figura 3.37** Selección del sistema de inicialización

En esta sección, se eligió la opción de inicialización “Hybrid”, tal como se muestra en la figura 3.37. Esta opción acelera y optimiza el cálculo en general, ya que realiza una serie de iteraciones con resultados más reducidos, lo que conduce a obtener una excelente apreciación de las variables de flujo.

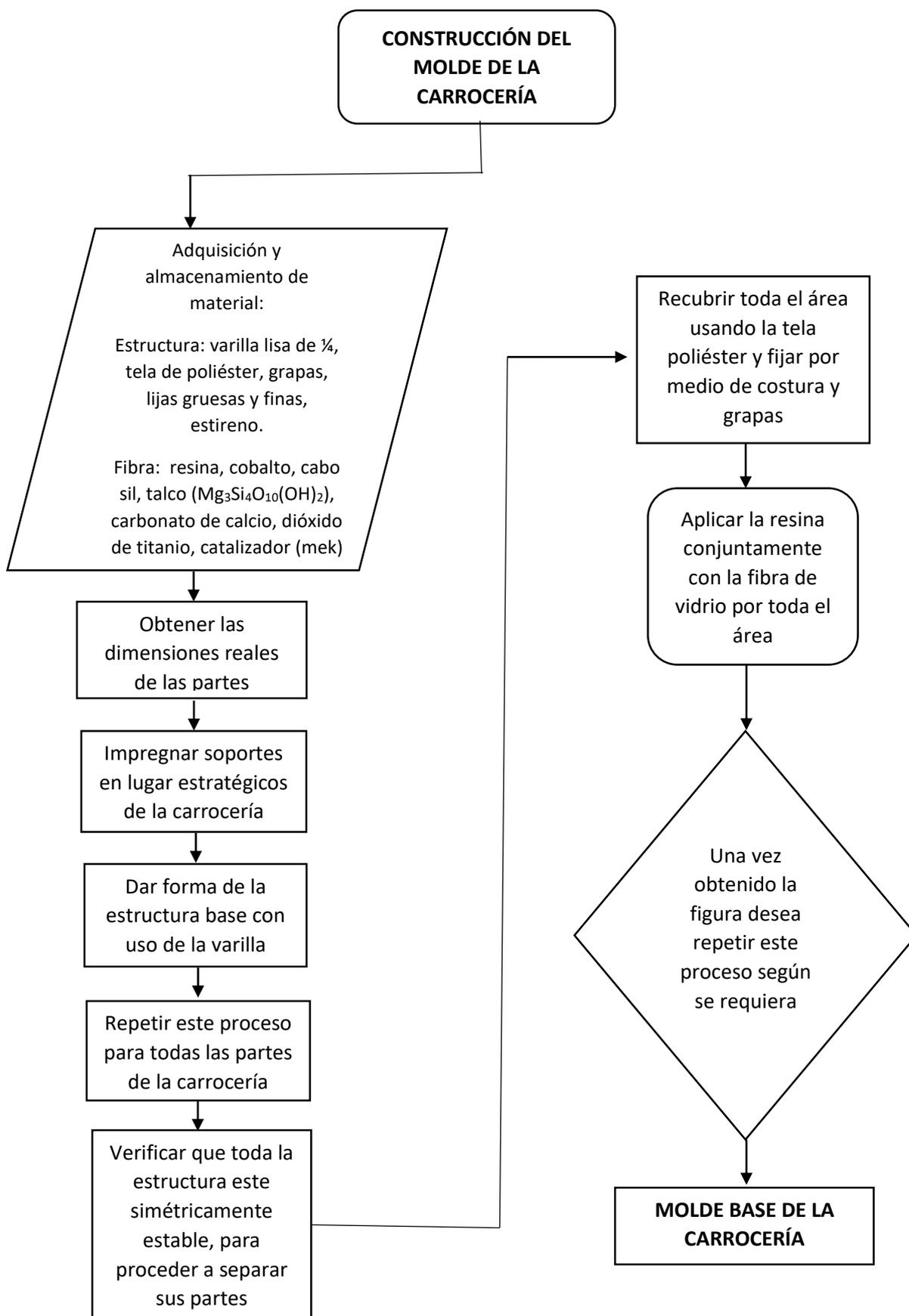


**Figura 3.38** Ejecución del estudio

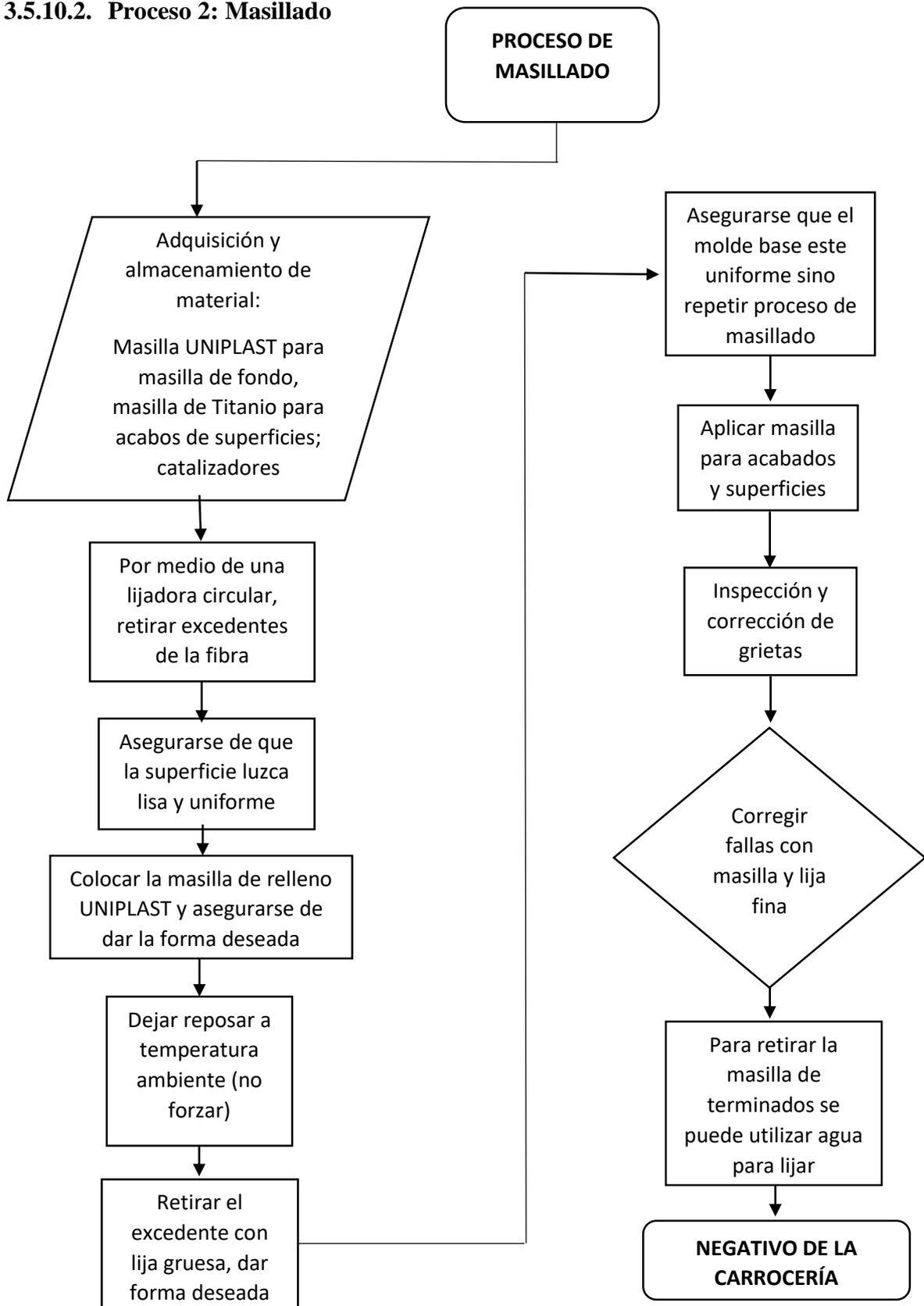
Para concluir con las configuraciones del estudio, se incorporó la cantidad de veces que se llevarían a cabo durante la simulación. En este análisis, se establecieron 800 iteraciones, ya que proporcionaban una mayor precisión en los resultados, y se configuraron de acuerdo a lo mostrado en la figura 3.38. Posteriormente, se eligió la opción “Calculate”.

