



**Universidad Nacional Autónoma de México**

---

**Facultad de ingeniería**

**Análisis del diseño de la carrocería de un coche  
tipo Formula**

**T E S I S**

Que para obtener el título de:

**Ingeniero mecánico**

Presenta:

**Julio César Pérez Aguilar**

Asesor:

**Dr. William Vicente Y Rodríguez**



México, D.F.

2015

## Agradecimientos

Gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México por crear una comunidad conformada por personas que me hacen elevar mis estándares. Especialmente a la Facultad de ingeniería, a su directivos y a su profesorado quienes me acompañaron a lo largo de mi carrera universitaria y quienes además me guiaron no solo técnicamente sino personalmente. Gracias al Ingeniero Mariano García del Gállego por seguir siendo el consejero del equipo Formula SAE de la UNAM quien siempre apoyó al equipo.

Gracias a mis compañeros del equipo UNAM motorsports quienes me enseñaron lo que significa el trabajo en equipo, sacrificio, constancia y amistad. Gracias a todos con quien tuve contacto a lo largo de mi carrera universitaria puesto que cada uno de ellos aportó algo a mi formación.

Gracias a toda mi familia por siempre brindarme algún tipo de apoyo. Gracias a mis padres Jacqueline y César quienes siempre me apoyaron en todos los aspectos. Es muy cierto que sin ellos no habría podido realizar todo lo que me he propuesto. Agradezco también a mis hermanas, Astrid y Jacqueline, quienes por las buenas y las malas han sido una gran motivación para seguir realizando cosas grandiosas.

Gracias a la compañía CD-adapco y a todo su equipo por haber proporcionado el programa con el cual todo este trabajo fue posible. Gracias por la asesoría y por la confianza.

Gracias a RAE porque de una forma u otra ayudó a todos mis proyectos.

“Yo me niego a reconocer la existencia de imposibilidades”

—Henry Ford

## Índice

<b>Capítulo 1 Introducción</b> .....	1
1.1 Objetivos .....	1
1.1.1 Objetivo General .....	1
1.1.2 Objetivos Particulares .....	1
1.2 Hipótesis .....	1
1.3 Antecedentes .....	2
1.3.1 Historia de la aerodinámica .....	2
1.3.2 Fundamentos de la aerodinámica .....	4
1.3.3 Variables básicas de la aerodinámica .....	4
1.3.4 Fuerzas y momentos aerodinámicos .....	6
1.3.5 Centro de presiones .....	10
1.3.6 Número de Reynolds .....	12
<b>Capítulo 2 Flujo Incompresible y viscoso</b> .....	14
2.1 Compresibilidad .....	14
2.2 Viscosidad .....	14
2.3 Coeficientes aerodinámicos .....	15
2.3.1 Coeficiente de arrastre .....	16
2.3.2 Coeficiente de sustentación .....	20
2.3.3 Coeficiente de presión .....	23
2.4 Ecuación de Bernoulli .....	23
<b>Capítulo 3 Aerodinámica en coches de carreras</b> .....	27
3.1 Distribución de presiones en un coche .....	28
3.2 Estela .....	30
3.3 Relación de las llantas con la aerodinámica .....	32
3.4 Fuerza de sustentación negativa .....	35
3.5 Efecto de vientos laterales .....	41
3.6 Centro de presiones .....	42
<b>Capítulo 4 Metodología práctica para un análisis de fluidos computacionales (CFD)</b> .....	46
4.1 Pasos para resolver un problema utilizando fluidos computacionales .....	47
4.1.1 Modelado de la geometría .....	47

4.1.2 Generación del mallado .....	48
4.1.3 Definir Modelos.....	50
4.1.4 Establecer propiedades.....	50
4.1.5 Establecer condiciones iniciales y de frontera .....	50
4.1.6 Resolver .....	50
4.2 Tipo de Flujo .....	50
4.2.1 Flujo laminar.....	51
4.2.2 Flujo turbulento.....	51
4.2.3 Flujo monofásico .....	52
4.2.4 Flujo multifásico .....	52
4.3 El mallado .....	52
4.4 Establecimiento de los modelos de turbulencia .....	54
4.4.1 Características de un flujo turbulento.....	54
4.4.2 Modelado de la turbulencia .....	56
4.4.3 Modelo k- $\omega$ .....	58
<b>Capítulo 5 Estrategia para el CFD utilizado para una competencia Formula SAE .....</b>	<b>59</b>
5.1 Competencia Formula SAE y reglamento del sistema .....	59
5.2 Reglas para el sistema de aerodinámica en la competencia .....	61
5.3 Simulación Base CFD .....	66
1.- Importación del modelo.....	66
2.- Asignar regiones.....	67
3.- Definir propiedades del mallado.....	67
4.- Definir propiedades del medio .....	68
5.- Obtener la solución y analizar los resultados.....	69
5.4 Características de la simulación .....	70
<b>Capítulo 6 Análisis carrocería temporada 2013.....</b>	<b>71</b>
6.1 Primer Año California 2010 .....	71
6.2 Segundo Año California 2011 .....	71
6.3 Tercer Año Nebraska 2012 .....	73
6.4 Cuarto año: Etapa de Diseño 2013.....	75
6.5 Diseño Final 2013 .....	93
<b>Capítulo 7 diseño carrocería temporada 2014 .....</b>	<b>106</b>

7.1 Proceso de Integración.....	108
7.2 Quinto Año: Etapa de Diseño 2014 .....	109
7.2.1 Calidad de dibujo (CAD) .....	111
7.2.2 Análisis de resultados.....	113
7.3 Presentación de modelos de carrocerías .....	115
7.4 Campos de Velocidades .....	130
7.5 Campos de Presión y Líneas de Flujo .....	146
7.6 Resumen temporada 2014.....	153
<b>Capítulo 8 Conclusiones y Recomendaciones.....</b>	<b>161</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>165</b>

## Lista de figuras

### Capítulo 1

<b>Figura 1.1</b> 1915 Indianápolis 500 [4].....	3
<b>Figura 1.2</b> 1916 Indianápolis 500 [4].....	3
<b>Figura 1.3</b> Evolución del record de velocidad en la pista de Indianápolis [3] .....	3
<b>Figura 1.4</b> Flujo alrededor de un ala [1].....	6
<b>Figura 1.5</b> Componentes de la fuerza resultante [1].....	7
<b>Figura 1.6</b> Fuerzas inferiores y superiores en un perfil alar [1].....	8
<b>Figura 1.7</b> Fuerza aerodinámica en un elemento de área diferencia de la superficie [1].....	9
<b>Figura 1.8</b> Convención de signos para momentos aerodinámicos [1].....	10
<b>Figura 1.9</b> Centro de presión para un perfil alar [1].....	11
<b>Figura 1.10</b> Sistemas equivalentes para diferentes puntos en donde se coloca la resultante [1]....	12

### Capítulo 2

<b>Figura 2.1</b> Visualización de la capa límite [1].. .....	15
<b>Figura 2.2</b> Coeficientes de arrastre para distintas geometrías [5]... .....	16
<b>Figura 2.3</b> Comparación relativa entre el arrastre por presión y el arrastre por fricción. [5].....	19
<b>Figura 2.4</b> Sistema coordinado utilizado para definir la dirección de las fuerzas en un vehículo y al área frontal usada para definir los coeficientes adimensionales [3] .....	20

<b>Figura 2.5</b> Variación del coeficiente de sustentación ( $C_L$ ) con respecto del ángulo de ataque ( $\alpha$ ) para un perfil NACA 63-210. $Re= 3 \times 10^6$ [1] .....	21
<b>Figura 2.6</b> $C_L$ y $C_D$ para un plato plano (longitud/espesor = 6) [2].....	21
<b>Figura 2.7</b> Rangos típicos de contribuciones al arrastre aerodinámico [3] .....	22
<b>Figura 2.8</b> Rangos típicos de contribuciones a la sustentación aerodinámica [3] .....	22
<b>Figura 2.9</b> Representación de un fluido de cierto volumen [2].....	25

### Capítulo 3

<b>Figura 3.1</b> Distribución de velocidad y centro de presiones negativo sobre la mitad de una media esfera a una velocidad de flujo $V_\infty$ [3].....	28
<b>Figura 3.2</b> Distribución de presiones sobre un automóvil bidimensional [3].....	29
<b>Figura 3.3</b> Distribución de presiones alrededor de un perfil alar [2].....	30
<b>Figura 3.4</b> Estela detrás de un cuerpo parecido al de un coche [3].....	31
<b>Figura 3.5</b> Vórtices en la estela causada por un alerón trasero de un coche de carreras [3].....	32
<b>Figura 3.6</b> Fuerza lateral contra ángulo de deslizamiento “slip angle”, y de lado derecho el esquema de la llanta con las fuerzas [7].....	33
<b>Figura 3.7</b> Radio de rodadura “Rolling radius” .....	34
<b>Figura 3.8</b> Patrones de flujo alrededor de las llantas en tres diferentes configuraciones [2].....	35
<b>Figura 3.9</b> Sustentación negativa “downforce” contra distancia al suelo para un perfil LS(1)-0413 [ $\alpha=-1^\circ$ , $Re=2 \times 10^6$ , pruebas hechas con el suelo moviéndose] [7].....	36
<b>Figura 3.10</b> Efecto de la proximidad en el arrastre y sustentación de dos elipsoides [7].....	38
<b>Figura 3.11</b> Visualización de los vórtices creados en un difusor [7].....	40
<b>Figura 3.12</b> Ángulo $\beta_w$ contra coeficiente de fuerza lateral, vista superior del coche con resultante actuando sobre el centro de presiones [3]. .....	42
<b>Figura 3.13</b> Posiciones típicas del centro de presiones y centros de gravedad dependiendo de la categoría del vehículo [3] . .....	43
<b>Figura 3.14</b> Deslizamiento causado por vientos laterales (fuerza lateral Y) [3].....	44
<b>Figura 3.15</b> Redireccionamiento del vehículo debido a vientos laterales causando una fuerza lateral Y [3]. .....	44

### Capítulo 4

<b>Figura 4.1</b> Pasos en la simulación de la dinámica de fluidos computacional (CFD) [10].....	47
--	----

<b>Figura 4.2</b> Mallado volumétrico hexaédrico aplicado para estudiar un coche dentro de un túnel de viento. Tomada de [13].....	49
<b>Figura 4.3</b> Mallado poliédrico de un avión y el volumen en estudio en interfaz de Star CCM+.....	49
<b>Figura 4.4</b> Elementos base para la creación del mallado en dos o tres dimensiones [10].....	53
<b>Figura 4.5</b> Malla incrementando su tamaño a medida que se aleja del lado inferior [10].....	53
<b>Figura 4.6</b> caracterización esquemática de un proceso de modelado de la turbulencia [10].....	56
<b>Figura 4.7</b> Esquema de distintos modelos de turbulencia [10].....	57

## Capítulo 5

<b>Figura 5.1</b> Dos coches monoplasas de llantas descubiertas. A la izquierda el coche competidor de la competencia de Formula SAE (UM-524) en Lincoln, Nebraska, EUA en el 2013. A la izquierda un coche con los colores de Ferrari competidor de alguna categoría tipo Formula.....	59
<b>Figura 5.2</b> Zonas prohibidas alrededor de las llantas vista lateral y superior [18].....	62
<b>Figura 5.3</b> La zona verde es la zona de exclusión. Las tres últimas imágenes muestran la zona de exclusión a distintas alturas desde una vista superior [18].....	65

## Capítulo 6

<b>Figura 6.1</b> Primera generación del coche del equipo de la UNAM. Foto tomada del reporte de temporada 2011.....	71
<b>Figura 6.2</b> Segunda generación del coche tipo formula compitiendo en California por parte de la UNAM en el año 2011. Imagen tomada del reporte de temporada 2011 [19].....	72
<b>Figura 6.3</b> CAD del coche tipo formula competidor de la competencia Formula SAE en California en el año 2011 [19]. .....	72
<b>Figura 6.4.</b> Estereotomía de la carrocería del coche tipo formula de la UNAM 2011.....	73
<b>Figura 6.5</b> Tercera generación del coche tipo formula competidor en Nebraska por parte de la UNAM en el año 2012. Imagen tomada del archivo del equipo Unammotorsports.....	73
<b>Figura 6.6</b> Foto desde la parte posterior del coche número 51, competidor por parte de la Facultad de Ingeniería de la UNAM en Nebraska en el año 2012.....	74
<b>Figura 6.7</b> Vista lateral del chasis con piloto [21]. .....	77
<b>Figura 6.8</b> Iteración de la carrocería #2 para analizar usando Star CCM+ [22].....	77
<b>Figura 6.9</b> Iteración #2 para la carrocería de la temporada 2013. ....	78
<b>Figura 6.10</b> Líneas de flujo para el campo de velocidad y campo de presión sobre la superficie con sus respectivas escalas de la carrocería # 2. ....	79