### 3.5.10. Diagramas del proceso de construcción de la carrocería

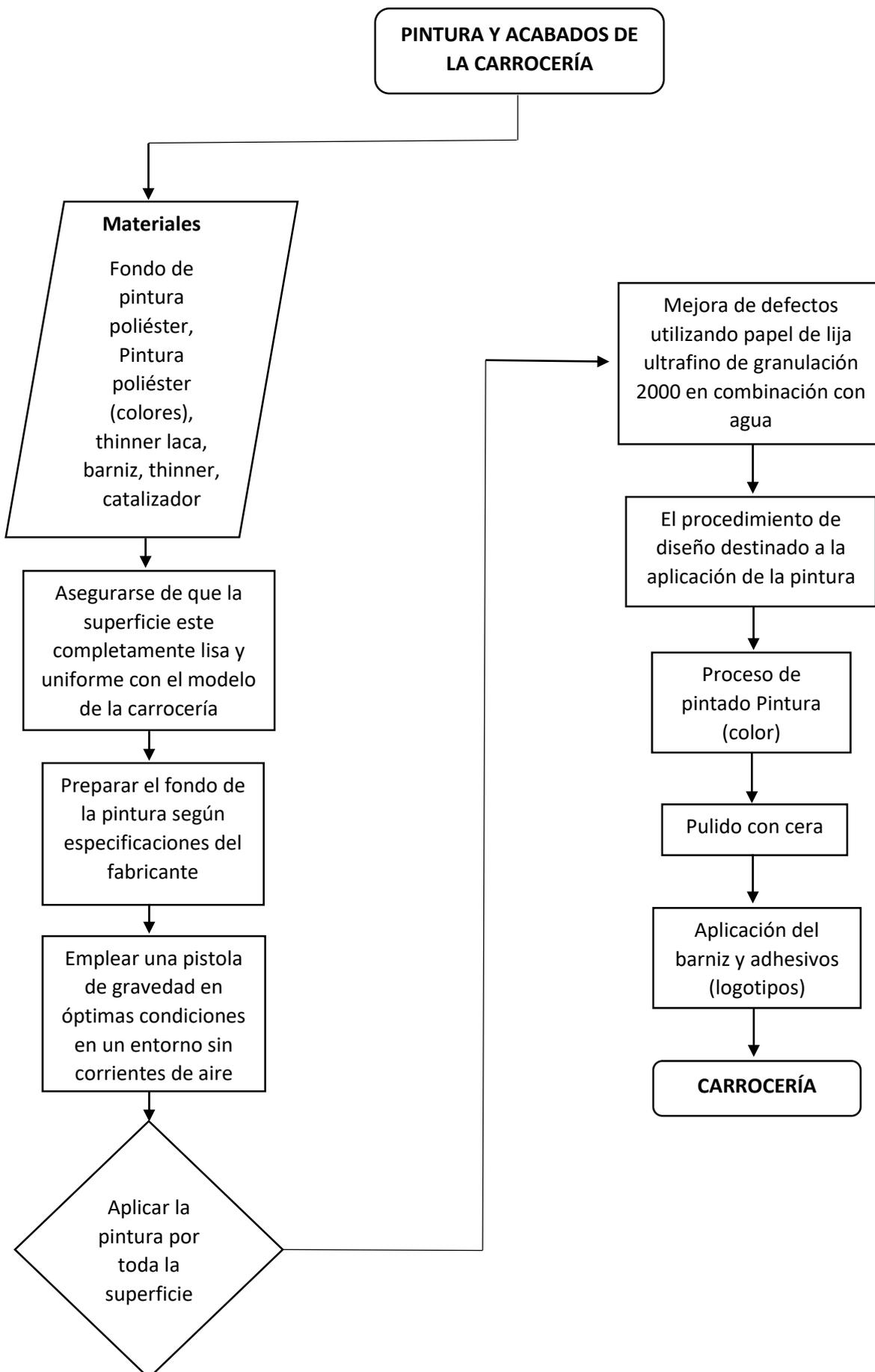
#### 3.5.10.1. Proceso 1: Molde de la carrocería



### 3.5.10.2. Proceso 2: Masillado



### 3.5.10.3. Proceso 3: Pintura y Acabados



### 3.6. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE LA CARROCERÍA

En la fabricación de la carrocería, fue necesario llevar a cabo una serie de procesos ordenados que se analizaron previamente antes de su ejecución. En la creación de la misma, se anticiparon y planificaron los pasos que se describen a continuación.

#### 3.6.1. Introducción

Antes de comenzar con el proceso de construcción, se verificaron los planos del modelo diseñado mediante el software SolidWorks para obtener las medidas reales, que posteriormente servirían como guía para el desarrollo del proyecto. Como punto de partida, se consideraron los materiales base que se utilizarían para dar el modelamiento a la carrocería, los mismos que debían ser de fácil maniobrabilidad y alta resistencia en su uso base, además de permitir tener un acabado uniforme, ya que el terminado de la carrocería debía tener una superficie lisa y sin grietas en ninguna de sus áreas para asegurar la calidad del producto final.

Con el propósito de crear las matrices fundamentales, se realizaron determinados procedimientos antes de su creación, los cuales se describen detalladamente a continuación:

- **Pasta para pulir:** Este procedimiento es fundamental para la estructura inicial del diseño de la carrocería o pre-molde como se lo conoce, esta es una pasta para pulir específicamente para poliéster la cual brinda la facilidad de quitar grietas o excedentes de la superficie, en caso de que no se la utilice sería sumamente complicado el realizar el proceso de pulido.
- **Encerado:** Se requiere extender una capa delgada de cera en movimientos circulares hasta que toda la superficie esté completamente cubierta, luego esperar el tiempo adecuado o el que el fabricante considere pertinente. Después de que la cera se haya distribuido uniformemente en toda la superficie se debe retirar la cera con un material ya sea de algodón o franelas que no desprendan impurezas, es recomendable evitar el uso de pulidoras mecánicas, porque se puede generar grietas en la superficie, creando áreas no protegidas. Esto podría resultar en que la pieza se pegue al pre-molde y este a su vez dañe la superficie al momento del desmoldar por lo que es importante percatarse que esta se adhiera y seque adecuadamente.
- **Desmoldante:** Llamado PVA, tiene la función de mejorar el proceso de desmolde. Una cantidad de un litro de PVA es suficiente para cubrir una superficie de hasta 10 metros cuadrados. El tiempo de secado varía entre 15 y 30 minutos, resultando en

una capa brillante y uniforme y esta a su vez puede ser retirada con agua tibia luego de su desmolde. Una observación sobre esta sustancia es que no se aconseja su utilización con resinas que generen agua durante el proceso de curado, ya que podría afectar el resultado final.

- **Creación de la matriz o molde de resina poliéster:** Para confeccionar este molde, se utiliza gel-coat esto se lo puede realizar con la asistencia de un compresor y una pistola de aire a presión para una distribución más uniforme, es pertinente dejar un tiempo de curado pertinente y ver que la superficie no exceda 1mm de espesor entre capa y capa para una mejor adherencia. Se podrá notar que existen cambios de color entre capa y capa por lo que si se observa desniveles en su aplicación se podrá optar por lijar la capa principal para aplicar la siguiente capa exterior esto se lo puede realizar cuantas veces sea necesario hasta conseguir el espesor deseado.



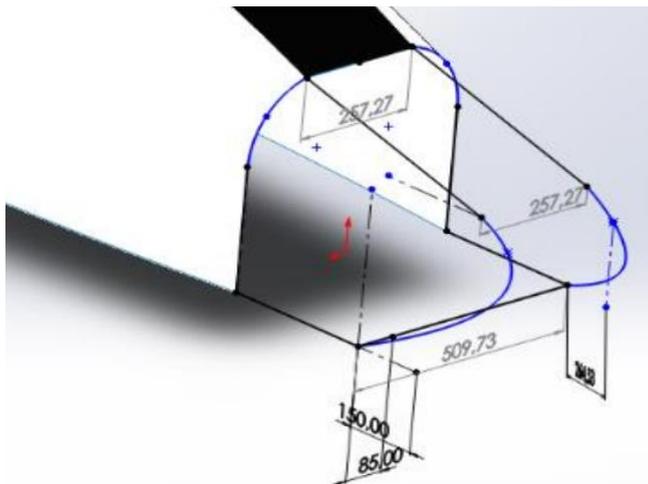
**Figura 3.39** Catalizador Mek

La catalización de este gel suele ser crítica, por lo que se requirió el uso de 2.5% de peróxido de Metil Etil Cetona, denominado como MEK, a 25 grados Celsius para contrarrestar las variaciones de la temperatura ambiente.

### **3.6.2. Modelación de la carrocería**

#### **3.6.2.1. Primera etapa - Planos**

En esta fase, fue esencial obtener las dimensiones reales de cada componente que formó parte del desarrollo de la carrocería, como la nariz, trompa, los laterales y los pontones. Este paso se llevó a cabo utilizando el software SolidWorks y una impresora de planos en formato A2 para digitalizarlos. Estos datos digitalizados resultaron fundamentales en todas las etapas de la construcción. Sin embargo, es importante destacar que cada componente que se involucró debió ser construido de manera individual para luego ensamblarlos y lograr que parecieran una sola estructura integrada.



**Figura 3.40** Dimensionamiento de la nariz

### 3.6.2.2. Segunda Etapa – Aplicación de la fibra de vidrio (molde base)

En esta etapa, se procedió a realizar el diseño de la estructura base de cada componente de la carrocería. Para este propósito, se eligió emplear varilla lisa de  $\frac{1}{4}$  de pulgada, que permitió la flexibilidad necesaria para dar forma de acuerdo a los planos previamente obtenidos. Para unir estas varillas, se utilizó una soldadora Mig.



**Figura 3.41** Unión de varillas con soldadora Mig

Con base en el diseño digitalizado y las medidas precisas obtenidas a través de los planos, se procedió a crear lo que se denomina un molde base para cada elemento de la carrocería, que sería posteriormente revestido con fibra de vidrio. Cada molde base se formó aplicando una capa sobre una lámina de tela que abarcó toda la superficie de la estructura metálica previamente construida. Estas superficies tuvieron que replicar exactamente la forma deseada para asegurar que la fundición se realice sin imperfecciones.

Fue esencial asegurar de manera adecuada la sujeción de la tela para que no perdiera su forma durante el proceso y no se despegue durante la aplicación de la resina y la fibra. Para mantener la forma de la tela sin cambios, se recomienda fijarla mediante costuras o, alternativamente, utilizando grapas que refuercen su forma mientras se aplica la fibra.



**Figura 3.42** Molde base a través de una lámina de tela

Para comenzar el proceso de aplicación de la fibra, fue esencial preparar los materiales de la siguiente manera: primero, se combinó la resina de poliéster con el estireno previamente diluido. Luego, se agregó el cobalto a esta mezcla inicial y se revolvió cuidadosamente hasta que cambió de color y se volvió uniforme.

Después, se procedió a incorporar el carbonato de calcio, el talco ( $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ ), el dióxido de titanio y el cabosil. En esta fase, fue importante mezclar todas estas sustancias minuciosamente utilizando un batidor, con el propósito de lograr una completa disolución de los productos químicos. Una vez que todas estas sustancias estuvieron completamente mezcladas, se aplicó el catalizador MEK, que contribuyó al adecuado proceso de secado de la mezcla en su totalidad.

En primer lugar, fue necesario aplicar la mezcla en pequeñas secciones de la superficie hasta cubrirla por completo. Para llevar a cabo esta aplicación, se empleó un rodillo de plástico o una brocha. Una vez que se aplicó la mezcla en la superficie, se colocó la fibra de vidrio sobre la zona donde se había extendido la mezcla y luego se aplicó nuevamente la mezcla sobre la fibra, asegurándose de que quedara cubierta en ambos lados por la mezcla. A continuación, se permitió que repose durante un tiempo adecuado a temperatura ambiente; no es recomendable acelerar el proceso de secado, ya que esto podría afectar la estabilidad de la fibra y dañarla en lugar de fortalecerla.



**Figura 3.43** Aplicación de la mezcla

Fue de vital importancia manipular la fibra de vidrio utilizando las herramientas adecuadas y contar con la protección adecuada, como guantes, mascarilla y, si era posible, un traje especial, con el objetivo de prevenir la adherencia de partículas a la piel humana.

Fue necesario llevar a cabo este procedimiento en todas las secciones o componentes del chasis, incluyendo la parte frontal (nariz y trompa) y los dos pontones. Al trabajar en estas partes de forma individual, se simplificó la manipulación de cada una, lo que facilitó una labor más eficiente.

Se debe realizar este procedimiento tantas veces como sea requerido y según las necesidades del fabricante, es decir, el grosor que se desea en el molde base de cada parte.



**Figura 3.44** Aplicación de la fibra de vidrio

### 3.6.2.3. Tercera Etapa – Masillado

Después de un período de secado adecuado, el molde mostró algunas imperfecciones en su superficie. Por lo tanto, fue esencial realizar un pulido en toda la superficie con el fin de obtener un aspecto uniforme antes de avanzar con el proceso de masillado. Fue de vital importancia asegurarse de que no hubiera áreas donde la fibra no estuviera correctamente compactada, ya que, en ese caso, se despegaría fácilmente del molde.

Para llevar a cabo el proceso de pulido en las partes, se requirió el uso de una lijadora circular. En primer lugar, se eliminó el exceso de material utilizando una lija gruesa, en este caso, se empleó una lija número 40, la cual fue efectiva para eliminar en gran medida la fibra sobrante. Se repasó toda la superficie y se prestó especial atención a las áreas con irregularidades, con el objetivo de lograr una superficie más uniforme.

Posteriormente, se procedió a refinar aún más la superficie repasándola con una lija más fina, en este caso, una lija número 80. Esto se hizo con el propósito de eliminar posibles rayones que pudieron haber sido causados por la lija gruesa. Fue esencial garantizar que toda la superficie estuviera lo más suave posible, con el fin de facilitar la aplicación del masillado durante el proceso, evitando así la necesidad de utilizar una cantidad excesiva de material para igualar la superficie. Asimismo, se necesitó realizar el procedimiento de pulido en todos los elementos que conformaban la carrocería.

Fue importante revisar continuamente la colocación precisa de los moldes de fibra y asegurarse de que estuvieran dando la forma deseada a la carrocería. Este procedimiento se llevó a cabo en todas las secciones de la carrocería para poder corregir cualquier irregularidad de manera oportuna, si es que surgía alguna.



**Figura 3.45** Molde del pontón listo para masillar

Una vez que todas las piezas fueron sometidas al proceso de pulido, fue esencial eliminar cualquier suciedad o polvo presente en la superficie, y se utilizó una pistola de aire para llevar a cabo esta tarea. Esto fue necesario antes de avanzar con la fase de masillado de las partes.

En primer lugar, se preparó la masilla de relleno, en este caso, se optó por la masilla UNIPLAST, que resultó especialmente adecuada para trabajar con fibra de vidrio. Esta masilla tenía una consistencia bastante dura y era eficaz para cubrir o reparar cualquier imperfección presente en las partes.

Para su preparación, se recomienda seguir las indicaciones proporcionadas por el fabricante, ya que la proporción de catalizador viene detallada en las instrucciones. Fue importante mezclar la masilla gradualmente, ya que tenía un tiempo de secado limitado, y una vez que se endureció, ya no se puede utilizar.

Luego, se aplicó una primera capa de masilla sobre toda el área con una espátula lisa, intentando darle la forma deseada. Este proceso se repitió una vez más, aplicando una capa mucho más delgada que la primera y permitiendo que la masilla se extendiera uniformemente por la superficie. Se debió repetir este proceso con cada una de las partes y permitir que la masilla se secase a temperatura ambiente, asegurándose de que mantuviera su forma durante el proceso de secado.



**Figura 3.46** Aplicación de masilla de relleno al pontón

Una vez que la masilla de relleno completó su proceso de secado, fue necesario eliminar el exceso de la misma mediante el uso de una lijadora plana, empleando una lija de grano número 50 para remover las partes más gruesas que pudieran quedar sobre la masilla ya endurecida. Posteriormente, se sustituyó esta lija por una de mayor finura, en este caso, se utilizó una lija número 100. Esto se hizo con el propósito de dejar la superficie mucho más

uniforme y óptima, preparándola para la aplicación de la siguiente capa de masilla, que tenía una textura más suave y se utilizaba para otorgar un acabado más refinado a la superficie.

Continuando con el proceso de masillado, una vez que todas las partes fueron completamente lijadas y tuvieron una forma más uniforme, se procedió a eliminar cualquier impureza presente en ellas para luego aplicar una segunda capa de masilla. Esta capa tenía el propósito de mejorar el acabado de las secciones de la carrocería.

En este caso, se eligió utilizar una masilla epoxi de titanio (compuesta de poliéster) debido a su idoneidad para realizar reparaciones y uniones duraderas. Esta masilla es resistente al desgaste y presenta otras propiedades beneficiosas, como la capacidad de ser esculpida y endurecerse únicamente al mezclarse con el catalizador. Una vez que se ha secado, adquiere una dureza similar a la de una piedra, lo que la hace ideal para el tipo de labor que se está realizando.

Del mismo modo, utilizando una espátula, se procedió a aplicar esta masilla sobre toda la superficie de las piezas. Se observó que se adhería de manera más estética y proporcionaba un acabado superior. Fue importante asegurarse de que la masilla cubriera completamente toda el área de la superficie de la pieza para obtener un acabado más refinado.



**Figura 3.47** Aplicación de la masilla epoxi de titanio

Una vez que se consiguió la forma deseada en cada una de las piezas, fue necesario lijar nuevamente, pero esta vez utilizando un poco de agua, se procedió empapando un poco la lija, en este caso, se utilizó una lija fina de agua número 180, teniendo en cuenta que se debía asegurar de no desprender la masilla y solo retirar un poco de excedente que podría presentar. Posteriormente, se utilizó una lija mucho más fina, en este caso, una lija de agua número 1500, con el propósito de que la superficie quedara completamente lisa y lista para el siguiente proceso.



**Figura 3.48** Diseño listo para la siguiente etapa

#### **3.6.2.4. Cuarta Etapa – Pintura y acabados**

Con todas las piezas listas, fue momento de iniciar la etapa de pintura. En primer lugar, se aplicó el fondo base, también conocido como fondo gris. Este paso fue crucial ya que ayudó a cubrir los surcos de la lija y facilitó la detección de posibles imperfecciones que pudieran haber quedado tras el proceso de masillado.

Para llevar a cabo este paso, se preparó el fondo de acuerdo con las indicaciones proporcionadas por el fabricante. En este caso, se siguió una proporción de 2 partes de pintura de fondo por cada 1 parte de diluyente, utilizando thinner y con su respectivo catalizador. No obstante, esto puede ser ajustado según la experiencia y criterio de la persona que trabaje en el área.

Una vez que el fondo estuvo debidamente preparado, se aplicó directamente sobre las piezas utilizando una pistola de aire de gravedad. Fue importante asegurarse de que tanto las partes de la pistola como su recipiente estuvieran completamente limpios y libres de impurezas para evitar posibles anomalías durante este proceso.



**Figura 3.49** Aplicación del fondo base

Después de que el proceso de secado del fondo estuvo concluido, era posible que se observaran pequeños agujeros que requirieran la aplicación de masilla suave. Esto se hizo para tapar estas imperfecciones y lograr una superficie totalmente uniforme y lisa.



**Figura 3.50** Aplicación de masilla suave

Después de que la masilla completó su proceso de secado, fue fundamental llevar a cabo un lijado adicional en toda la superficie utilizando una lija de grano muy fino, en este caso, se empleó una lija número 400. Se recomienda hacerlo con un poco de agua y teniendo cuidado de no eliminar completamente el fondo. Una vez que se verificó que la superficie estaba aún más uniforme, se procedió a repetir el proceso de pintura, centrándose especialmente en las áreas donde se aplicó la masilla.



**Figura 3.51** Lijado suave después de aplicar fondo base

En última instancia, para preparar la superficie para la capa base de pintura, fue imprescindible llevar a cabo otro lijado, pero en este caso se hizo con abundante agua y una lija de mayor fineza. En este caso, se utilizó una lija de agua número 2500, que eliminaba

únicamente pequeñas capas de material, otorgando una apariencia y acabado más refinados. De esta forma, la superficie quedó lista para recibir la pintura adecuada.



**Figura 3.52** Último lijado para un mejor acabado

En este punto, fue crucial contar con un diseño y una selección de colores completamente definidos para la pintura. En este caso, se optó por tonos básicos comúnmente utilizados en la carrera, como el color rojo, blanco y negro. El proceso implicó iniciar desde un color de base hacia los tonos más intensos. Se comenzó aplicando primero el color blanco en toda la superficie de la carrocería. Fue esencial asegurarse de cubrir por completo las áreas que no serían parte de la pintura, como el asiento, el motor y las partes del chasis.

Es importante enfatizar que la elección de pintura fue el poliéster, que es la opción óptima en el ámbito automotriz. Este tipo de recubrimiento ofrece una alta resistencia a las condiciones exteriores, mantiene un brillo duradero, conserva la estabilidad del color y es altamente resistente a los daños causados por los rayos UV. Además, proporciona un acabado estético muy atractivo.

Para la preparación de la pintura, fue esencial seguir las instrucciones del fabricante. En este caso, se siguió una proporción de 2 partes de pintura por cada 1 parte de diluyente, junto con el correspondiente catalizador. Es recomendable preparar cantidades adecuadas de pintura, ya que, al contener catalizador, esta debe utilizarse en un período de tiempo específico. Este proceso debe repetirse con los tres colores que se aplicarán en la carrocería, ya que todos son de tipo pintura poliéster.



**Figura 3.53** Aplicación del primer color base

Una vez que el color base se encontraba completamente aplicado, se procedió a enmascarar y definir los detalles de la carrocería. En esta instancia, se eligió crear franjas en color rojo y blanco. Fue esencial utilizar cinta de enmascarar (masking) para dar forma al diseño deseado. En este proceso, se tuvo precaución para asegurarse de que ambos lados quedaran simétricos y de que el resultado fuera estéticamente equilibrado a simple vista.