<b>Figura 6.11</b> Arriba: vista en isométrico del tercer diseño de la carrocería 2013. Abajo: vista lateral del tercer diseño de la carrocería 2013.....	80
<b>Figura 6.12</b> Arriba: vista en isométrico del sexto diseño de la carrocería 2013. Abajo: vista lateral del sexto diseño de la carrocería 2013.....	81
<b>Figura 6.13</b> Análisis computacional del octavo diseño de la carrocería 2013.....	82
<b>Figura 6.14</b> Análisis computacional del octavo diseño de la carrocería 2013. Abajo: vista inferior del campo de presiones. Medio: vista frontal. Arriba: vista con perspectiva.....	83
<b>Figura 6.15</b> Campo de velocidades sobre un plano paralelo a los ejes x-y a una distancia aproximada de una pulgada delante de la cara del piloto.....	84
<b>Figura 6.16</b> Plano paralelo al plano y-z que contiene el campo de velocidades y una distancia midiendo longitud desde la punta de la nariz hasta la parte de la estela donde la velocidad se ve afectada por la estela de forma importante. Imagen con el diseño #8 para la carrocería 2013.....	85
<b>Figura 6.17</b> Imagen del noveno diseño de la carrocería puesta en transparente y líneas de flujo para observar la velocidad. Arriba: carrocería número 9. Abajo: vista inferior sin carrocería.....	86
<b>Figura 6.18</b> Vista superior del doceavo diseño de la carrocería del equipo UNAM motorsports 2013. ....	88
<b>Figura 6.19</b> Vista inferior del doceavo diseño de la carrocería del equipo UNAM motorsports 2013 con el campo de presiones sobre la superficie.....	88
<b>Figura 6.20</b> Vista inferior del doceavo diseño de la carrocería con líneas de flujo y campo de presión sobre la superficie del coche.....	89
<b>Figura 6.21</b> Vista lateral del doceavo diseño de la carrocería 2013 con líneas de flujo mostrando velocidad y el campo de presión sobre la superficie del coche.....	90
<b>Figura 6.22</b> Doceavo diseño de carrocería con flujo másico saliendo del silenciador.....	90
<b>Figura 6.23</b> Doceavo diseño de la carrocería con líneas de flujo con su origen en las llantas.....	91
<b>Figura 6.24</b> Doceavo diseño de la carrocería con líneas de flujo con su origen en las llantas y acercamiento a la llanta derecha (perspectiva del piloto).....	92
<b>Figura 6.25</b> Vista superior del diseño número catorce de la carrocería del equipo UNAM motorsports 2013.....	93
<b>Figura 6.26</b> Vista lateral del catorceavo diseño de la carrocería 2013.....	94
<b>Figura 6.27</b> Simulación con líneas de flujo y admisión de aire al motor con el catorceavo diseño de la carrocería 2013.....	94
<b>Figura 6.28</b> Simulación con el catorceavo diseño de carrocería con ductos laterales en invisible...	95
<b>Figura 6.29</b> Mallado con el catorceavo diseño de la carrocería y el múltiple de escape apuntando hacia atrás. ....	96



<b>Figura 6.30</b> Diseño número 15 y final de la carrocería 2013 para el equipo UNAM motorsports....	97
<b>Figura 6.31</b> Vista frontal del diseño final de la carrocería 2013.....	98
<b>Figura 6.32</b> Mallado con vista desde abajo del coche.....	99
<b>Figura 6.33</b> Planos con campo de velocidad y superficie del coche con campo de presión (llantas fuera de escena).....	99
<b>Figura 6.34</b> Vista lateral del coche con carrocería. (UM-524).....	100
<b>Figura 6.35</b> Vista superior del UM-524 con carrocería y todos sus componentes.....	100
<b>Figura 6.36</b> Tabla comparativa de coeficientes de arrastre en diferentes diseños de carrocería de la temporada 2013 [ $Re=1.6 \times 10^6$ ].....	101
<b>Figura 6.37</b> Fuerza de arrastre del coche 2013 a distintas velocidades [Se calculó con la ecuación (2.2)].....	102
<b>Figura 6.38</b> Manufactura de la carrocería 2013. Presentación de la nariz y laterales al coche para afinar detalles.....	103
<b>Figura 6.39</b> Manufactura de la carrocería 2013. Presentación del ducto lateral izquierdo.....	104
<b>Figura 6.40</b> UM-524 en Lincoln Nebraska durante una prueba dinámica de la competencia formula SAE 2013. ....	104
<b>Figura 6.41</b> UM-524 durante su presentación ante la comunidad universitaria en CU en la facultad de Ingeniería. ....	105
<b>Capítulo 7</b>	
<b>Figura 7.1</b> Diagrama de flujo del proceso iterativo de diseño de la carrocería propuesto en las temporadas 2013 y 2014.....	110
<b>Figura 7.2</b> Tabla de errores del software Star CCM+ analizando el diseño número 2 de la temporada 2014. ....	111
<b>Figura 7.3</b> Vista superior del segundo diseño para la carrocería 2013 con errores de superficie mostrados por el software de fluidos computacionales.....	112
<b>Figura 7.4</b> Plano lateral con campo de velocidades a la mitad del ducto lateral derecho del cuarto diseño de la carrocería 2014. La dirección del aire es de izquierda a derecha, la nariz del coche apunta hacia la izquierda.....	114
<b>Figura 7.5</b> Segundo diseño de la carrocería para la temporada 2014 del equipo UNAM motorsports.....	115
<b>Figura 7.6</b> Vista lateral del segundo diseño de la carrocería 2014.....	115
<b>Figura 7.7</b> Tercer diseño de carrocería de la temporada 2014.....	116

<b>Figura 7.8</b> Vista lateral del tercer diseño de carrocería de la temporada 2014.....	116
<b>Figura 7.9</b> Vista superior del cuarto diseño de la carrocería 2014.....	117
<b>Figura 7.10</b> Cuarto diseño de la carrocería 2014.....	118
<b>Figura 7.11</b> Vista superior del séptimo diseño de carrocería de la temporada 2014.....	119
<b>Figura 7.12</b> Vista lateral del séptimo diseño de carrocería de la temporada 2014 del equipo UNAM motorsports.....	120
<b>Figura 7.13</b> Diseño de la carrocería alternativa con ductos laterales con branquias delanteras....	121
<b>Figura 7.14</b> Escena de la carrocería mallada con el volumen de control en las branquias.....	121
<b>Figura 7.15</b> Mallado fino debido al volumen de control aplicado en las branquias de los ductos laterales.....	122
<b>Figura 7.16</b> Arriba: representación del corte de las branquias en el diseño de la carrocería con branquias. Abajo: representación de las branquias con un corte adecuado alineado con la dirección del flujo de aire.....	123
<b>Figura 7.17</b> Vista lateral del doceavo diseño de carrocería para la temporada 2014.....	123
<b>Figura 7.18</b> Vista superior del doceavo diseño de carrocería para la temporada 2014.....	124
<b>Figura 7.19</b> Isométrico del doceavo diseño de carrocería para la temporada 2014.....	124
<b>Figura 7.20</b> Vista superior del diseño número 13 de la carrocería de la temporada 2014.....	125
<b>Figura 7.21</b> Vista lateral del treceavo diseño de la carrocería de la temporada 2014.....	125
<b>Figura 7.22</b> Isométrico del diseño número trece de la temporada 2014 del equipo UNAM motorsports.....	126
<b>Figura 7.23</b> Ductos laterales del catorceavo diseño de la carrocería para la temporada 2014...127	127
<b>Figura 7.24</b> Isométrico del diseño número catorce de la carrocería para la temporada 2014 del equipo UNAM motorsports.....	127
<b>Figura 7.25</b> Ductos laterales con branquias. (Ductos laterales definitivos temporada 2014).....	128
<b>Figura 7.26</b> Vista lateral del último diseño de carrocería de la temporada 2014. (Diseño Final)....	129
<b>Figura 7.27</b> Vista superior del último diseño de la carrocería de la temporada 2014.....	129
<b>Figura 7.28</b> Diseño Final de la carrocería 2014.....	130
<b>Figura 7.29</b> Vista lateral del plano de velocidades del segundo diseño de carrocería.....	130

<b>Figura 7.30</b> Vista lateral del tercer diseño de la carrocería del equipo UNAM motorsports para la temporada 2014.....	131
<b>Figura 7.31</b> Vista lateral del plano de velocidades de la carrocería número cuatro.....	132
<b>Figura 7.33</b> Plano de velocidades en vista lateral del séptimo diseño de carrocería de la temporada 2014.....	133
<b>Figura 7.34</b> Vista superior del plano de velocidades de la carrocería alternativa con branquias...	133
<b>Figura 7.35</b> Vista del plano lateral del campo de velocidades dentro del ducto lateral de la primera carrocería con branquias de la temporada 2014.....	134
<b>Figura 7.36</b> Vista superior del campo de velocidades con el doceavo diseño de carrocería.....	135
<b>Figura 7.37</b> Vista frontal del campo de velocidades con el treceavo diseño de carrocería de la temporada 2014.....	136
<b>Figura 7.38</b> Vista lateral del campo de velocidades con el treceavo diseño de carrocería de la temporada 2014.....	137
<b>Figura 7.39</b> Vista lateral del campo de velocidades con la carrocería número trece de la temporada 2014.....	137
<b>Figura 7.40</b> Vista lateral del campo de velocidades a la altura del ducto lateral derecho.....	138
<b>Figura 7.41</b> Vista superior del plano de velocidades con el treceavo diseño de la carrocería.....	139
<b>Figura 7.42</b> Vista lateral del campo de velocidades con el diseño número catorce de carrocería 2014.....	140
<b>Figura 7.43</b> Vista frontal del campo de velocidades del catorceavo diseño de carrocería 2014.....	140
<b>Figura 7.44</b> Vista superior del campo de velocidades con la carrocería número 14 de la temporada 2014.....	141
<b>Figura 7.45</b> Vista lateral del campo de velocidades en el ducto derecho del diseño número catorce de la temporada 2014.....	142
<b>Figura 7.46</b> Vista lateral del plano de velocidades del ducto izquierdo de la carrocería número catorce.....	142
<b>Figura 7.47</b> Vista lateral del campo de velocidades del ducto izquierdo sin superficie frontal.....	143
<b>Figura 7.48</b> Vista superior el campo de velocidades con los ductos laterales del treceavo diseño sin superficie delantera.....	144

<b>Figura 7.49</b> Vista frontal del campo de velocidades con los ductos laterales del treceavo diseño sin superficie delantera.....	144
<b>Figura 7.50</b> Vista lateral del campo de velocidades con el diseño final de carrocería de la temporada 2014 del equipo UNAM motorsports.....	145
<b>Figura 7.51</b> Vista superior del campo de velocidades con el diseño final de la carrocería 2014....	146
<b>Figura 7.52</b> Campo de presiones sobre el segundo diseño de carrocería de temporada 2014.....	146
<b>Figura 7.53</b> Líneas de flujo sobre el ducto lateral del segundo diseño de carrocería de la temporada.....	147
<b>Figura 7.54</b> Campo de presiones sobre el tercer diseño de la temporada 2014.....	148
<b>Figura 7.55</b> Campo de presiones sobre el cuarto diseño de la carrocería de temporada 2014....	148
<b>Figura 7.56</b> Campo de presiones y líneas de flujo sobre séptimo diseño del ducto lateral 2014...149	
<b>Figura 7.57</b> Campo de presiones sobre primera carrocería con branquias de temporada 2014....	149
<b>Figura 7.58</b> Vista superior del campo de presiones con la carrocería con branquias.....	150
<b>Figura 7.59</b> Campo de presiones sobre el coche con el treceavo diseño de carrocería para la temporada 2014.....	150
<b>Figura 7.60</b> Vista inferior del campo de presiones con el diseño número 13 de carrocería.....	151
<b>Figura 7.61</b> Campo de presiones y líneas de flujo con el coche y la carrocería número trece.....	151
<b>Figura 7.62</b> Vista lateral del campo de presiones y líneas de flujo sobre el coche con el treceavo diseño de carrocería 2014.....	152
<b>Figura 7.63</b> Campo de presiones y líneas de flujo con el catorceavo diseño de carrocería 2014...152	
<b>Figura 7.64</b> Campo de presiones sobre el coche con el diseño final de carrocería 2014.....	153
<b>Figura 7.65</b> Coeficientes de carrocerías de la temporada 2014 [ $Re=1.6 \times 10^6$ ].....	153
<b>Figura 7.66</b> Coeficientes de arrastre y sustentación del coche completo con distintos modelos de carrocerías diseños de la temporada 2014 [ $Re=1.6 \times 10^6$ ].....	154
<b>Figura 7.67</b> Gráfica de la fuerza de arrastre a distintas velocidades para el diseño final del coche 2014 [Se calculó con la ecuación (2.2)].....	155
<b>Figura 7.68</b> Comparación de las fuerzas de arrastre entre el diseño del coche de las temporadas 2013 y 2014.....	156
<b>Figura 7.69</b> CAD final del coche de la temporada 2014.....	157

<b>Figura 7.70</b> Equipo 2014 tomando medidas de resina para manufactura con fibra de aramida.....	157
<b>Figura 7.71</b> Corte laser de la fibra de aramida para la temporada 2014.....	158
<b>Figura 7.72</b> Proceso de infusión sobre un plano para el piso de la carrocería (izquierda) y para el piso de los ductos laterales (derecha) de la carrocería 2014.....	158
<b>Figura 7.73</b> Coche número 51 participante de la competencia 2014 durante una presentación con patrocinadores.....	159
<b>Figura 7.74</b> Coche durante la competencia en Lincoln Nebraska 2014.....	160

## Capítulo 1 Introducción

En éste capítulo se mencionarán los objetivos particulares y generales, así como las hipótesis que se plantearon durante dos años de trabajo consecutivo.

Los antecedentes de éste capítulo tiene como propósito hacer ver al lector la importancia de la interacción de un cuerpo con un fluido. Los conceptos tratados serán utilizados a través de todo el trabajo y funcionan como conceptos básicos a la hora de analizar un cuerpo aerodinámicamente.

### 1.1 Objetivos

#### 1.1.1 Objetivo General

Incrementar el interés y conocimientos respecto al flujo externo de un coche tipo formula a través de la justificación del diseño de las carrocerías de las temporadas 2013 y 2014 para las cuales se plantearon como objetivo la creación de sustentación negativa y arrastre mínimo.

#### 1.1.2 Objetivos Particulares

Incrementar el conocimiento académico acerca de la aerodinámica de un coche tipo formula.

Crear una guía para el estudiante interesado en tener un acercamiento general a la aerodinámica del coche tipo Formula del equipo de la UNAM

Utilizar técnicas de fluidos computacionales para realizar simulaciones del flujo alrededor del coche y así incrementar el entendimiento del mismo.

Incrementar el interés del estudiante en temas relacionados con aerodinámica aplicados a vehículos de carreras.