**Figura 3.54** Pintado de las franjas color blanco y rojo

Una vez que las franjas en blanco y rojo estuvieron pintadas, se repitió el proceso de enmascarar para proteger estas áreas antes de aplicar el color más oscuro, en este caso, el negro. Dado que el negro cubría la mayor parte de la superficie, era crucial aplicarlo como

último paso. Para llevar a cabo esta tarea, se requirió desmontar las partes y pintarlas por separado, ya que este color tenía el potencial de esparcirse y manchar otras secciones de la carrocería.



**Figura 3.55** Aplicación del color negro

Una vez que todas las partes de la carrocería fueron pintadas, fue el momento de colocar los logotipos y diseños deseados en la superficie. El último paso de este proceso fue la aplicación del barniz, que tenía como propósito proporcionar brillo a la pintura y también proteger los adhesivos que se habían colocado.

La preparación del barniz siguió un procedimiento similar al de la pintura, pero en este caso, se utilizó una proporción de 3 partes de barniz por cada 1 parte de catalizador. Esto se hizo para que el barniz fuera un poco más denso y proporcionara una mayor protección. Fue importante asegurarse de utilizar la medida apropiada de catalizador, debido a que si se sobrepasa cierta medida este podría afectar tanto a la pintura como a su proceso de secado. La aplicación del barniz se repitió según las necesidades de cada parte a la que se aplicó.

Antes de aplicar el barniz, fue necesario realizar un último lijado, pero esta vez con una lija muy fina. En este caso, se utilizó una lija de agua número 2500, junto con una cantidad generosa de agua, para eliminar cualquier impureza que pudiera estar presente. Una vez que la superficie estuvo completamente seca, se procedió a aplicar el barniz de manera uniforme en toda la carrocería, asegurándose de que cubriera toda su área, ya que, al ser transparente, algunas partes podrían pasar desapercibidas.



**Figura 3.56** Aplicación del barniz

En última instancia, la carrocería se encontraba completamente finalizada y fue ensamblada en sus ubicaciones correspondientes. El último paso que quedaba pendiente era llevar a cabo el pulido de la superficie, pero esto se realizaría después de que hubiera transcurrido un tiempo adecuado para permitir que todo el proceso de pintura se seque completamente. Un dato adicional, muy importante a destacar, es que la carrocería será desmontable debido a que el vehículo necesita mantenimiento, tanto preventivo como correctivo, cada cierto tiempo específico.



**Figura 3.57** Carrocería finalizada

### 3.7. ANÁLISIS DE COSTOS

#### 3.7.1. Costo

Para el proceso de diseño y construcción del prototipo Formula SAE, se tomó en consideración el proceso de fabricación, ya que estos podían variar dependiendo de los procesos que se tomen en consideración hasta llegar al producto final.

#### 3.7.2. Costos directos

Estos gastos están estrechamente vinculados a la obtención de materiales para la ejecución del proyecto en todas sus fases, así como la mano de obra y herramienta utilizada.

En la siguiente tabla se detallan todos los materiales que se utilizaron durante los procesos de manufactura.

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo (USD)
Varilla lisa de 1/4	1	-	55
Tela	3	m	28
Resina poliéster	10	Gal	180
Fibra de vidrio	15	m	120
Estireno	5	Gal	73
Peróxido de mek	1	L	15
Espuma de poliuretano en aerosol	4	-	32
Talco ( $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ )	6	Kg	10
Cobalto	1	Kg	8
Cabosil	1	Kg	10
Carbonato de calcio	2	Kg	15
Dióxido de titanio	2	Kg	18
Masilla plástica gruesa	1	Kg	20
Masilla plástica fina	1	Kg	18
Caja de grapas- pistola	1	-	15
Cera desmoldante	3	-	34
Fondo	3	L	36
Pintura poliéster	5	L	50
Barniz poliéster	3	L	24

Lijas	4	-	5
Envases plásticos	5	-	7,50
Thinner 680	2	Gal	6
Rodillo plástico	2	-	12
Brocha manual	2	-	15
Discos de corte	2	-	5
<b>Total</b>			811,5

Los costos de mano de obra se estimaron mediante los procedimientos que se llevaron a cabo a lo largo de todo el proceso de construcción.

<b>Descripción</b>	<b>Costo por hora</b>	<b>Hora</b>	<b>Costo (USD)</b>
Compresor para pintar	2,00	12	24
Pistola de (gravedad)	1,00	10	10
Pistola para grapas	0,25	2	0,50
Amoladora	0,50	4	2
Mano de obra	8	80	600
<b>Total</b>			636,5

### 3.7.3. Costos indirectos

No estuvieron involucrados de manera directa en el proceso de fabricación de la carrocería, pero se encontraron incorporados indirectamente en todo el proceso de creación de la misma.

<b>Descripción</b>	<b>Costo (USD)</b>
Movilización	80
Imprevistos	50
Impresiones	25
<b>Total</b>	155

### 3.7.4. Costo total

En el costo total estuvieron involucrados todos los valores que fueron necesarios de implementar para todo el proceso de manufactura de la carrocería, desde su inicio hasta la total culminación de la creación de la carrocería para el prototipo Formula SAE.

<b>Costos directos</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Costo (USD)</b>
Materiales	811.5
Equipos y herramientas	636.5
Mano de obra	600
<b>Costos indirectos</b>	
Total de costos indirectos	155
<b>TOTAL</b>	<b>2202</b>

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DEL PROTOTIPO

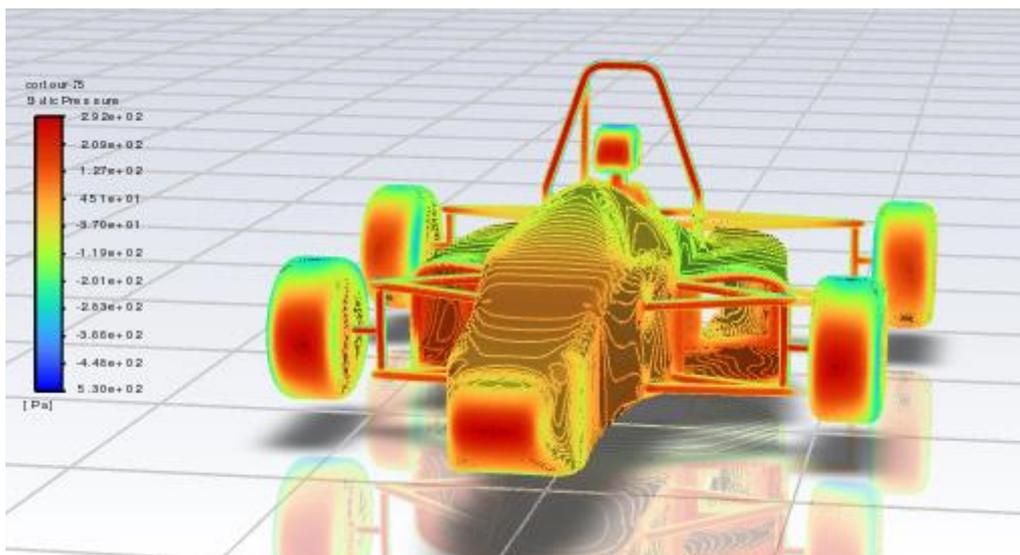
La interpretación de resultados es de primordial consideración, ya que revela datos importantes con respecto al comportamiento aerodinámico en la carrocería al momento de aplicar esfuerzos máximos en la misma. Además, permite entender la eficacia del producto.

Como se mencionó con anterioridad, para realizar el análisis de resultados se usarán perfiles proyectados con vistas en tres dimensiones y múltiples colores, como también una cantidad numérica. Los aspectos a mostrar son: presión estática, presión dinámica, velocidad, intensidad de turbulencia y trayectos de flujo, que son útiles para determinar si es uniforme o desordenado.

##### 4.1.1. Análisis de Presión

En la figura 4.1 se aprecia que existe una elevada presión en varias partes del vehículo, específicamente en la nariz, los neumáticos, en las entradas de los pontones, casco del conductor y en el arco principal del bastidor, hay significativa presión en dichas superficies, ya que son las que entran en contacto directo con el fluido. Estos puntos de estancamiento o de máxima presión podrían ser excluidos a través de la incorporación de alerones en los neumáticos. En el caso del casco del piloto, es más complicado, pero se podría construir un diseño que conduzca el flujo de aire por arriba de él. No obstante, en el caso de la nariz, esta solución resulta bastante limitada en competiciones tipo Formula SAE, dado que, a diferencia de los vehículos de Fórmula 1, no se permite la presencia de una apertura en la nariz para erradicar el lugar de máxima presión, teniendo en consideración que en el reglamento de la FSAE prohíben explícitamente cualquier apertura que vaya desde la parte frontal hasta el habitáculo del piloto.

Desde una perspectiva aerodinámica, resulta más beneficioso minimizar al máximo la presencia de puntos de estancamiento. Cuantos más puntos de estancamiento existan, más alto será el diferencial de presión entre la parte de atrás y frontal del prototipo, lo que da como resultado un incremento de la fuerza de arrastre por presión.

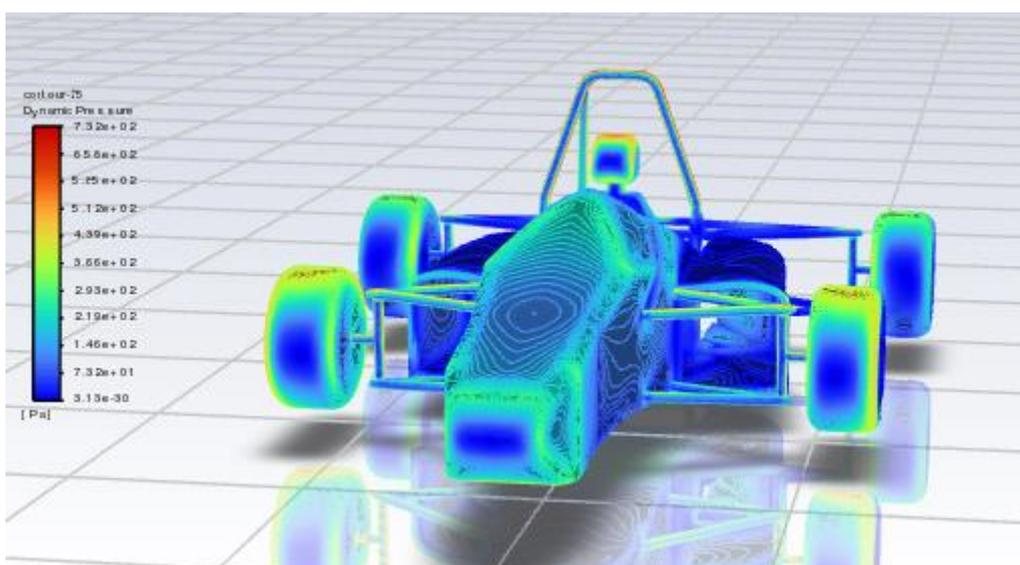


**Figura 4.1** Presión estática medida en Pascales [Pa]

#### 4.1.2. Análisis de la Presión Dinámica

Esta presión es producida tanto por la velocidad de un fluido como por una masa de aire en movimiento, teniendo en consideración que la velocidad puede llegar a ser cero ya que existe una obstrucción de una línea de corriente de flujo.