Justificar él porque del diseño de los vehículos que concursaron en la competencia de Formula SAE en Lincoln, Nebraska, en los años 2013 y 2014.

Crear un diseño del coche con fuerza de sustentación negativa y fuerza de arrastre mínima.

### 1.2 Hipótesis

Se comprobará que los ductos laterales “Side pods” pueden reducir el arrastre creado en la parte posterior del coche.

Se comprobará que existe una relación entre las fuerzas de sustentación y arrastre de un cuerpo.

## 1.3 Antecedentes<sup>1</sup>

### 1.3.1 Historia de la aerodinámica

Agosto de 1588, la armada Española llevaba a cabo una invasión al imperio británico gobernado por la reina Elizabeth. La flota inglesa bajo el mando de Sir Francis Drake estaba compuesta de barcos ligeros y pequeños, sin armada a bordo y con armas de corto alcance. En cambio, la flota española estaba compuesta de los barcos más grandes y pesados de aquellos tiempos, contenían guarnición de soldados y cañones pesados capaces de disparar balas de 50 libras [1].

El balance de poder de la Europa del siglo XVI dependía de este enfrentamiento. Felipe II, rey de una España católica buscaba terminar la influencia de una Inglaterra protestante de influencia creciente en ámbitos políticos y religiosos. El resultado final demostró que los pesados barcos españoles no eran rival para los barcos ligeros y maniobrables ingleses [1].

La importancia de esta batalla para este trabajo de tesis no es el resultado político que esto desencadenó, sino que fue la primera batalla de la que se tiene registro en la que los barcos en ambos lados de la batalla estaban impulsados completamente por vela (en contraste con otras batallas en donde había combinación entre remos y velas). Esta batalla mostró al mundo desde ese momento que poder político es igual a poder naval, y el poder naval empezó a ser igual a maniobrabilidad y velocidad. Para incrementar la velocidad de un barco se tiene que reducir el arrastre creado por la interacción entre el barco y el agua. Desde ese momento el problema del arrastre se convirtió en tema de interés para ingenieros de ese tiempo, dando como resultado un ímpetu en el estudio de la mecánica de fluidos.

Este ímpetu alcanzó su máximo casi un siglo después cuando en 1687, Isaac Newton publicó su famoso texto “Principia”, en donde todo su segundo libro habla acerca de la mecánica de fluidos. Newton se encontró con los mismos problemas que todos los demás que empezaron a desarrollar este tema. El análisis de los fluidos es conceptualmente más difícil que el de cuerpos sólidos. Un sólido es un cuerpo geoméricamente definido y su movimiento es relativamente fácil de describir. En cambio un fluido es una substancia que no soporta su propio peso. Lo que hizo Newton fue considerar a los fluidos como un flujo uniforme. Newton asumió que al chocar el flujo contra una superficie con cierto ángulo “theta” las partículas del flujo le transferirían su cantidad de movimiento normal a la superficie mientras que el componente tangencial se preservaría. Por ende, después de una colisión con una superficie las partículas se moverían a lo largo de la superficie. Esto llevó al desarrollo de un modelo matemático en donde la fuerza hidrodinámica varía en relación con el seno cuadrado de Theta [1].

---

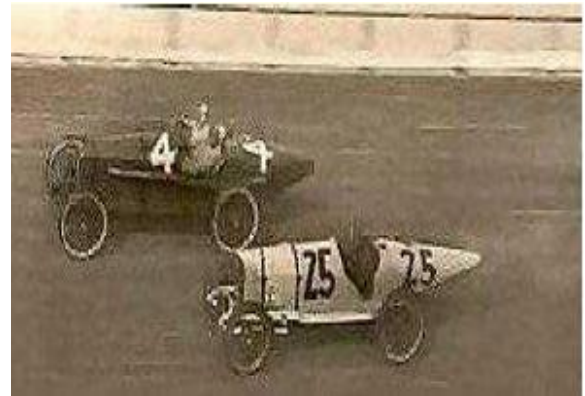
<sup>1</sup> Los antecedentes, así como la teoría de este trabajo son una recopilación de diversos textos los cuales se encuentran reportados en las referencias. Esto con propósito de brindar al lector un compendio de lo que el autor considera fundamental al momento de iniciarse en el ámbito de la aerodinámica en los coches de carreras.

A pesar de que esta aproximación difiere mucho de la realidad, su simplicidad sirvió como base para el desarrollo de la arquitectura naval. La relación entre un flujo y un sólido, en este caso un vehículo, ha sido de vital importancia para mejorar el desempeño de estos.

El desarrollo de la aerodinámica empezó a tener su influencia en las grandes carreras de Indianápolis en Estados Unidos en las primeras décadas del siglo XX.

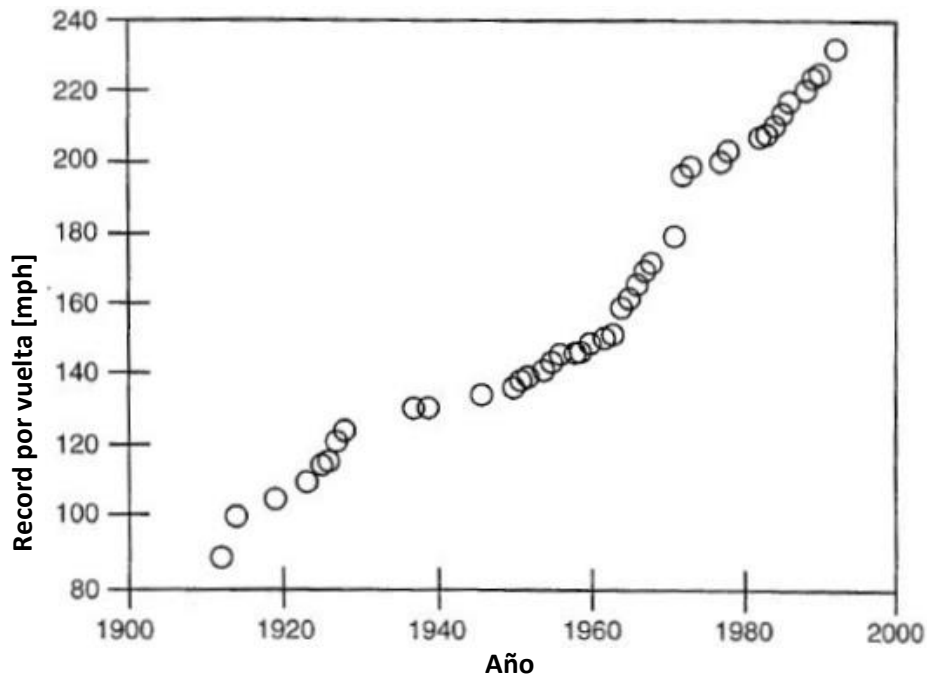


**Figura 1.1** 1915 Indianápolis 500 [4].



**Figura 1.2** 1916 Indianápolis 500 [4].

En las figuras 1.1 y 1.2 se aprecia como los fabricantes de coches de carreras empezaban a entender que las geometrías suaves incrementaban la velocidad de sus vehículos al disminuir el arrastre. En la siguiente figura se muestra como la velocidad máxima de carrera fue incrementándose cada año. En ese incremento el entendimiento de la aerodinámica tuvo un papel importante.



**Figura 1.3** Evolución del record de velocidad en la pista de Indianápolis [3].



De la figura 1.3 y observando la década de los sesentas se aprecia como la tendencia evolucionó incrementando el record de velocidad por vuelta. Durante la década de los sesentas se dio una etapa de experimentación con dispositivos aerodinámicos a la par con una tecnología de rápido desarrollo en las llantas. Se puede observar que el brinco más significativo se dio alrededor de 1972. Esto debido al uso efectivo de alerones delanteros y traseros [3].

En 1970 Chevrolet/Chaparral fue el pionero al descubrir una nueva manera para generar fuerza de sustentación negativa (downforce). Esto consistió en reducir la presión del aire debajo del coche (tracción por vacío). Se introdujeron ventiladores de succión y se le agregaron bordes para tratar de sellar la parte baja del coche. El chaparral 2J resultó exitoso y después se le prohibió competir debido a regulaciones de seguridad [3].

### ***1.3.2 Fundamentos de la aerodinámica***

La aerodinámica es una ciencia aplicada con muchos usos prácticos en la ingeniería. Cuando se trabaja con la aerodinámica se puede hablar de dos objetivos principalmente:

El primero es la predicción de fuerzas, momentos y transferencia de calor en cuerpos moviéndose a través de un fluido (comúnmente aire). Por ejemplo, cuando se requiere saber cuánto arrastre es generado por una carrocería y sus componentes aerodinámicos. Cuando se quiere calcular la fuerza del viento en un edificio, barco u otra superficie en movimiento. Otro ejemplo es, cuando se requiere calcular cuánto se calentará la superficie de un avión supersónico o de un vehículo entrando a la atmosfera de la tierra. Esta primera aplicación es conocida como aerodinámica externa.

El segundo es el estudio del movimiento de un fluido dentro de ductos. Si se requiere calcular las propiedades de fluidos dentro de espacios cerrados, como por ejemplo un fluido dentro de un motor. Un ejemplo de una aplicación relacionada al diseño de vehículos es analizar el flujo dentro de un túnel de viento. Esta aplicación es conocida como aerodinámica interna.

### ***1.3.3 Variables básicas de la aerodinámica***

A lo largo de este documento se hablará más frecuentemente de cuatro términos: presión, densidad, temperatura y velocidad de flujo.

Consideremos una superficie inmersa en un fluido. Esta superficie es sólida, puede ser la pared interna de un ducto o la carrocería de un auto. Tomando en cuenta que las moléculas del fluido están en movimiento continuo, consideramos entonces la presión como la fuerza normal por unidad de área ejercida en la superficie debido cambio de cantidad de movimiento con respecto del tiempo de las moléculas de gas impactando o cruzando esta superficie.

Normalmente la presión es definida localmente a pesar de que cuando se habla de presiones se piensa en una fuerza en un área definida. Para dejar este concepto más claro se considera un punto B en un volumen de cierto fluido.

También

$dA = \text{area elemental en el punto } B$   
 $dF = \text{fuerza sobre el area } dA \text{ debido a la presión}$

Entonces, la presión en el punto B en el fluido está definido como

$$p = \lim \left( \frac{dF}{dA} \right) \quad dA \rightarrow 0$$

Así se puede ver que la presión es el límite de la fuerza por unidad de área y no es necesario que esa área sea un valor estándar como  $1 \text{ m}^2$  o  $1 \text{ ft}^2$ . La presión es una propiedad en el fluido que es local así que la presión entre dos puntos puede ser distinta.

Otra importante variable es la densidad, definida como masa por unidad de volumen. Utilizando lo dicho para la presión. La densidad no requiere de un volumen específico de  $1 \text{ m}^3$  o  $1 \text{ ft}^3$ . En vez, es una propiedad que varía de punto en punto. Considerando nuevamente el punto B en un fluido.

$dv = \text{volumen elemental en el punto } B$   
 $dm = \text{masa del fluido dentro de } dv$

Entonces, la densidad en el punto B en el fluido está definido como

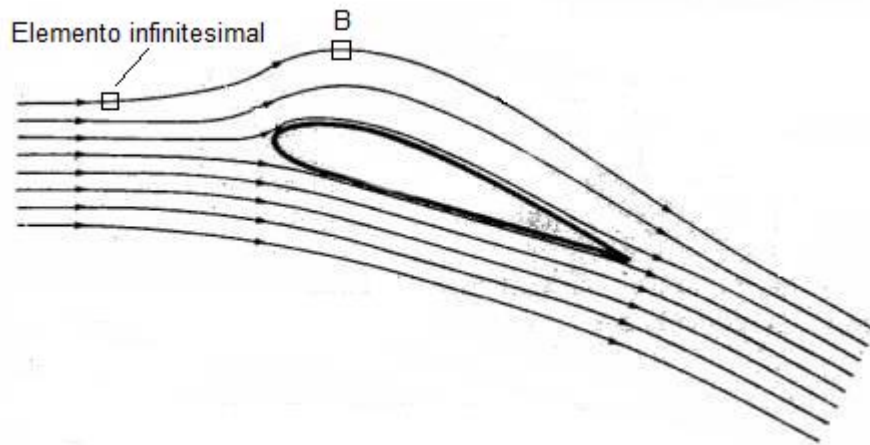
$$\rho = \lim \left( \frac{dm}{dv} \right) \quad dv \rightarrow 0$$

La presión es el límite de la masa por unidad de volumen, donde el volumen tiende a cero en el punto B.

La temperatura cobra su importancia cuando empezamos a hablar de aerodinámica a altas velocidades. La temperatura T de un gas es directamente proporcional al promedio de la energía cinética de las moléculas de un fluido. Se puede afirmar que si un gas se encuentra en un rango de temperaturas altas sus moléculas y átomos se están moviendo a altas velocidades, mientras que un gas en un rango de bajas temperaturas sus moléculas se están moviendo a bajas velocidades. La temperatura es también una propiedad local en los fluidos.

El enfoque principal de la aerodinámica son los fluidos en movimiento. Por lo tanto la velocidad de flujo tiene una importancia alta cuando se habla de aerodinámica. El concepto de velocidad de flujo es distinto a la velocidad de un sólido. Cuando hablamos de un sólido todas sus partículas se mueven a la misma velocidad. En cambio en un fluido esto no sucede. Considere por un momento un perfil de ala. Concentrándonos en un elemento infinitesimal de masa perteneciente al fluido se observa como este elemento se mueve a través del tiempo. La velocidad y dirección del elemento varía a medida que cambia el tiempo. Ahora, concentrémonos en un punto fijo en el espacio al que llamaremos B en la figura 1.3. La velocidad de flujo puede ser definida a continuación: la velocidad de un gas fluyendo a través de cualquier punto fijo en el espacio B es la misma velocidad de un elemento infinitesimal que está pasando en ese momento por el punto B. La velocidad del

flujo tiene magnitud y dirección. Esto, a diferencia de la presión, densidad y temperatura que son variables escalares.



**Figura 1.4** Flujo alrededor de un ala [1].

### **1.3.4 Fuerzas y momentos aerodinámicos**

Las fuerzas y momentos aerodinámicos en un cuerpo se deben únicamente a dos razones:

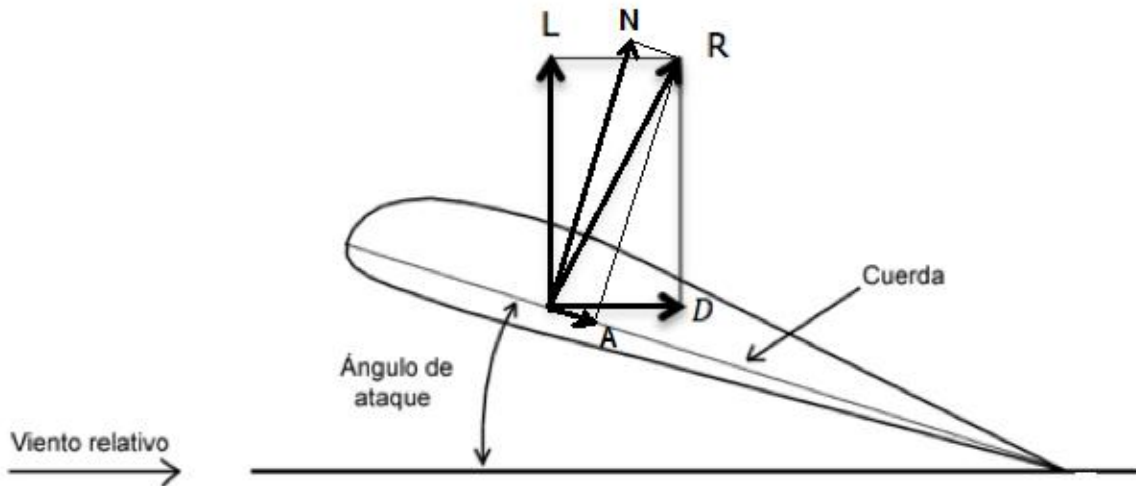
1. Distribución de presiones sobre la superficie del cuerpo
2. Esfuerzos cortantes sobre la superficie del cuerpo

Sin importar que tan compleja sea la geometría del cuerpo las fuerzas y momentos se deben solo a esas razones enumeradas. La presión y los esfuerzos tienen las mismas unidades (kilogramos sobre metro cuadrado). La presión actúa de forma perpendicular a la superficie del cuerpo donde se encuentra y el esfuerzo cortante es tangencial a la superficie del cuerpo. El esfuerzo cortante se debe a la fricción entre el cuerpo sólido y el aire [1].

El efecto combinado de la presión y el esfuerzo integradas sobre todo el cuerpo da como resultante la fuerza aerodinámica y el momento aerodinámico en el cuerpo sólido. Esta resultante se divide en dos componentes como se puede ver en la figura 1.5.  $V_{\infty}$  es el viento relativo definido como el flujo de velocidad alejado delante del cuerpo. El flujo alejado del cuerpo se llama flujo libre. Por esto  $V_{\infty}$  es también la velocidad del flujo libre. De la figura 1.5 se define:

$L = lift$  o sustentación = componente de la resultante  $R$  perpendicular a  $V_{\infty}$

$D = drag$  o arrastre o resistencia = componente de la resultante  $R$  paralelo a  $V_{\infty}$



**Figura 1.5** Componentes de la fuerza resultante [1].

La cuerda  $c$  es la distancia lineal que va de extremo delantero a extremo trasero y a veces la resultante  $R$  se divide en componentes utilizando como referencia la cuerda  $c$ .

$N = \text{fuerza normal} = \text{componente de } R \text{ perpendicular a } c$

$A = \text{fuerza axial} = \text{componente de } R \text{ paralela a } C$

El ángulo de ataque  $\alpha$  se define como el ángulo entre  $c$  y  $V_\infty$ . Por ende,  $\alpha$  es el ángulo entre  $L$  y  $N$  y también es el ángulo entre  $D$  y  $A$ . De la figura 1.5 también se determina una relación geométrica entre los componentes:

$$L = N \cos \alpha - A \sin \alpha \quad (1.1)$$

$$D = N \sin \alpha + A \cos \alpha \quad (1.2)$$

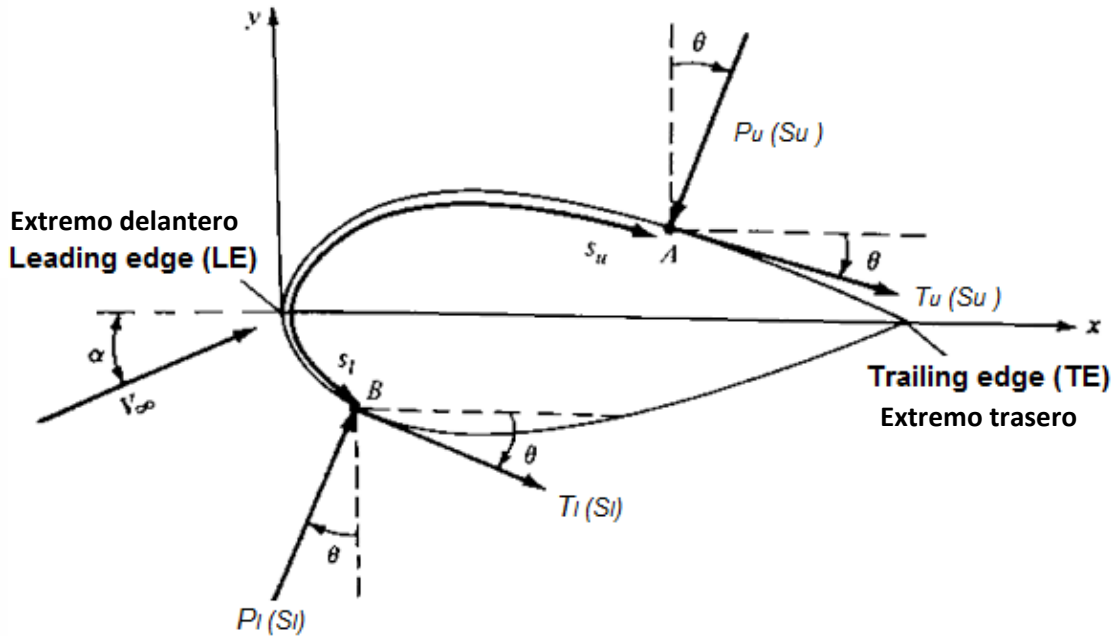


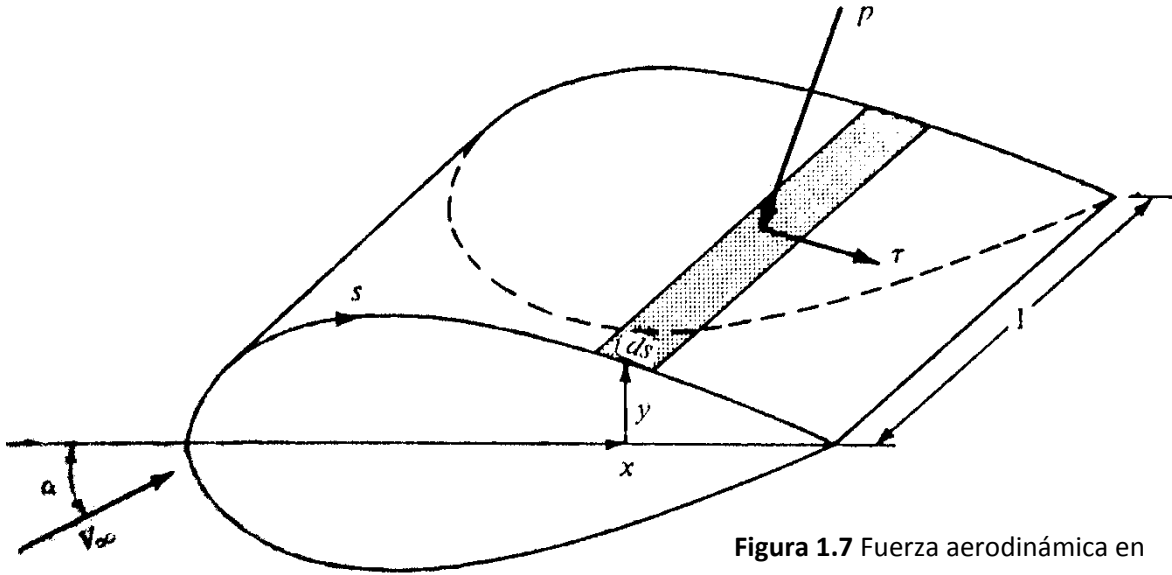
Figura 1.6 Fuerzas inferiores y superiores en un perfil alar [1].

Consideremos la figura 1.6 para analizar con más detalle las fuerzas. La distancia entre el extremo delantero y un punto arbitrario A en la superficie superior (upper Surface  $S_u$ ); de igual manera la distancia hasta un punto arbitrario B en la superficie (lower Surface  $S_l$ ). La presión y los esfuerzos cortantes en la superficie superior se denotan  $P_u$  y  $T_u$  y estos están en función de  $S_u$ . De igual manera para la presión y el esfuerzo inferior,  $P_l$  y  $T_l$  respectivamente, y estas se encuentran en función de  $S_l$ . Para la figura 1.6 el ángulo theta es positivo cuando se mide en dirección de las manecillas del reloj. En la figura 1.6 se aprecia como todos los ángulos son positivos.

Se considera el perfil de la figura 1.6 como un cuerpo de longitud infinita de sección uniforme. Se considera también un elemento diferencial de área ( $dS$ ) en ese cuerpo, donde  $dS=(ds)(1)$  como se muestra en la figura 1.7. Las variables de interés para este caso es la fuerza normal total  $N'$  y la fuerza axial total  $A'$  causadas por la presión y el esfuerzo cortante en ese elemento de área diferencial ( $dS$ ). Como notación  $N$  y  $A$  primas ( $N'$  y  $A'$ ) denotan fuerza por unidad de distancia. De las figuras 1.6 y 1.7, se determina las fuerzas axial y normal en el área infinitesimal de la superficie superior del cuerpo:

$$dN'_u = -p_u dS_u \cos \theta - \tau_u dS_u \sin \theta \quad (1.3)$$

$$dA'_u = -p_u dS_u \sin \theta + \tau_u dS_u \cos \theta \quad (1.4)$$



**Figura 1.7** Fuerza aerodinámica en un elemento de área diferencial de la superficie [1].

Y de igual manera en la superficie inferior se tiene:

$$dN'_l = p_l dS_l \cos \theta - \tau_l dS_l \sin \theta \quad (1.5)$$

$$dA'_l = p_l dS_l \sin \theta + \tau_l dS_l \cos \theta \quad (1.6)$$

De las ecuaciones (1.3) a (1.6), la dirección positiva de  $N'$  y  $A'$  es la mostrada en la figura 1.4. Para estas ecuaciones se mantiene la convención del signo positivo de theta en dirección de las manecillas del reloj. Integrando las ecuaciones (1.3) a (1.6) desde el extremo delantero (LE) hasta el extremo trasero (TE) se obtiene el total de fuerzas normales y axiales por unidad de distancia:

$$N' = - \int_{LE}^{TE} (p_u \cos \theta + \tau_u \sin \theta) dS_u + \int_{LE}^{TE} (p_l \cos \theta - \tau_l \sin \theta) dS_l \quad (1.7)$$

$$A' = \int_{LE}^{TE} (-p_u \sin \theta + \tau_u \cos \theta) dS_u + \int_{LE}^{TE} (p_l \sin \theta - \tau_l \cos \theta) dS_l \quad (1.8)$$

La fuerza de sustentación y arrastre por unidad de distancia se pueden obtener por medio de la sustitución de las ecuaciones (1.7) y (1.8) en las ecuaciones (1.1) y (1.2).

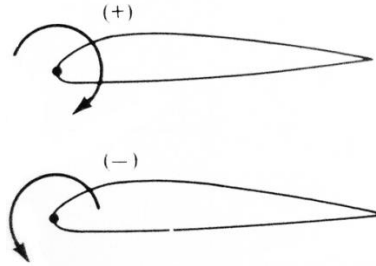
El momento aerodinámico ejercido sobre el cuerpo depende del punto en donde se esté considerando dicho momento. Si se considera el momento en el extremo delantero, por convención los momentos que tiendan a incrementar  $\alpha$  son positivos y los momentos que tiendan a disminuir  $\alpha$  son negativos. Esta convención se ilustra en la figura 1.7. Regresando a las figuras 1.5 y 1.6, el momento aerodinámico por unidades de distancia en

el extremo delantero debido a la presión y al esfuerzo ejercido en el diferencial de área en la superficie superior es:

$$dM'_u = (p_u \cos \theta + \tau_u \sin \theta)x dS_u + (-p_u \sin \theta + \tau_u \cos \theta)y dS_u \quad (1.9)$$

Y en la superficie inferior:

$$dM'_l = (-p_l \cos \theta + \tau_l \sin \theta)x dS_l + (p_l \sin \theta + \tau_l \cos \theta)y dS_l \quad (1.10)$$



**Figura 1.8** Convención de signos para momentos aerodinámicos [1].

De las ecuaciones (1.9) y (1.10) nótese que la convención para  $\theta$  sigue siendo la misma y además  $y$  es positiva cuando está por arriba de la cuerda y negativa cuando está por debajo de la cuerda. Integrando las ecuaciones (1.9) y (1.10) desde el extremo delantero al extremo trasero, se obtiene el momento por unidades de distancia.

$$M'_{LE} = \int_{LE}^{TE} [(p_u \cos \theta + \tau_u \sin \theta)x - (p_u \sin \theta - \tau_u \cos \theta)y] dS_u + \int_{LE}^{TE} [(-p_l \cos \theta + \tau_l \sin \theta)x + (p_l \sin \theta + \tau_l \cos \theta)y] dS_l \quad (1.11)$$

En las ecuaciones (1.7), (1.8) y (1.11),  $\theta$ ,  $x$  y  $y$  son funciones conocidas de  $S$  para cierta superficie de cierta geometría de un cuerpo sólido. Por ende, si  $p_u$ ,  $p_l$ ,  $\tau_u$  y  $\tau_l$  son funciones conocidas de  $S$  (por teoría o experimentación), las integrales pueden ser evaluadas.