En la figura 4.2, se mira que los resultados de las presiones en toda la carrocería varían según la velocidad del fluido, alcanzando una mínima presión dinámica en determinados puntos, lo que favorece a una cómoda circulación del flujo por las diferentes caras o capas de la carrocería.

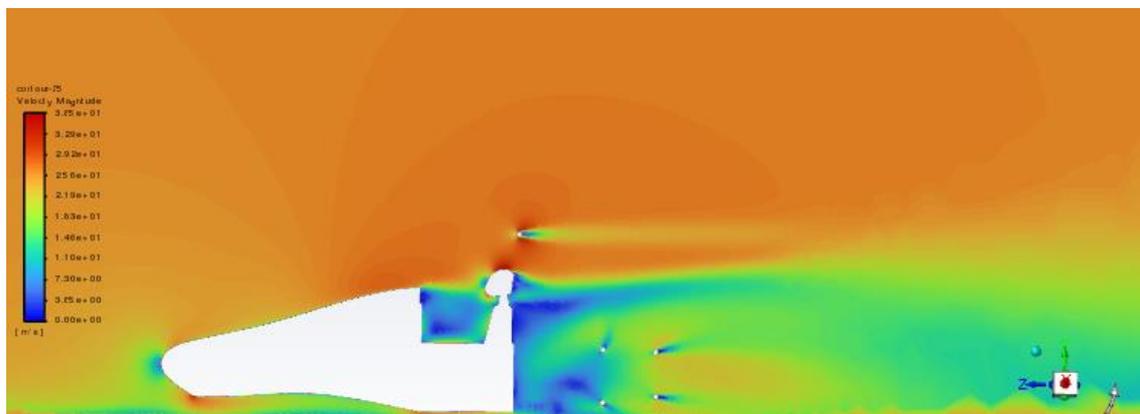


**Figura 4.2** Presión dinámica medida en Pascales [Pa]

### 4.1.3. Análisis de Velocidades

En la figura 4.3 se muestra la velocidad y el proceder del movimiento del fluido. Se conoce que la velocidad del aire se vuelve cero cuando esta impacta con una superficie perpendicular, por lo tanto, se cumple el principio de Bernoulli, el cual manifiesta que a menor velocidad existe una mayor presión. En la parte frontal, como lo es la nariz, los neumáticos y la entrada de los pontones, la velocidad se reduce, sin embargo, existe un aumento de la presión en dichos sitios. Las regiones de baja velocidad que se forman por atrás de la trompa del vehículo se relacionan directamente con la configuración de la geometría del mismo.

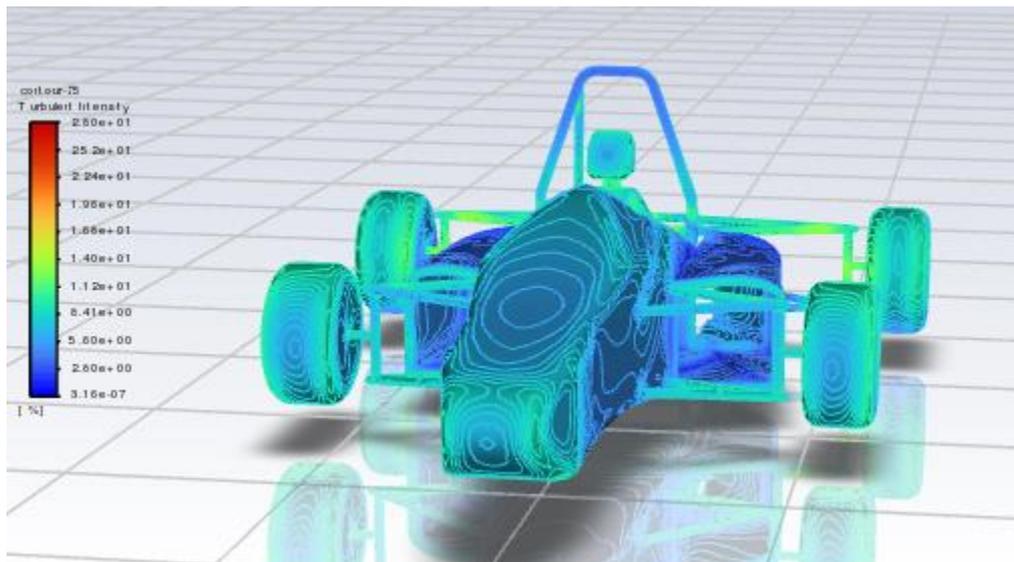
También se puede apreciar cómo cambia la velocidad en el plano medio del automóvil, a su vez, en la parte de la nariz, es muy notorio que la velocidad disminuye en el sitio de estancamiento o de alta presión. Sería más oportuno si la velocidad incrementará por debajo del prototipo para generar downforce o fuerza de sustentación negativa, esto se puede lograr a través de la incorporación de difusores, alerones y un fondo plano bien diseñado que genere una zona de baja presión.



**Figura 4.3** Velocidad plano medio medida en [m/s]

### 4.1.4. Análisis de Turbulencia

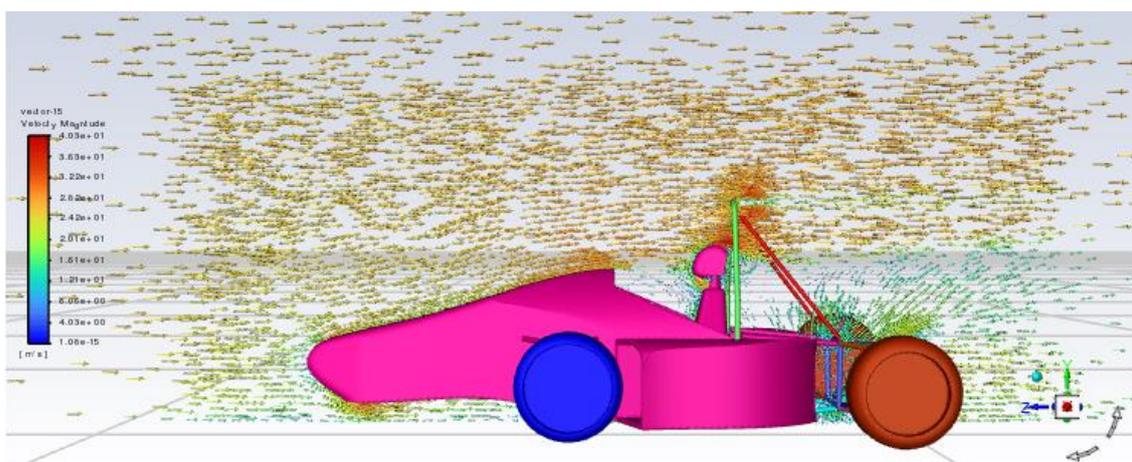
El estudio de turbulencia involucra el desordenamiento de flujo de aire, lo que significa que las trayectorias de las partículas crean pequeños remolinos, que regularmente se forman en las regiones bajas, como son en la parte posterior del vehículo y en las secciones de las ruedas. Haciendo un análisis definitivamente de la carrocería, se aprecia en la figura 4.4 un índice bajo de turbulencias, lo cual es beneficioso porque no crea una fuerza de sustentación positiva muy alta que incite a desestabilizar al prototipo.



**Figura 4.4** Turbulencia en Porcentajes

#### 4.1.5. Trayectorias de Fluido

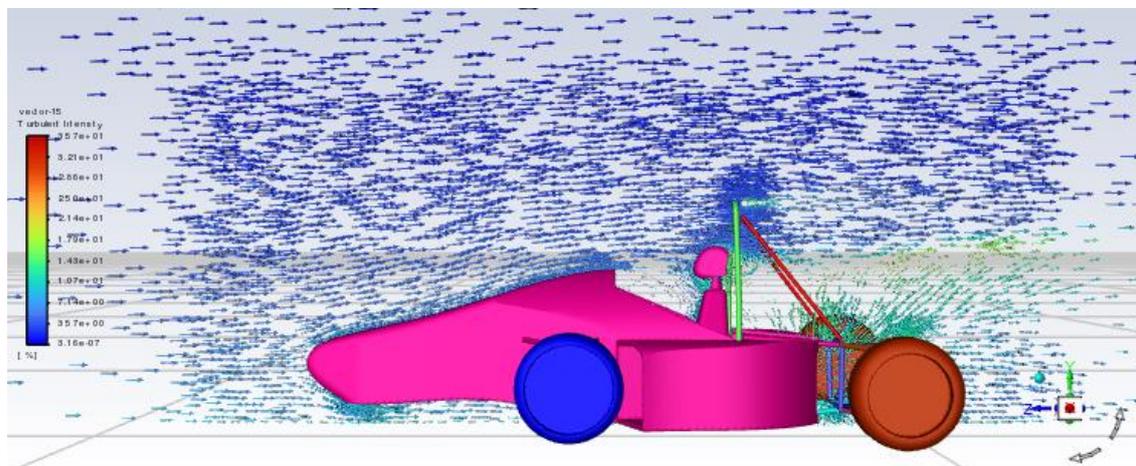
En la figura 4.5 se visualiza que, en la parte frontal, el flujo de aire que choca directamente con el prototipo FSAE tiene una velocidad mínima, mientras que el aire que es redirigido hacia la parte inferior y superior de la carrocería aumenta consecutivamente su velocidad, cumpliéndose así el principio de Bernoulli. El flujo de velocidad con respecto a la carrocería indica que las partículas de aire no pierden el orden al instante de desplazarse en cada una de las trayectorias, concluyendo que la velocidad del fluido sigue su recorrido sin crear vórtices que pretendan elevar la carrocería influyendo desfavorablemente a la estabilidad del prototipo.



**Figura 4.5** Vectores de Velocidad

Por otro lado, se mira que, en los vectores de turbulencia, las partículas de aire avanzan sin obstáculos en cada trayectoria de flujo. Por lo tanto, se puede apreciar un mínimo efecto de

turbulencia en la cabina del piloto y en la parte posterior del vehículo, por tal motivo, es de baja consideración y, por ende, no conduce a un inconveniente grave.



**Figura 4.6** Vectores de Turbulencia

## 4.2. ANÁLISIS Y CÁLCULOS AERODINÁMICOS

Para este estudio, se debe realizar cálculos de diversas variables, incluida, el área de la sección transversal del vehículo tipo formula SAE, la cual es el área frontal del mismo, y las fuerzas aerodinámicas resultantes, tomando en cuenta que la velocidad del fluido y la densidad del aire son datos obtenidos de análisis desarrollados previamente. A su vez, las fuerzas de arrastre y sustentación fueron calculadas mediante el software de elementos finitos.

### 4.2.1. Resultados de fuerza de arrastre y fuerza de sustentación

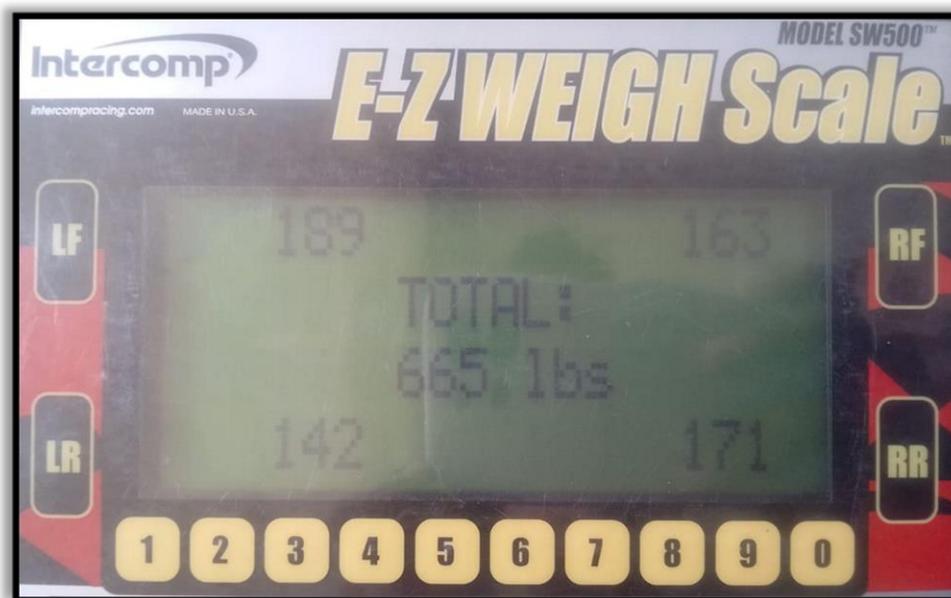
	Drag	[N]
-----		
	fuerza-arrastre	110.46662
	Lift	[N]
-----		
	fuerza-sustentacion	48.392677

**Figura 4.7** Fuerzas de arrastre y sustentación

En la figura 4.7 se aprecia los resultados de las dos fuerzas aerodinámicas que se producen en las distintas paredes del prototipo a una velocidad de 27.77 m/s, que dan como resultado una fuerza de arrastre de 110.47 N y una fuerza de sustentación positiva de 48.39 N. Ambas fuerzas son indispensables para la estimación de los coeficientes aerodinámicos.

Una fuerza de sustentación positiva indica que no se produce una fuerza aerodinámica hacia abajo que presione al prototipo en dirección al pavimento. Además, la fuerza de sustentación

positiva no es un problema tan relevante, ya que la fuerza que se crea es de tan solo 4.93 kg (10.87 lb); considerando que el peso total del vehículo incluido la carrocería es de 665 libras (la carrocería por sí sola pesa 65 lb), por tal motivo, la fuerza no afectará directamente a la estabilidad del mismo.



**Figura 4.8** Peso total del vehículo incluido la carrocería

La fuerza de sustentación no se toma en cuenta, debido a que el diseño de la carrocería se enfoca directamente en poseer la menor fuerza de arrastre que sea posible, en virtud de que la configuración aerodinámica no incorpora dispositivos como difusores y alerones destinados a generar fuerza de sustentación negativa o downforce.

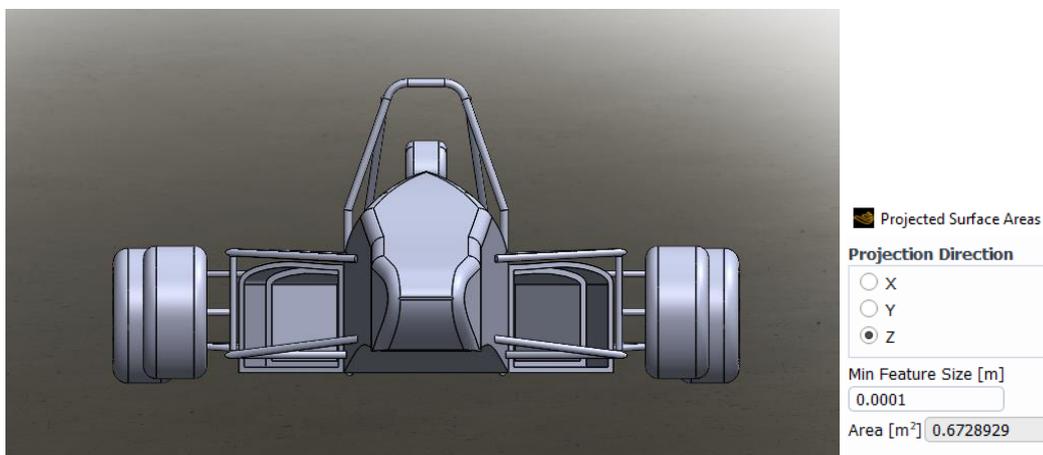
#### 4.2.2. Área transversal del vehículo tipo formula SAE

Cuando nos referimos al área, estamos hablando del área particular de un cuerpo. Por lo general, se considera el área transversal como el área frontal o característica, debido a que es la superficie que primero entra en contacto con el fluido. No obstante, en objetos con formas específicas, como por ejemplo dirigibles o vagones de trenes, se usa el área de la superficie en su lugar. El uso del área transversal implica el arrastre de presión, en tanto que el uso del área de la superficie implica el arrastre de fricción.

Para encontrar el área frontal del prototipo, se utilizó el software ANSYS 2022 R1, en donde en la opción de “áreas proyectadas”, se selecciona todas las caras del vehículo y la dirección del flujo, que en dicho caso es sobre el eje “z” negativo. Considerando que el tamaño mínimo

característico fue de 0.0001, debido a que con dicho parámetro el área converge hacia un solo valor en particular. El resultado del área que se obtuvo es el siguiente:

$$\text{Área frontal total} = 0,67 \text{ m}^2$$



**Figura 4.9** Área frontal del prototipo

#### 4.2.3. Número de Reynolds

Antes de proceder con el cálculo del número de Reynolds, debemos encontrar primeramente la densidad del aire en la ciudad de Ibarra a una temperatura de 18 °C con una presión atmosférica de 75993.75 Pascales (0.75 atm).

$$\rho = \frac{P}{R * T}$$

$$\rho = \frac{75993.75 \text{ Pa}}{287.05 \frac{\text{J}}{\text{kg} * \text{K}} * 291.15 \text{ K}}$$

$$\rho = 0.9093 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

A continuación, se comienza a encontrar definitivamente Reynolds:

$$Re = \frac{\rho * V * L}{\mu}$$

$$Re = \frac{0.9093 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 27.77 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 3.18 \text{ m}}{1.8158 \times 10^{-5} \text{ Pa} * \text{s}}$$

$$Re = 4.4222 \times 10^6 \quad \text{Flujo Turbulento}$$

#### 4.2.4. Número de Mach

$$Ma = \frac{V}{c}$$

$$c = \sqrt{K * R * T}$$

$$Ma = \frac{V}{\sqrt{K * R * T}}$$

$$Ma = \frac{27.77 \frac{m}{s}}{\sqrt{1.4 * 287.05 \frac{J}{kg * K} * 291.15 K}}$$

$$Ma = 0.0812$$

$$0.0812 \leq 0.3 \quad \text{Flujo incompresible}$$

#### 4.2.5. Coeficiente de Sustentación

Para realizar los cálculos y análisis, se emplean los datos de las fuerzas presentadas en la figura 4.7, así como el área frontal del vehículo indicada anteriormente.

$$Fz = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * Cz * Af$$

$$48.39 N = \frac{1}{2} * 0.9093 \frac{kg}{m^3} * 27.77^2 \frac{m^2}{seg^2} * Cz * 0.67 m^2$$

$$Cz = \frac{48.39 N}{0.5 * 0.9093 \frac{kg}{m^3} * 27.77^2 \frac{m^2}{seg^2} * 0.67 m^2}$$

$$Cz = 0.2$$

Se obtuvo un coeficiente de sustentación (Cz) de 0.2 con una velocidad de 27.77 m/s, una masa volumétrica del aire de la ciudad de Ibarra y una temperatura de 18 °C. A través de las distintas geometrías implementadas en la carrocería tipo SAE, se logró alcanzar un coeficiente de sustentación bajo.

#### 4.2.6. Coeficiente de arrastre

$$Fx = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * Cx * Af$$

$$110.47 N = \frac{1}{2} * 0.9093 \frac{kg}{m^3} * 27.77^2 \frac{m^2}{seg^2} * Cx * 0.67 m^2$$

$$C_x = \frac{110.47 \text{ N}}{0.5 * 0.9093 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 27.77^2 \frac{\text{m}^2}{\text{seg}^2} * 0.67 \text{ m}^2}$$

$$C_x = 0.47$$

El resultado obtenido del coeficiente de arrastre ( $C_x$ ) es de 0.47, el cual es considerado aceptable debido a que en el análisis planteado los cálculos se efectuaron directamente a todo el vehículo y no solo a la carrocería. A su vez, se corrobora que el diseño del modelo tiene la capacidad para vencer la fuerza de resistencia al avance.