### 1.3.5 Centro de presiones

De las ecuaciones (1.7) y (1.8) podemos ver que la fuerza normal y axial del cuerpo se deben a las cargas distribuidas a causa de la presión y el esfuerzo creado en cada punto de la superficie. Además, esta distribución de cargas genera un momento en el extremo delantero del cuerpo como se propuso para determinar la ecuación (1.11). Por esto, surge una pregunta importante: Si las fuerzas aerodinámicas en un cuerpo son siempre presentadas en términos de una fuerza

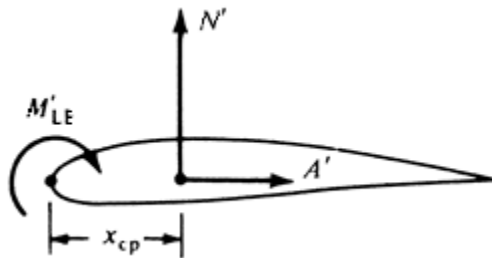
resultante R, o de sus componentes N y A. ¿dónde se deberían de colocar estas fuerzas? La respuesta a esta pregunta es: deberían ser colocadas en un punto del cuerpo en donde produzcan el mismo efecto a la distribución de cargas. Por ejemplo, si la distribución de cargas en un cuerpo bidimensional, como un perfil alar, produce un momento en el extremo delantero del ala dado por la ecuación (1.11): entonces, N' y A' deben ser colocadas en el perfil a la distancia de manera que se genere el mismo momento que se presenta en el extremo delantero del perfil. Si A' es colocada a la altura de la cuerda como se muestra en la figura 1.9, entonces N' debe ser colocada a la distancia  $x_{cp}$  para que se cumpla:

$$M'_{LE} = -(x_{cp})N' \quad (1.12)$$

$$x_{cp} = -\left(\frac{M'_{LE}}{N'}\right) \quad (1.13)$$

En la figura 1.9 la dirección del momento  $M'_{LE}$  es positiva. También, se puede ver una fuerza normal N' que debería estar creando un momento negativo en el extremo delantero (LE) del ala. Esto es consistente con el signo negativo en la ecuación (1.13). Por esto, el momento resultante en el extremo delantero (LE) es negativo y en dirección contraria a la que se muestra en la figura 1.9.

En la figura 1.9 y la ecuación (1.13)  $x_{cp}$  se define como el centro de presiones. Este es el punto en donde la resultante de las fuerzas distribuidas actúa efectivamente en el cuerpo. Si se realizara una suma de momentos desde el centro de presiones, el resultado sería cero. Así, como posible definición a centro de presiones es; el punto en un cuerpo es donde el momento aerodinámico es cero.



**Figura 1.9** Centro de presión para un perfil alar [1].

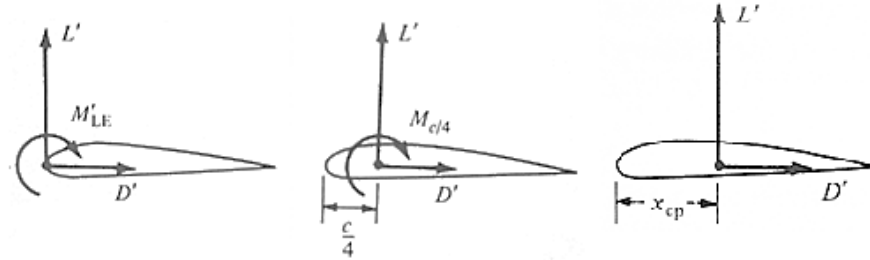
En casos cuando el ángulo de ataque del cuerpo es pequeño,  $\sin(\alpha) \approx 0$  y  $\cos(\alpha) \approx 1$ , la ecuación (1.13) se convierte en:

$$x_{cp} = -\frac{M'_{LE}}{L'} \quad (1.14)$$

Examinando las ecuaciones (1.13) y (1.14), a medida que N' y L' disminuyen,  $x_{cp}$  incrementa. A medida que las fuerzas se aproximan a cero, el centro de presiones se mueve al infinito. Por esta razón el centro de presiones no es un concepto muy conveniente cuando se habla de aerodinámica. Sin embargo, para definir un sistema de fuerza y momentos debido a las cargas distribuidas en un cuerpo se puede representar el sistema en cualquier punto siempre y cuando se



proporcione el momento en relación a ese punto dado. Por ejemplo la figura 1.10 ilustra tres maneras equivalentes de especificar un sistema de fuerzas y momentos para un perfil alar. En la figura de la izquierda la resultante es colocada en extremo delantero (LE) con un valor finito de  $M'_{LE}$ .



**Figura 1.10** Sistemas equivalentes para diferentes puntos en donde se coloca la resultante [1].

En la figura 1.10 en el perfil de en medio, la resultante es colocada a un cuarto de cuerda con un valor finito de  $M'_{c/4}$ . En la figura de la derecha, la resultante es colocada en el centro de presiones con un momento de valor igual a cero con respecto a ese punto. Por inspección de la figura 1.10, la relación entre estos casos es:

$$M'_{LE} = -\frac{c}{4}L' + M'_{c/4} = -(x_{cp})L' \quad (1.15)$$

### 1.3.6 Número de Reynolds

El número de Reynolds se define como:

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (1.16)$$

Donde:

- V es la velocidad del flujo de aire
- L es una distancia escogida apropiadamente que defina el patrón del flujo.
- $\nu$  es la viscosidad cinemática o viscosidad absoluta dividida entre la densidad:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.17)$$

- $\mu$  es la viscosidad absoluta
- $\rho$  es la densidad

Para entender de mejor manera el Número de Reynolds. La presión dinámica  $(1/2)\rho V^2$ , es la fuerza por unidad de área que es causada debido a la energía cinética de las partículas en movimiento convertida en presión al colisionar con un objeto. Es una fuerza de inercia proporcional a la presión dinámica por el área sobre la cual actúa [2].

$$\rho V^2 * L^2$$

Donde:

- L es una distancia característica

La fuerza de fricción que actúa sobre un área es:

$$\mu * \frac{V}{L}$$

Donde:

- V/L es la relación a la cual la velocidad cambia con respecto a la distancia en distintas capas del fluido.

Por esto,  $\mu * V/L$  es la fuerza de fricción por unidad de área, y

$$\left( \mu * \frac{V}{L} \right) * L^2 = \mu V L$$

es la fuerza debido a la fricción actual.

Finalmente, la relación entre la inercia y las fuerzas por fricción es proporcional a

$$\frac{\rho V^2 L^2}{\mu V L} = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{V L}{\nu} = Re$$

## Capítulo 2 Flujo Incompresible y viscoso

Se explicarán brevemente dos propiedades del flujo las cuales son fundamentales para él estudio de una carrocería tipo formula, así como los coeficientes aerodinámicos que ayudan a calificar un coche de éste tipo.

### 2.1 Compresibilidad

La compresibilidad se refiere al cambio de volumen ( $V$ ) de una sustancia sujeta a un cambio de presión. La cantidad utilizada para describir este fenómeno es el llamada módulo de compresibilidad [9].

$$E = \frac{-\Delta p}{\frac{dV}{V}} \quad (2.1)$$

Ya que las cantidades  $dV$  y  $V$  tendrían las mismas unidades, el módulo de compresibilidad tiene unidades de presión. Si una sustancia tiene poca compresibilidad significa que esa sustancia necesitaría un gran cambio de presión para producir un cambio pequeño en su volumen.

A un flujo cuya densidad es constante se le conoce como flujo incompresible. En contraste, cuando su densidad es variable se le conoce como flujo compresible. Flujos completamente incompresibles, donde la densidad es constante, no se encuentran de forma natural. Sin embargo, existen muchos problemas aerodinámicos que pueden ser modelados con la consideración de flujo compresible sin perder exactitud [1].

A los flujos de gases a bajos números Mach se les considera esencialmente incompresibles. Para  $M < 0.3$  es siempre seguro asumir que  $\rho = \text{constante}$  [1]. Este fue el régimen de vuelo para los hermanos Wright en 1903 y hoy en día sigue siendo el régimen para la mayoría de los aviones comerciales. En cambio, para números Mach de 1 y superiores el flujo es tratado como compresible. Pero este tipo de flujo no se tratará en este trabajo.

El flujo alrededor del cual se crea este trabajo es considerado subsónico. Se le llama flujo subsónico a un flujo cuyo número Mach es menor a 1 en todos sus puntos. El flujo subsónico se caracteriza por tener líneas de flujo suaves. Esto quiere decir que si se dibujara la trayectoria del flujo no se verían discontinuidades. Además, como la velocidad es de menor magnitud a la del sonido, las perturbaciones en el flujo se propagan corriente arriba y corriente abajo por igual dependiendo de la perturbación. El número Mach del flujo libre ( $M_\infty$ ) es menor a 1 pero esto no significa que el flujo sea subsónico alrededor de todo el cuerpo. Esto da lugar a una regla empírica; Un flujo con  $M_\infty < 0.8$  será un flujo subsónico si se esta hablando de cuerpos de curvas suaves, de no ser así se recomienda dar mayor tolerancia para poder asegurar que el flujo sea subsónico alrededor del cuerpo sólido [1].

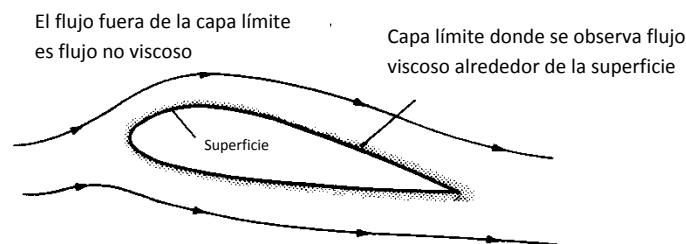
### 2.2 Viscosidad

Al hablar de fluidos se tiene que entender que las moléculas de este se mueven de manera muy distinta a las de un sólido. Las moléculas de los fluidos se mueven libremente y cuando lo hacen

estas están obviamente transportando su masa, energía y cantidad de movimiento de un lugar a otro dentro del fluido. Esto causa diversos fenómenos entre los que se encuentran la difusión de masa, viscosidad y conductividad térmica. Los flujos que presentan estos fenómenos son llamados fluidos viscosos. En contraste, un fluido que no presenta estos fenómenos es llamado flujo no viscoso. Los flujos no viscosos no existen en la naturaleza. Sin embargo hay muchos flujos aerodinámicos donde estos fenómenos presentan un efecto despreciable y se pueden modelar como flujos no viscosos [1].

Teóricamente, un flujo no viscoso se puede modelar cuando se plantea el límite a medida que el número Reynolds tiende a cero. Sin embargo, para problemas prácticos con un alto número de Reynolds se pueden asumir no viscosos. Para estos casos los fenómenos de fricción, conducción térmica y difusión son limitados a una región delgada pegada al cuerpo conocida como capa límite. Lo que se encuentra fuera de la capa límite puede considerarse fluido no viscoso.

Para el flujo alrededor de cuerpos suaves como el de la figura 2.1, la teoría de flujos no viscosos predice adecuadamente la distribución de presiones y la fuerza de sustentación del cuerpo. Por otro lado, debido a que la fricción (esfuerzo cortante) es de las causas principales del arrastre, la teoría de flujos no viscosos no puede predecir la cantidad total de arrastre del cuerpo.



**Figura 2.1** Visualización de la capa límite [1].

Existen flujos que son principalmente viscosos. Esto quiere decir que los efectos viscosos son dominantes. Por ejemplo, si el perfil alar de la figura 2.1 se inclinara incrementando el ángulo de ataque, entonces la capa límite tendería a separarse de la superficie, y se formaría una ola corriente abajo. A los cuerpos que presentan esta ola debido a la separación de la capa límite los dominan los efectos viscosos y la teoría para flujos no viscosos no sirve para analizar este tipo de flujos. Estos requieren añadir al análisis los efectos viscosos.

### 2.3 Coeficientes aerodinámicos

Para un análisis aerodinámico externo de un cuerpo se deben tomar en cuenta algunos coeficientes entre los cuales se encuentran el coeficiente de arrastre y el coeficiente de sustentación.

La idea básica para determinar coeficientes adimensionales para la sustentación y el arrastre es que el valor sea independiente de la velocidad y se relacione únicamente con la geometría del cuerpo.

### 2.3.1 Coeficiente de arrastre

El coeficiente de arrastre se encuentra en función de dos variables principalmente<sup>2</sup>. La primera el número Mach y la segunda es el número de Reynolds. Para el análisis de este trabajo en el que se trabaja con fluidos de bajas velocidades, esencialmente incompresibles el número Mach no es relevante. Por lo tanto, para flujos de baja velocidad el coeficiente de arrastre se encuentra en función del número de Reynolds. A continuación una imagen en donde se puede ver cómo es que varía el coeficiente de arrastre dependiendo de la geometría del cuerpo y del número de Reynolds. El número de Reynolds se muestra a la izquierda de cada inciso en la imagen y su coeficiente de arrastre se muestra a la derecha.