#### 4.2.7. Cálculo de la Potencia necesaria para vencer la fuerza de arrastre

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

$$P = \frac{1}{2} * 0.47 * 0.67 \text{ m}^2 * 0.9093 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 27.77^3 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}^3}$$

$$P = 3066.04 \text{ W} ; P = 4.11 \text{ Hp}$$

Se requiere una potencia de 4.11 Hp para atravesar el fluido con una velocidad de 100 km/h, considerando la densidad del aire determinada en la ciudad de Ibarra a 18 °C. La deducción de los resultados, el estudio y los cálculos realizados validan el diseño de la carrocería para su fabricación, ya que cumple con los requisitos aerodinámicos necesarios para un desempeño adecuado.

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

- Se identificaron diversos materiales empleados en la fabricación de carrocerías tipo FSAE, siendo los principales el aluminio, la fibra de carbono y la fibra de vidrio. La elección del material se basó en factores como la resistencia mecánica adecuada, facilidad de manejo, disponibilidad local y menor costo, lo que hace que la fibra de vidrio sea preferible en comparación con la fibra de carbono. Esta última requiere maquinaria especializada, lo que implica costos significativos y tiene limitaciones en cuanto a su disponibilidad en nuestro entorno.
- El uso del software CAD SolidWorks permitió crear un diseño preciso y personalizado de la carrocería que se ajustó a las necesidades específicas del vehículo y a las normativas de la competencia Formula Student. Por tal motivo, se obtuvo un diseño adecuado y óptimo para el análisis.
- A través de los análisis realizados en el módulo de Ansys Fluent with Fluent Meshing 2022 R1, las geometrías del diseño produjeron predominantemente trayectorias de flujo uniforme, que ayudan a conservar la estabilidad del prototipo, asegurando un comportamiento aerodinámico satisfactorio con coeficientes aceptables, con valores de  $C_l = 0.20$ ;  $C_d = 0.47$  y requiriendo una potencia leve de 4.11 Hp para superar la resistencia al avance a una velocidad de 100 km/h.
- La velocidad del aire se vuelve cero cuando impacta con una superficie perpendicular, lo que indica que se cumple el principio de Bernoulli, el cual afirma que a menor velocidad existe una mayor presión. A su vez, en la parte frontal, como la nariz, los neumáticos, casco del conductor, arco principal del bastidor y la entrada de los pontones, la velocidad del aire se reduce, generando un aumento de la presión en esos puntos. Estos hallazgos fueron importantes para entender la dinámica del flujo de aire en torno a objetos en movimiento y su influencia en la resistencia aerodinámica.

## 5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que para posteriores diseños de prototipos Formula Student, se investiguen nuevos materiales que sean de origen local como son fibras de cabuya, sisal, totora, coco, abacá, yute, palmas, paja de arroz y trigo, entre otros. Estas investigaciones podrían resultar en un material compuesto que imite las cualidades físicas de las fibras de vidrio y carbono a un menor costo.
- Utilizar un ordenador con alta capacidad de memoria RAM y un mayor número de núcleos o procesadores para mejorar el rendimiento del software CAD, permitiendo la creación de modelos más complejos y el trabajo en ensamblajes más grandes sin que el software se vuelva lento o poco receptivo. En el caso del software CFD, se lograría reducir el tiempo de ejecución y mejorar la precisión en los resultados de la simulación.
- Para una validación más precisa de los datos de distintos modelos de prototipos, se puede efectuar el estudio utilizando túneles de viento estáticos y de tipo dinamométrico a escala. Esto proporciona un conjunto de datos más grande, lo que facilita una comparación más a fondo de los resultados obtenidos por el software CFD, permitiendo establecer conclusiones con datos más exactos y concretos, que ayudan a mejorar la interpretación aerodinámica de la carrocería y la eficacia de la geometría del prototipo.
- Diseñar un nuevo prototipo que emplee fibra de carbono, con el propósito de minimizar el peso total del prototipo, ya que esto impacta significativamente en su rendimiento en pista.
- Implementar dispositivos aerodinámicos, como difusores y alerones, para mejorar la adherencia de los neumáticos a la calzada y lograr una mayor estabilidad del vehículo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcaraz, D. J. (2007). *Carbono Y Aramida , del concepto a la producción*. Interempresas.  
<https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/17156-Carbono-y-Aramida-del-concepto-a-la-produccion.html>
- Alegre, J. (2022). *Análisis CFD de la influencia de la aerodinámica en el consumo energético de vehículos en formación*. 1–71. <http://hdl.handle.net/10251/183892>
- Aluvirefor. (2019). *¿Por qué eligimos aluminio?* <https://www.aluvirefor.es/blog/por-que-eligimos-aluminio/>
- ANSYS. (2015). *Mesh Quality And Advenced Topics Ansys Workbench 16.0*. Ansys.  
[https://www.academia.edu/16970000/MESH\\_QUALITY\\_AND\\_ADVENCED\\_TOPICS\\_ANSYS\\_WORKBENCH\\_16\\_0](https://www.academia.edu/16970000/MESH_QUALITY_AND_ADVENCED_TOPICS_ANSYS_WORKBENCH_16_0)
- ANSYS. (2018). *ANSYS Fluent Mosaic Technology Automatically Combines Disparate Meshes with Polyhedral Elements for Fast, Accurate Flow Resolution*.  
<http://simutechgroup.com/wp-content/uploads/2020/09/ANSYS-Fluent-Mosaic-Technology-Automatically-Combines-Disparate-Meshes-with-Polyhedral-Elements-for-Fast-Accurate-Flow-Resolution-White-Paper.pdf>
- Bautista Bravo, C. G., & Mena Izurieta, P. I. (2018). *INVESTIGACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS CON FIBRA NATURAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA CARROCERÍA DEL VEHÍCULO DE COMPETICIÓN FÓRMULA STUDENT [UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE]*.  
<http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/14956>
- Bayas, C. M., & Rosero, D. R. (2015). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CARROCERÍA DE UN VEHÍCULO DE COMPETENCIA FÓRMULA “SAE” EN FIBRA DE VIDRIO, PARA LA ESCUELA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ [ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO]*.  
<http://dspace.espech.edu.ec/handle/123456789/4421>
- Caiza, V. F., & Vilaña, J. P. (2015). *DISEÑO, SIMULACIÓN, OPTIMIZACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CARROCERÍA DE UN VEHÍCULO TIPO FORMULA SAE [UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE]*.  
<http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/9415>

- Carenzo, S., Peralta, I., Storti, B., & Albanesi, A. (2013). Diseño Y Optimización Aerodinámica De Un Veículo Solar. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, XXXII, 2391–2404. <https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/4493>
- CARMAN GRUPO. (2014). *Fórmula sae* 26. <https://grupocarman.com/blog/2014/05/26/formula-sae/>
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones. In *McGraw Hill* (Primera Ed). <https://www.udocz.com/apuntes/51530/mecanica-de-fluidos-fundamentos-y-aplicaciones-yunus-cengel-y-john-cimbala-primera-edicion>
- Cumbe, E. S., & Rockwood, R. E. (2009). *Simulación Aerodinámica de un Vehículo Toyota Corolla 2005 en un Programa de Dinámica de Fluidos Computacional -CFD-* [Universidad del Azuay]. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/4103>
- Díaz, J. (2013). *POR QUÉ CORREN TANTO LOS F1: EFECTO SUELO*. Blogspot Angeles En La Cabeza. <http://angelesenlacabeza.blogspot.com/2012/12/tuneles-de-viento-como-trabajan.html>
- Fernández, J. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por método de volúmenes finitos* (1er edición). Reverté.
- Fernández, M. (2019). *La capa límite*. AERODINÁMICA F1. <https://www.aerodinamicaf1.com/2019/09/la-capa-limite/>
- Fernández, M. (2019). *La simulación CFD en la Fórmula 1*. AERODINÁMICA F1. <https://www.aerodinamicaf1.com/2019/11/la-simulacion-cfd-en-la-formula-1/>
- Fernández, M. (2019). *Las fuerzas sobre el monoplaça, drag y lift (o downforce)*. Aerodinámica F1. <https://www.aerodinamicaf1.com/2019/09/las-fuerzas-sobre-el-monoplaza-drag-y-lift-o-downforce/>
- Fernández, M. (2020). *Formula Student - Mi experiencia (I): Diseño*. AERODINÁMICA F1. <https://www.aerodinamicaf1.com/2020/03/formula-student-mi-experiencia-i-etapa-de-diseno/>
- Fernández, M. (2020). *Los coeficientes aerodinámicos - ¿Cómo se calculan? -*

- Aerodinámica F1*. Aerodinámica F1. <https://www.aerodinamicaf1.com/2020/08/los-coeficientes-aerodinamicos-como-se-calculan/>
- Gherardelli, C. (2007). *En Introducción a la Mecánica de Fluidos* (pp. 116–131). U. Chile.
- Granda, L. D., & Tapia, E. R. (2018). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CARROCERIA DE UN VEHÍCULO DE COMPETENCIA FORMULA SAE ELÉCTRICO* [UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15150>
- Martínez, L. (2020). *Es 2020 y todavía no entendemos del todo por qué los aviones se mantienen en el aire*. Xataka. <https://www.xataka.com/vehiculos/2020-todavia-no-entendemos-todo-que-aviones-se-mantienen-aire>
- McBeath, S. (2011). *Competition Car Aerodynamics: A Practical Handbook*.
- Mexpolimeros. (2014). *Aplicaciones de plásticos*. <https://www.mexpolimeros.com/app/aplicaciones.html>
- Molina, I. R., & Vilaña, D. A. (2018). *SIMULACIÓN NUMÉRICA DE CONTACTO ENTRE SUPERFICIES CON MOVIMIENTO RELATIVO PARA PREDICCIÓN DE DESGASTE EN COJINETES DE FRICCIÓN DE ALEACIÓN DE ALUMINIO* [ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19315/1/CD-8684.pdf>
- Oezcan, M. (2020). *How to Check Convergence of a CFD Simulation?* SimScale. <https://www.simscale.com/knowledge-base/how-to-check-convergence-of-a-cfd-simulation/>
- Paccieri, R. (2020). *¿Qué es la velocidad Mach?* Fenix Aeronáutica. <https://www.fenixaeronautica.com/post/qué-es-la-velocidad-mach>
- Pauta, J. F., & Sánchez, M. L. (2014). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CARROCERIA DE UN VEHICULO DE COMPETENCIA TIPO FORMULA SAE* [UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/7183>
- Perlález, F. (2008). *Fórmula SAE*. [https://www.academia.edu/9573917/Fórmula\\_SAE](https://www.academia.edu/9573917/Fórmula_SAE)
- Richter, P. (2010). *Fibras De Vidrio Termicamente Estables*. Patentados. <https://patentados.com/2010/fibras-de-vidrio-termicamente-estables>