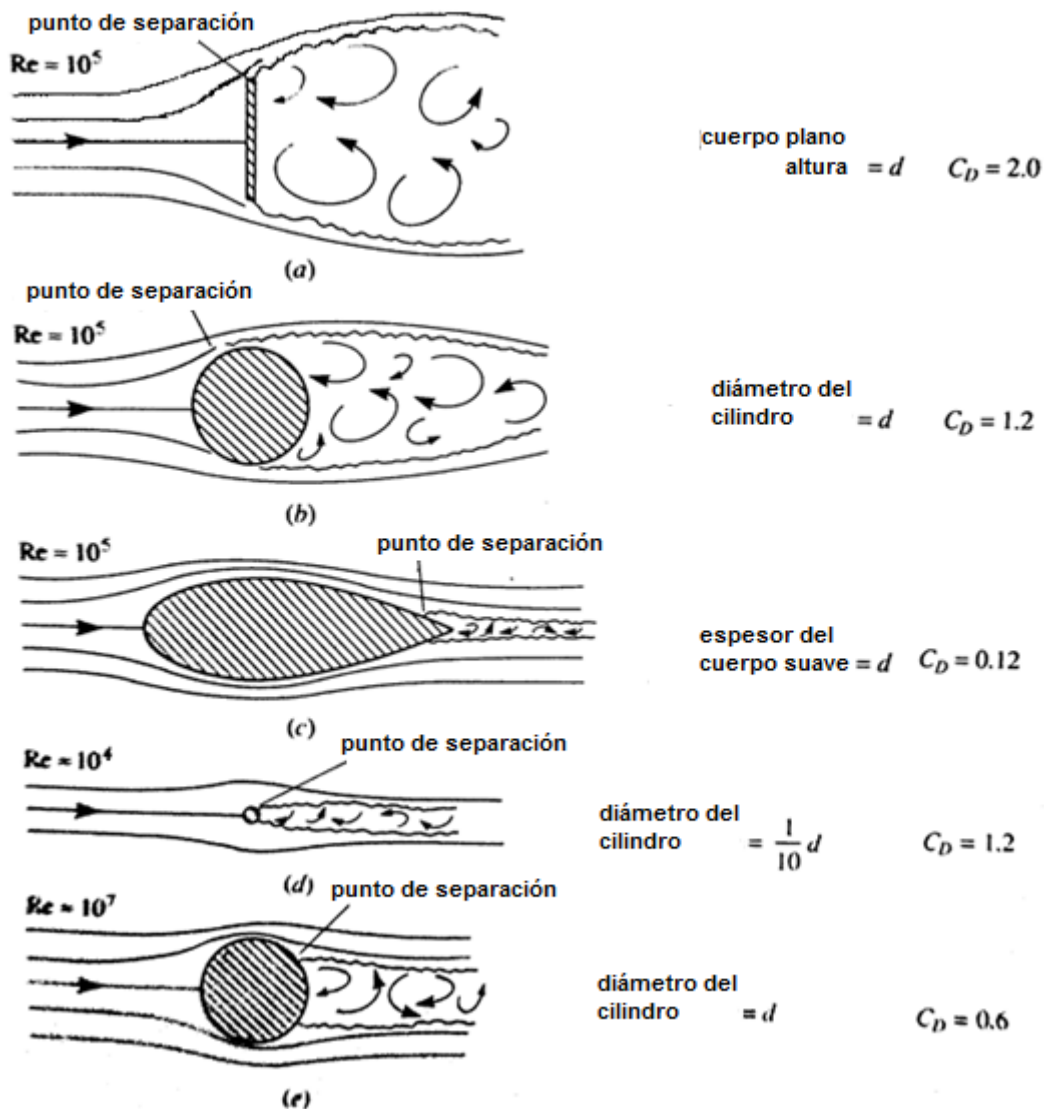


Figura 2.2 Coeficientes de arrastre para distintas geometrías [5].

<sup>2</sup> De un análisis dimensional llamado el teorema Buckingham PI se determina dicha relación.

En la figura 2.2 se puede ver que a medida que el cuerpo es más suave la ola o estela creada corriente abajo es más pequeña. Esta ola o estela es creada por la separación de flujo con una energía baja en la recirculación de este flujo dentro de la estela. Los tres primeros incisos tienen el mismo número de Reynolds y su distancia característica ( $d$ ) es la misma para todos. Se aprecia la relación entre la disminución del coeficiente de arrastre ( $C_D$ ) y la disminución del tamaño de la ola o estela. Esto muestra que a medida que la región del flujo separado es menor, será menor el coeficiente de arrastre.

Además, se aprecia como a medida que el número de Reynolds aumenta el coeficiente de arrastre disminuye. En el inciso a se tiene una placa plana paralela al flujo, esto produce la mayor cantidad de arrastre posible. El coeficiente de arrastre se puede calcular como:

$$C_D = \frac{D'}{q_\infty * S} \quad (2.2)$$

Donde:

- $q_\infty$  es la presión dinámica

$$q_\infty = \frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2 \quad (2.3)$$

- $D'$  es la fuerza de arrastre
- $S$  es el área frontal superficial por unidad de distancia

$$S = (d)(1)$$

- $d$  es la altura de la placa (“length” en la figura 2.2, inciso a)

El número de Reynolds también utiliza una distancia característica, en este caso  $d$ .

$$Re = \frac{\rho_\infty V_\infty d}{\mu_\infty} \quad (2.4)$$

Se observa también en la figura 2.2 como el inciso b) y d) tienen el mismo coeficiente de arrastre. Esto es a que a pesar de que el cilindro en el inciso d) tiene un menor diámetro, el Reynolds es menor. Sin embargo, ya que la fuerza de arrastre ( $D'$ ) está dada por  $D' = q_\infty S C_D$ , y  $S$  es diez veces más pequeña en el cilindro del inciso d) que en el del inciso b), la fuerza de arrastre será diez veces menor en el cilindro pequeño.

Para terminar con la figura 2.2, en el inciso e) el número de Reynolds es de  $Re = 1 \times 10^7$ . Considerablemente más alto que los otros incisos. Esto provocó una disminución en el coeficiente de arrastre a 0.6. Véase que en el inciso e) la ola de flujo separado es de menor tamaño indicando una posible relación entre estos.

Los valores mostrados en la figura 2.2 son valores que varían alrededor de dos cifras. Estos son los valores típicos para un coeficiente de arrastre. Para un número de Reynolds se puede ver que los valores típicos son altos. Por ejemplo: Si consideramos un cilindro con un diámetro de 1 metro a

nivel del mar ( $\rho_{\infty} = 1.23 \text{ kg/m}^3$  y  $\mu_{\infty} = 1.789 * 10^{-5} \text{ kg/m * s}$ ), a una velocidad de 27.778 m/s (100 km/h), tendríamos:

$$Re = \frac{\rho_{\infty} V_{\infty} d}{\mu_{\infty}} = \frac{(1.23)(27.7778)(1)}{1.789 * 10^{-5}}$$

$$Re = 1.91 * 10^6$$

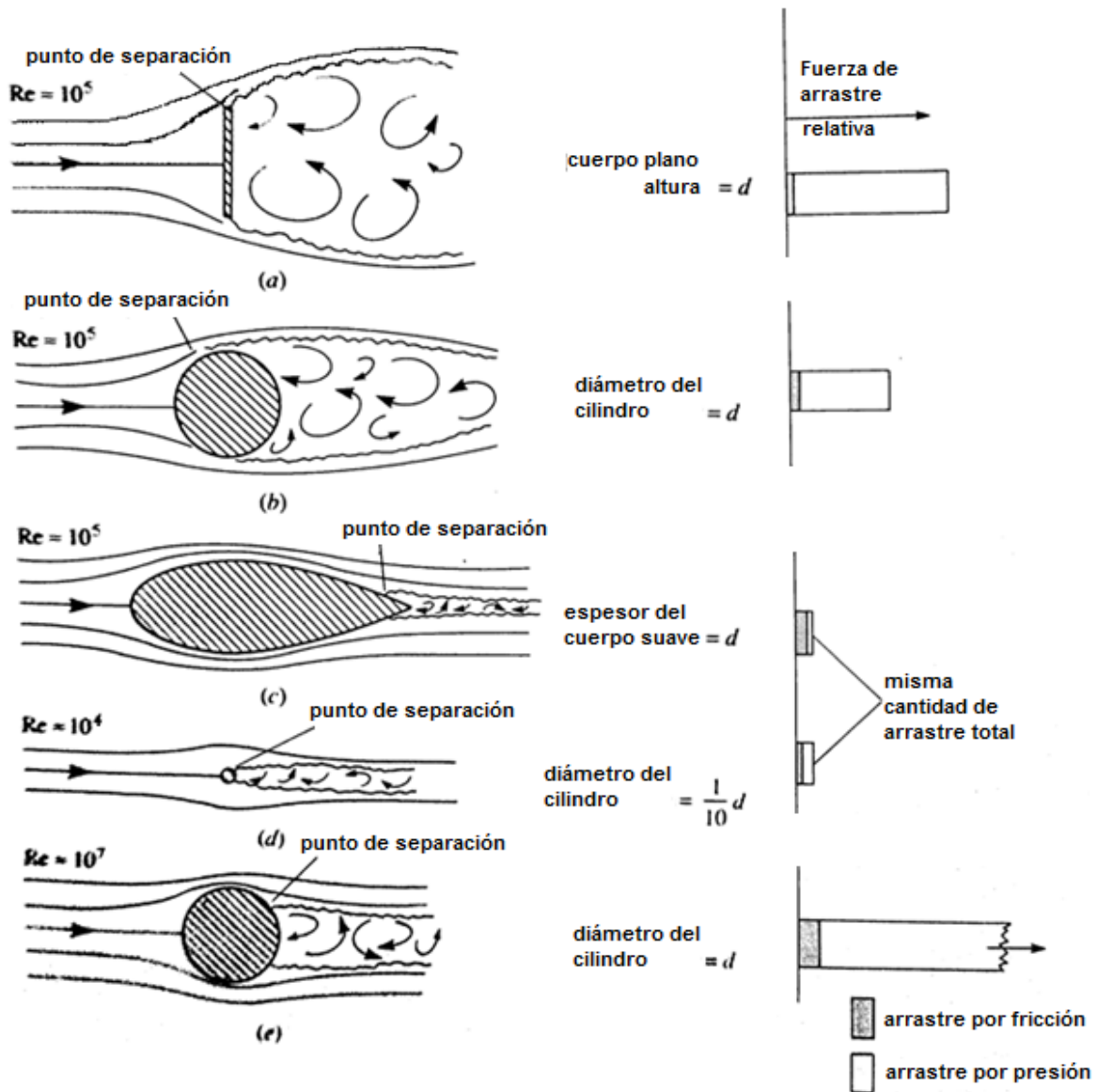
Como se puede apreciar, este número se encuentra en el orden de los millones. Por lo tanto los números de Reynolds que aparecen en la figura 2.2 se encuentran en un rango normal.

Continuando con el análisis del arrastre podemos tomar la figura 2.2 y observar como su ángulo de ataque es igual a cero. Por esto, la fuerza axial es igual a la fuerza de arrastre y la ecuación que describe esto es:

$$D' = \int_{LE}^{TE} (-p_u \sin \theta) dS_u + \int_{LE}^{TE} (p_l \sin \theta) dS_l + \int_{LE}^{TE} (\tau_u \cos \theta) dS_u + \int_{LE}^{TE} (\tau_l \cos \theta) dS_l \quad (2.5)$$

En donde los primeros dos términos componen el arrastre causado por presión y los últimos dos términos es el arrastre creado por fricción. Para análisis aerodinámicos se tiene que entender esta división [1].

En la figura 2.3 se muestra una comparación entre los efectos de las distintas causas de la fuerza de arrastre. Se utilizan los mismos cuerpos y velocidades que en la figura 2.2. La región gris muestra el arrastre por fricción y la región blanca muestra el arrastre por presión.



**Figura 2.3** Comparación relativa entre el arrastre por presión y el arrastre por fricción. [5]

Volviendo a comparar el arrastre entre los incisos (b) y (e) ahora podemos ver que en el inciso en donde el número de Reynolds es mayor, la fuerza de arrastre es mucho mayor a la del inciso b). Especial atención en los incisos (c) y (d) porque tienen la misma cantidad de arrastre. Podemos ver como la cantidad de arrastre por presión no es significativamente mayor a su arrastre por fricción. Por otro lado en los demás incisos el arrastre por presión es dominante. En algunos análisis aerodinámicos el arrastre por fricción es despreciado debido a que no afecta demasiado la exactitud de los cálculos. El arrastre por presión es causado debido a la separación del flujo como se aprecia en las figuras 2.2 y 2.3.

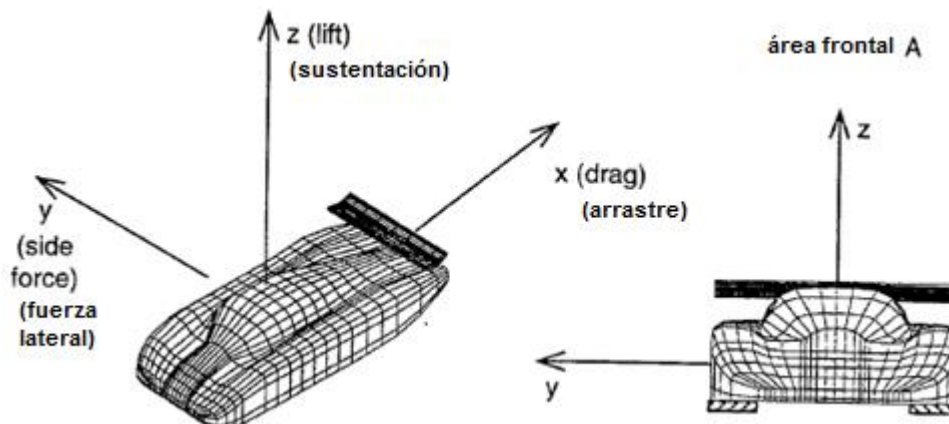


### 2.3.2 Coeficiente de sustentación

Una fuerza aerodinámica de sustentación en la parte delantera del coche fue percibida por Daimler-Benz durante un recorrido que impartió record en la autopista alemana en el periodo comprendido entre los años 1936 y 1939. A velocidades mayores a 200 mph Carraciola y Lang observaron que la parte delantera del coche parecía elevarse produciendo una pérdida en la sensibilidad de la dirección. En una carrera en la que se alcanzó una velocidad aproximada de 250 mph, Caracciola reportó una completa pérdida de control de la dirección, así como los observadores tuvieron la impresión de que las llantas delanteras se levantaron del suelo [2].