- Rodríguez, A. (2014). *Análisis Técnico – Principio de Bernoulli – Efecto Venturi*. AlbrodpulF1. <https://albrodpulf1.wordpress.com/2014/10/27/analisis-tecnico-principio-de-bernoulli-efecto-venturi/>
- Rodríguez, C. (2014). *ESTUDIO DE LA AERODINÁMICA DE UN VEHÍCULO*. Technical Courses. [http://www.technicalcourses.net/portal/es/blog/blog\\_entrada.php?entrada\\_id=89](http://www.technicalcourses.net/portal/es/blog/blog_entrada.php?entrada_id=89)
- Ruiz, G. (2023). *Cuál es la densidad del aire y cómo se calcula*. Espacio Ciencia. <https://ciencia.espanadiario.tips/fisica/cual-densidad-del-aire>
- SAE International. (2023). *FORMULA SAE Rules 2023* (pp. 1–139). <https://www.fsaeonline.com/cdsweb/app/NewsItem.aspx?NewsItemID=1c091549-b1b2-4562-9967-c62ec531ac04>
- Sánchez, J. (2004). *Dinámica de fluidos computacional (CFD)*. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/3718/fichero/Parte+I%252FCapitulo+3.pdf>
- Sanguinetti, E. (2020). *Ley de la viscosidad de Newton: ecuación fundamental y explicación*. Caloryfrio. [https://www.caloryfrio.com/calefaccion/calefaccion-instalaciones-componentes/ley-de-la-viscosidad-de-newton-ecuacion-fundamental-y-explicacion.html#:~:text=t%3D F%2FA %3D μ \(dv%2Fdy\)&text=Algunas veces la denominan viscosidad,cambios en el esfuerzo cortan](https://www.caloryfrio.com/calefaccion/calefaccion-instalaciones-componentes/ley-de-la-viscosidad-de-newton-ecuacion-fundamental-y-explicacion.html#:~:text=t%3D F%2FA %3D μ (dv%2Fdy)&text=Algunas veces la denominan viscosidad,cambios en el esfuerzo cortan)
- Secretaría Nacional de Planificación. (2021). Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025. In *Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025* (pp. 1–122). <https://observatorioplanificacion.cepal.org/es/planes/plan-de-creacion-de-oportunidades-2021-2025-de-ecuador>
- Skybrary. (2021). *Bernoulli's Principle*. <https://skybrary.aero/articles/bernoullis-principle#:~:text=Description,in the fluid's potential energy.>
- Somerfield, M. (2021). *Por qué el fondo plano en la F1 2021 puede cambiarlo todo*. <https://es.motorsport.com/f1/news/fondo-plano-f1-2021-cambios/4939529/>
- Sosnowski, M., Krzywanski, J., Grabowska, K., & Gnatowska, R. (2018). Polyhedral meshing in numerical analysis of conjugate heat transfer. *EPJ Web of Conferences*, 180,

- 1–6. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201817002096>
- Truzonef1. (2012). *El difusor*. Wordpress. <https://truzonef1.wordpress.com/el-difusor/>
- Ueyama, A. (2019). *Basic Course of Thermo-Fluid Analysis 12: Chapter 5 Basics of thermo-fluid analyses - 5.1 Fundamental equations and discretization*. <https://www.cradle-cfd.com/media/column/a76>
- Valencia, C. J. (2017). *DISEÑO POR ELEMENTOS FINITOS DE UNA ROTO BOMBA ACCIONADA CON UNA TURBINA PELTON PARA RIEGO DE CULTIVOS EN LOS SECTORES VULNERABLES* [UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO]. <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/26801>
- Xáman, J., & Gijón, M. (2016). *DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL PARA INGENIEROS*. Palibrio. <https://books.google.cl/books?id=dwIDDAAAQBAJ&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>
- Zapata, F. (2021). *Teorema de Bernoulli*. Lifeder. <https://www.lifeder.com/teorema-bernoulli/>
- Zore, K., Sasanapuri, B., Parkhi, G., & Varghese, A. (2019). Ansys mosaic poly-hexcore mesh for high-lift aircraft configuration. *21st Annual CFD Symposium, September*, 1–11. <https://www.researchgate.net/publication/335789150%0AANSYS>

## ANEXOS

### ANEXO I



**Figura 1** Molde base de la carrocería

### ANEXO II



**Figura 2** Aplicación de la fibra de vidrio

### ANEXO III



**Figura 3** Masillado de toda la carrocería

### ANEXO IV



**Figura 4** Lijado suave para un mejor acabado

## ANEXO V



**Figura 5** Aplicación del primer color base

## ANEXO VI



**Figura 6** Pintado de las franjas de color rojo y blanco

## ANEXO VII



Figura 7 Carrocería terminada

## ANEXO VIII

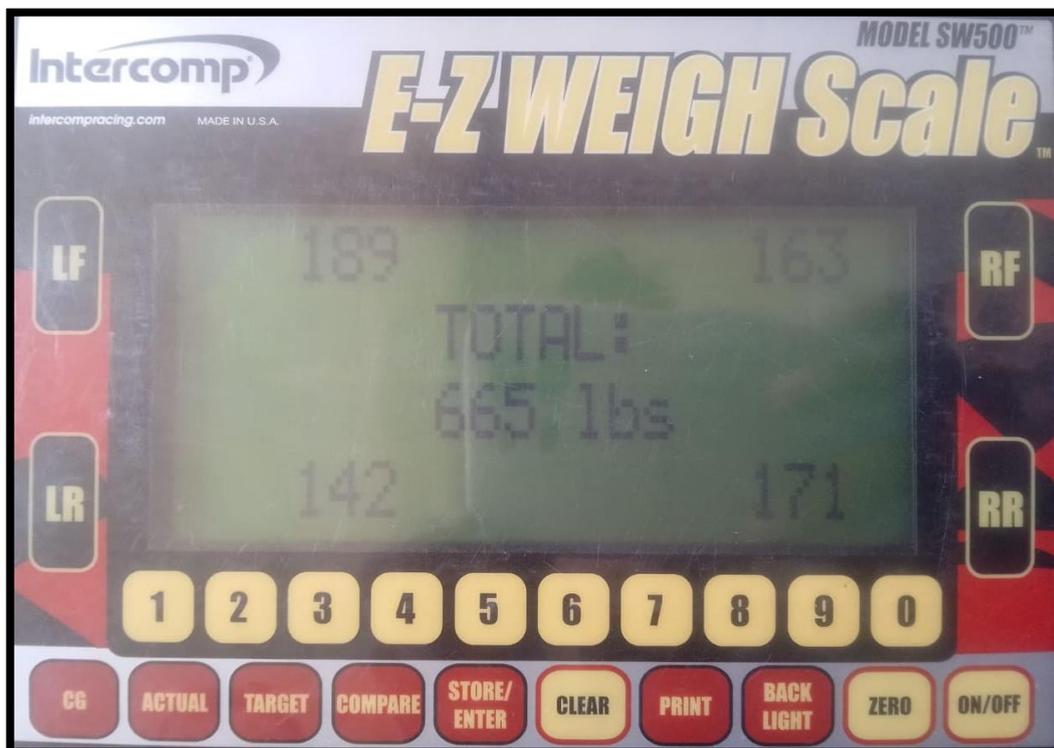
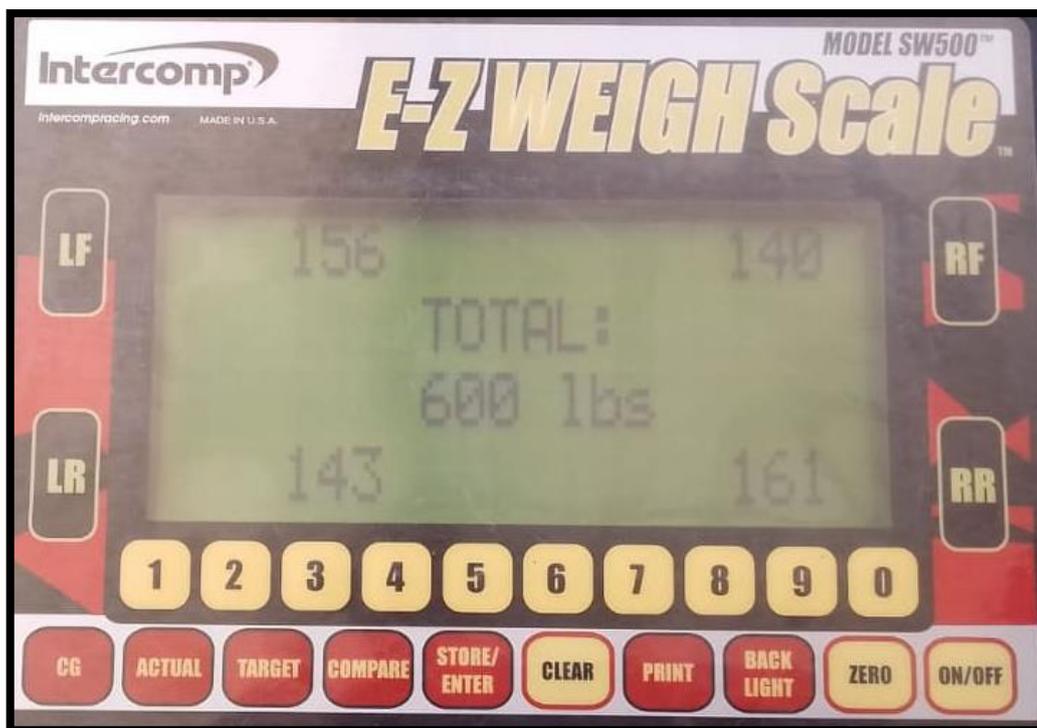


Figura 8 Peso total del vehículo con la carrocería

## ANEXO IX



**Figura 9** Peso total del vehículo sin la carrocería