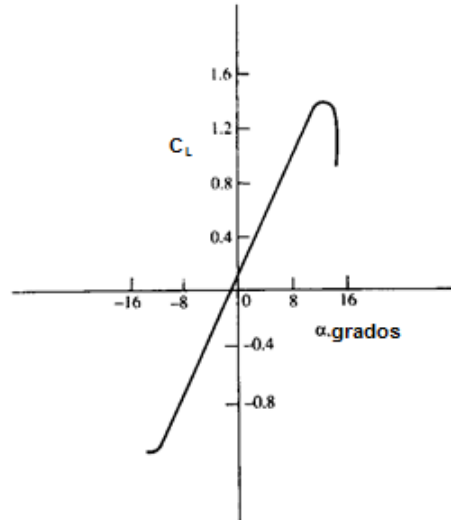
Un paso importante para la generación de fuerza de sustentación negativa (downforce) se dio en 1977 cuando Lotus introdujo un “efecto suelo” en su coche. Esto se puede apreciar en la figura 1.3 donde el salto en record de velocidad aumento drásticamente. Gracias una geometría apropiada debajo del coche así como el empleo de ductos laterales (side pods) se incrementó considerablemente la fuerza de sustentación negativa. Además, se aplicaron alerones delanteros y traseros para ayudar a la creación de fuerza de sustentación negativa. Este coche marcó la pauta para el desarrollo de efectos suelo y la creación de sustentación negativa en los demás equipos [2].

La fuerza de sustentación como se percibió desde sus inicios es normal al suelo. A diferencia de la fuerza de arrastre la cual tiene como dirección opuesta a la dirección del vehículo. Para los coches las fuerzas de sustentación y arrastre usan el sistema de referencia que muestra la figura 2.4.



**Figura 2.4** Sistema coordinado utilizado para definir la dirección de las fuerzas en un vehículo y al área frontal usada para definir los coeficientes adimensionales [3].

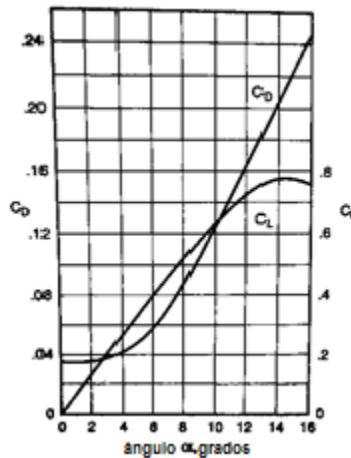
En cuanto al coeficiente de sustentación en la figura 2.5 podemos ver la relación entre el coeficiente de sustentación y el ángulo de ataque. Se observa como cerca de un ángulo de ataque de 14° existe un máximo en el coeficiente.



**Figura 2.5** Variación del coeficiente de sustentación ( $C_L$ ) con respecto del ángulo de ataque ( $\alpha$ ) para un perfil NACA 63-210.  $Re = 3 \times 10^6$  [1].

Algo importante es la relación entre la fuerza de sustentación y la fuerza de arrastre, llamada relación sustentación arrastre ( $L/D$ ). Para los aviones esta relación es de suma importancia. Aquellos cuya función principal es producir sustentación entonces el valor de esta relación debe ser alto [1].

Ahora, ambos coeficientes están relacionados y generalmente lo que se tiene que hacer es determinar que coeficiente te interesa desarrollar. Esto debido a que cualquier cambio en un coeficiente, este influirá en el otro coeficiente. En la figura 2.6 se observa la relación entre uno y otro.



**Figura 2.6**  $C_L$  y  $C_D$  para un plato plano (longitud/espesor = 6) [2].

De acuerdo a lo anterior a continuación se muestran dos tablas en donde se presentan de forma general de donde se producen las principales contribuciones al coeficiente de arrastre y

sustentación. Para cada coche la distribución de las causas puede variar, la siguiente tabla aplica para coches tipo coches de carretera o “road vehicles”.

Ubicación	$\Delta C_D$
1. Fricción superficial	0.04-0.05
2. Arrastre por enfriamiento	0.00-0.06
3. Flujo interno	0.00-0.05
4. Arrastre por geometría (separación del flujo)	0.00-0.45
5. Arrastre inducido por sustentación	0.00-0.60

**Figura 2.7** Rangos típicos de contribuciones al arrastre aerodinámico [3].

Del número 1 ya se habló y se demostró como el arrastre por fricción influye en el arrastre total. El número 2 se refiere al arrastre generado por la pérdida de cantidad de movimiento del aire al pasar por el intercambiador de calor. El número 3 incluye el flujo dentro del coche, por ejemplo cuando las ventanas están abiertas.

Como se puede ver en la figura 2.7 el arrastre por separación del flujo es considerable. Podría valer cero para cuerpos con curvas suaves. En el caso de vehículos con las llantas descubiertas el arrastre generado por las cuatro llantas puede llevar al coeficiente a valores por arriba de 1.00.

La relación entre sustentación y arrastre se hace evidente en el quinto elemento de la lista. Este puede ser generado por agregar elementos aerodinámicos como alerones. El valor de 0.60 aplica para vehículos con valores altos coeficiente de sustentación.

Ubicación	$\Delta C_L$
1. Geometría del vehículo	0.35 – (-0.10)
2. Alerones	0.00 – (-2.00)
3. Interacción alerón-carrocería	0.00 – (-2.00)

**Figura 2.8** Rangos típicos de contribuciones a la sustentación aerodinámica [3].

La geometría del vehículo influye en la creación de sustentación como lo probó el equipo Lotus en el año de 1977 al darle forma de ala invertida a su coche creando el efecto suelo. En cuanto a los alerones estos van desde cero ya que no se le agregarían si produjeran sustentación positiva. Así como las alas de un avión hacen que un avión se despegue del suelo, los alerones agregan adherencia del coche al suelo. Este efecto no actúa solo, pues el tercer elemento de la tabla es la interacción entre la carrocería y el alerón. Al analizar un cuerpo aerodinámico se pueden analizar los componentes por separado pero su efecto en el coche como un conjunto, es decir todos sus elementos, puede ser diferente al efecto de un elemento aislado. Esto se retomará en capítulos siguientes.

### 2.3.3 Coeficiente de presión

El tercer coeficiente adimensional se refiere a la relación entre la presión local y la presión del flujo libre.

Si  $p$  y  $V$  son la presión estática y la velocidad local respectivamente en algún punto de la superficie del cuerpo en el fluido y  $p_\infty$  y  $V_\infty$  son los valores del flujo libre entonces retomando la ecuación de Bernoulli tenemos:

$$\begin{aligned}p_\infty + \frac{1}{2}\rho V_\infty^2 &= p + \frac{1}{2}\rho V^2 \\p_\infty + q_\infty &= p + q \\p - p_\infty &= q_\infty - q \\\frac{p - p_\infty}{q_\infty} &= 1 - \frac{q}{q_\infty} \\\frac{\Delta p}{q_\infty} &= 1 - \left(\frac{V}{V_\infty}\right)^2\end{aligned}$$

Donde  $\Delta p/q_\infty$  se defina como coeficiente de presión  $C_p$ . Entonces:

$$C_p = 1 - \left(\frac{V}{V_\infty}\right)^2 \quad (2.6)$$

La relación entre  $V$  y  $V_\infty$  en un fluido incompresible ideal depende de la forma del cuerpo su orientación hacia el flujo y en especial la ubicación del punto en el cuerpo que se está analizando [2].

La presión real del punto en estudio se determina por medio de:

$$\Delta p = C_p q_\infty \quad (2.7)$$

$$p = \Delta p + p_\infty \quad (2.8)$$

Por ejemplo para una velocidad local de 200 mph en un punto del coche que va viajando a 100 mph se tiene un coeficiente de presión de:

$$C_p = 1 - \left(\frac{200}{100}\right)^2 = 1 - 4 = -3$$

Nótese como a este coeficiente es una medida de la presión local con respecto a una presión de referencia en este caso con la presión del flujo libre.

### 2.4 Ecuación de Bernoulli

Para poder llegar a determinar la ecuación de Bernoulli primero debemos entender ciertas cosas. Al utilizar la ecuación de Bernoulli en realidad se está haciendo uso de otras ecuaciones. La primera de ellas y una de las más importantes y más utilizadas es la ecuación de continuidad o comúnmente llamada ecuación de conservación de masa. No se explicará cómo obtener esa ecuación en este trabajo y si se requieren más detalles desde el punto de vista de la aerodinámica

se recomienda ir a las referencias del final, especial recomendación al libro de Anderson Jr [1]. Ahora viene esta ecuación fue determinada utilizando un volumen de control y el principio físico que la materia no puede ser creada ni destruida. La ecuación (2.9) presenta la ecuación de conservación de masa en forma diferencial.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (2.9)$$

Recordando que las propiedades de un fluido pueden ser descritas para un punto en específico la ecuación 2.9 efectivamente relaciona sus variables con un punto en el fluido. Esta ecuación aplica para cualquier fluido ya sea viscoso o no viscoso, estacionario o variable con el tiempo, compresible o incompresible y puede ser descrito en tres dimensiones. Para un flujo estacionario la ecuación 2.9 se simplifica quedando:

$$\nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (2.10)$$

Otra ecuación que es importante saber antes de Bernoulli, es la ecuación de conservación de cantidad de movimiento o conservación de momentum.

En primer lugar recordemos la segunda ley de Newton:

$$F = ma \quad (2.11)$$

Donde **F** es la fuerza ejercida en un cuerpo de masa **m** y **a** es su aceleración. Sin embargo, una forma más general de la segunda ley es la siguiente:

$$F = \frac{d}{dt}(mV) \quad (2.12)$$

La cantidad de movimiento o momentum en un cuerpo se define matemáticamente como el producto de la masa por la velocidad. Entonces, el principio físico utilizado aquí es que la fuerza equivale a la variación de la cantidad de movimiento con respecto del tiempo. Para entender la ecuación de cantidad de movimiento se debe saber que lo que se hace para llegar a ella básicamente es expresar la ecuación 2.12 en términos de variables conocidas como  $\rho$ ,  $V$ , etc. Para el lado izquierdo se debe saber que las fuerzas pueden ser debido a dos razones:

- a) Fuerzas de cuerpo.- son fuerzas que no requieren contacto físico como por ejemplo la fuerza creada debido a la gravedad o fuerzas de campos electromagnéticos
- b) Fuerzas de superficie.- son fuerzas que actúan sobre la superficie del cuerpo analizado dentro del fluido. Son fuerzas debido a presión y esfuerzo cortante.

Eso es para el lado izquierda mientras que para el lado derecho es la variación de cantidad de momentum en el fluido a medida que pasa a través de un volumen de control. Este término es la suma de dos términos:

- a) La resta de la cantidad de movimiento de salida menos la cantidad de movimiento de la entrada a través de la superficie. Básicamente la cantidad de movimiento cambia a medida que el fluido pasa a través del volumen de control.
- b) El cambio de cantidad de movimiento debido a fluctuaciones en las propiedades del flujo dentro del volumen de control.

Se observa un tensor de esfuerzos (T) haciendo quedar la ecuación de cantidad de movimiento de la siguiente manera:

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v \right) = \rho g + \nabla \cdot T \quad (2.13)$$

En la ecuación 2.13 se observan dos tipos de aceleración la aceleración temporal y la convectiva.

T es el tensor de esfuerzos mencionado previamente. Para tener la ecuación en términos de propiedades conocidas se utiliza una relación constitutiva que relaciona esfuerzos con velocidad e introduce términos nuevos como las constantes elásticas  $\lambda$  y  $\mu$ . Para una mejor explicación referirse a otras fuentes ya que no es objetivo de este trabajo describir la obtención de la ecuación de cantidad de movimiento. Finalmente, la ecuación es:

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v \right) = \rho g - \nabla P + (\lambda + \mu)\nabla(\nabla \cdot v) + \mu\nabla^2 v \quad (2.14)$$

A la ecuación 2.14 se le llama las ecuaciones de Navier-Stokes donde del lado derecho de la igualdad se aprecian la fuerza de campo ( $\rho g$ ), el gradiente de presión ( $\nabla P$ ), y lo que queda son las fuerzas viscosas.

Después de haber explicado las bases de lo que es la modelización matemática que será utilizada adelante en el trabajo se muestra a continuación ecuaciones en donde Bernoulli estableció una relación entre velocidades y presión. Es importante haber explicado lo anterior para entender de mejor manera en que ecuaciones se basan algunas otras.

La relación entre la presión y la velocidad en un flujo no viscoso e incompresible resulta de la siguiente manera:

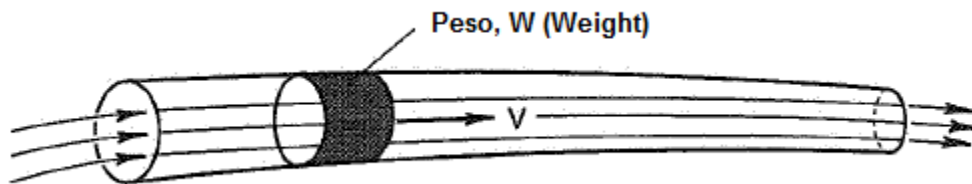
$$p + \frac{1}{2}\rho V^2 = \text{constante} \quad (2.15)$$

A la ecuación 2.15 se le llama ecuación de Bernoulli a pesar de que fue presentada por Euler de la forma en que se ve en la ecuación 2.15. A medida que la presión aumenta la velocidad disminuye y viceversa. La ecuación de Bernoulli se deriva de las ecuaciones de cantidad de movimiento y es presentada de la siguiente manera [1]:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 \quad (2.16)$$

Esta ecuación funciona para fluidos idealizados y habla de la conservación de energía en un fluido [2]. Esto para una persona que estudia la aerodinámica funciona adecuadamente. Las energías que se toman en cuenta y que según esta ecuación se conservan, son:

- Energía potencial- Para flujos automotrices esta energía se descarta
- Energía cinética- esta dada por  $(1/2) mV^2$ , donde m es masa y V es velocidad. Consideremos un volumen pequeño de peso W y velocidad V.



**Figura 2.9** Representación de un fluido de cierto volumen [2].

La energía cinética para ese volumen es:

$$KE = \frac{1}{2} \left( \frac{W}{g} \right) V^2 = \frac{1}{2} mV^2 = \frac{1}{2} (\rho * vol) V^2 \quad (2.17)$$

Y esto corresponde a trabajo requerido para acelerar esta masa de fluido hasta la velocidad V.

- Energía por presión – La presión actúa en todas las direcciones y la energía por presión es la energía necesaria para mantener el volumen digamos por ejemplo del fluido de la figura 2.9 para soportar la presión exterior. Este trabajo es igual a  $p * vol$ , donde p es la presión.

Por lo tanto en términos de las energías descritas se tiene que la energía total en ese tubo de la imagen 2.8 es:

$$(p * vol) + \frac{1}{2} (\rho * vol) V^2 \quad (2.18)$$

Al trabajar con fluidos es conveniente que se hable de términos por unidad de volumen donde como resultado la ecuación 2.15

$$p + \frac{1}{2} \rho V^2 = constante$$

Donde el segundo término del lado izquierdo es la presión dinámica (ecuación 2.3). Esta presión es la energía cinética de un fluido en movimiento que se convertiría en presión [2].

## Capítulo 3 Aerodinámica en coches de carreras

En los capítulos previos se describieron los fundamentos de la aerodinámica y se describió el flujo que se maneja en este trabajo. Ahora, se presentará como lo anterior afecta el rendimiento de un coche, siendo este específicamente de carreras.

El movimiento del aire alrededor de un vehículo en movimiento afecta todos sus componentes de una forma directa o indirecta. La entrada de aire al motor, el sistema de enfriamiento, ventilación interior, enfriamiento de las llantas y sobretodo flujo externo, caen dentro de la categoría de aerodinámica del vehículo. Sin embargo esta tesis se enfoca solamente en el flujo externo.

Cuando se refiere a coches de carreras se busca que este tenga la mejor aceleración en la dirección correcta. Al salir de la curva es sobretodo importante que el coche sea capaz de acelerar al máximo hasta llegar al siguiente punto de frenado que puede ser la siguiente curva o simplemente no frenar hasta alcanzar la velocidad máxima. Para lograr esto, el coche debe ser estable y para mejorar la estabilidad la aerodinámica puede llegar a ser un factor fundamental.

Las fuerzas y momentos aerodinámicos afectan los requerimientos mencionados de la siguiente forma [2].

- La sustentación negativa en los ejes delantera y trasero incrementan el desempeño en el balance direccional del coche.
- El arrastre es determinante en la aceleración del coche en línea recta y al momento de frenar en la desaceleración a velocidades altas.
- La fuerza aerodinámica lateral es importante para la estabilidad del coche.

De estos puntos, el factor más importante es la creación de sustentación negativa ya que esta afecta de manera positiva la aceleración de un coche en curvas, aumenta la tracción de las llantas al suelo, aumenta la capacidad de frenado e incrementa la estabilidad del coche en curvas [2].

Al momento de diseñar un coche de carreras además de la fuerza de sustentación y arrastre se debe diseñar en comunicación con varios sistemas del coche. Uno de los principales sistemas es chasis, ya que de la carrocería se le transferirán cargas al chasis y de ahí hasta las llantas. Durante el diseño del chasis Milliken y Milliken [2] recomiendan analizar la aerodinámica en estado estable para distintas situaciones:

1. Frenado en línea recta
2. Frenado en línea curva
3. A media curva
4. Aceleración en línea recta

El frenado en línea recta es importante ya que el arrastre tiene un efecto positivo al momento del frenado. El frenado en algunos coches de la formula 1 puede ser causado únicamente por el arrastre creado por dispositivos aerodinámicos sin necesidad de pisar el freno.



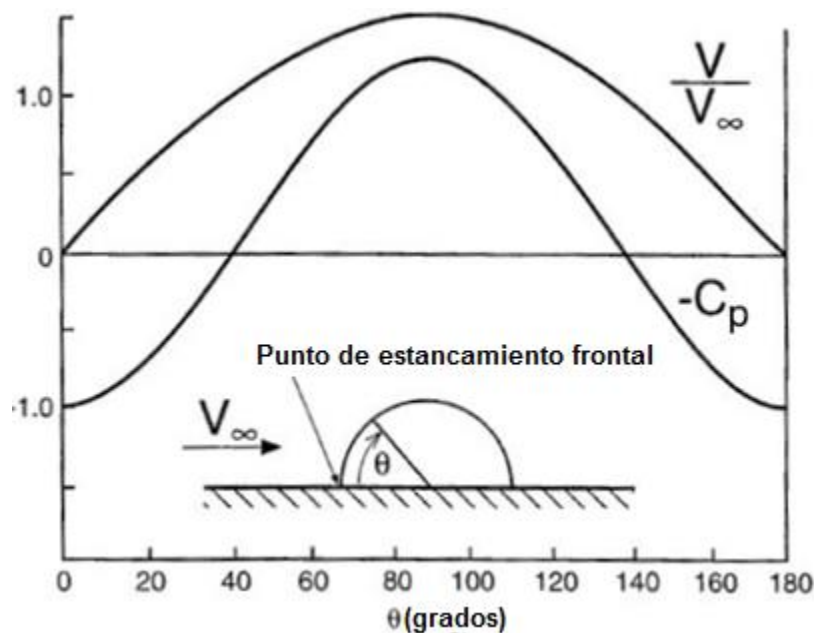
El frenado en línea curva se ve afectado principalmente por la fuerza de sustentación negativa. Si hay sustentación negativa en la parte trasera el coche se adhiere de mejor manera al camino e incrementa la estabilidad del coche. Cuando la sustentación negativa se encuentra en la parte delantera el coche se desestabiliza y esto le ayuda al coche a virar. Es importante tener un correcto balance de estos efectos en el coche.

Si hay sustentación negativa la velocidad en las curvas aumentará. Cuando un coche se encuentra virando se crea arrastre debido a las llantas. Con la carga negativa se reduce el ángulo de deslizamiento a pesar de que se incremente el arrastre del coche.

El arrastre aerodinámico limita la velocidad máxima de los coches. Disminuyendo el arrastre se le permite al coche incrementar una velocidad máxima. Algo que no se toma mucho en cuenta es que a velocidades máximas la aceleración está en función del el arrastre aerodinámico y de la potencia. A mayor velocidad mayor efecto en la aceleración [2].

### 3.1 Distribución de presiones en un coche

Primer se debe entender un poco la distribución de presiones en cuerpos. La geometría de un cuerpo influye en la velocidad del flujo alrededor de este y por ende en la distribución de presión. Si primero se analiza una media esfera, se puede empezar a entender mejor la relación presión-velocidad. En la figura 3.1 se puede ver graficada la velocidad con respecto a la velocidad del flujo libre y al coeficiente de presión.

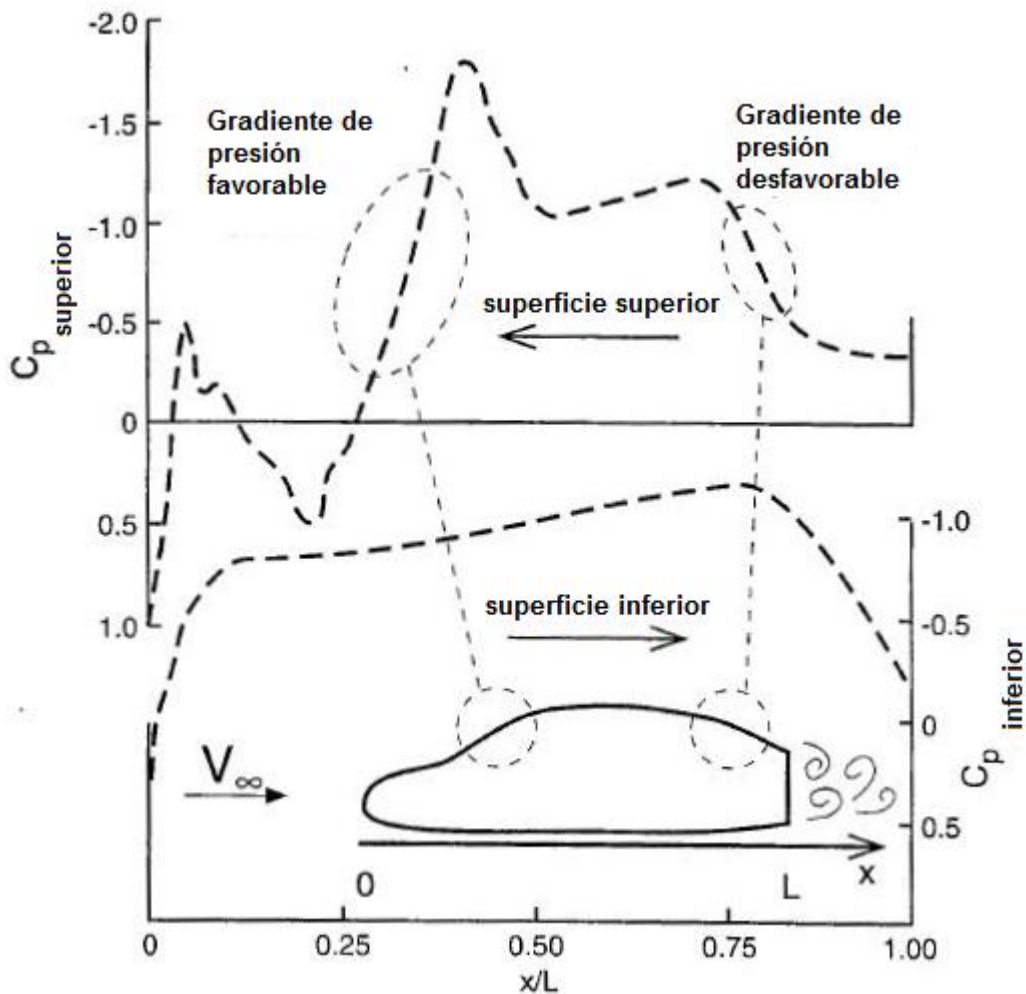


**Figura 3.1** Distribución de velocidad y centro de presiones negativo sobre la mitad de una media esfera a una velocidad de flujo  $V_{\infty}$  [3].

Se graficó la velocidad y el coeficiente de presiones negativo para que se pudieran graficar de manera sencilla. Al principio se observa un punto de estancamiento donde la velocidad es igual a cero y el coeficiente de presiones negativo es de -1. Es decir que en ese punto el coeficiente de presiones es de 1 (el máximo) y la velocidad es la mínima (cero). Al ser un cuerpo simétrico el

punto de estancamiento se vuelve a presentar en la parte trasera del cuerpo. En la parte media, a 90 grados se aprecia la máxima velocidad y el mínima coeficiente de presión. De la figura 3.1 podemos concluir que en general si la velocidad aumenta el coeficiente de presiones disminuye, la velocidad aumenta con el espesor del cuerpo en estudio y su presión disminuye.

Ahora se analizará una geometría de un coche estándar. En la figura 3.2 se observa como la geometría afecta la distribución de presiones pero en este caso la geometría es de un coche.

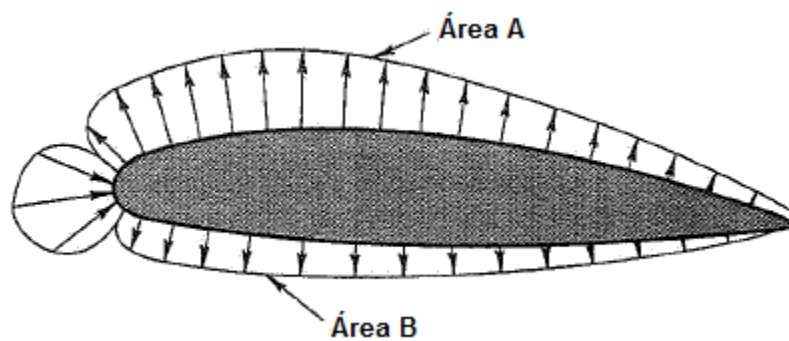


**Figura 3.2** Distribución de presiones sobre un automóvil bidimensional [3].

En la figura 3.2 se puede ver como al frente hay un punto de estancamiento en la que el coeficiente de presión es igual a 1. El flujo se acelera y el coeficiente se vuelve negativo. Al empezar la carrocería frontal el flujo disminuye su velocidad y la presión aumenta. El flujo acelera en la parte superior de coche donde se aprecia la presión más baja. En la parte trasera del coche sucede lo opuesto como en la figura 3.1, excepto que en este caso no existe un punto de estancamiento en la parte trasera. Esto se debe a que el flujo se separa detrás del vehículo y como resultado se tiene menor presión en la parte trasera del vehículo que en la parte delantera causando arrastre.

Cuando la presión disminuye debido a la geometría se le conoce como distribución de presiones favorable. En cambio cuando la presión aumenta se le llama como distribución de presión desfavorable. Cuando un flujo presenta una distribución de presión favorable, este no se desprende de la superficie. Además, la capa límite puede permanecer laminar por más tiempo debido a esta distribución. Esto ayudaría evitando la fricción y el arrastre. Al presentarse una condición desfavorable se induce una separación del flujo y la transición del flujo a turbulento. Al conocer la velocidad local y la distribución de presiones algunos programas computacionales pueden predecir el comportamiento de la capa límite [3].

Ahora veamos la distribución pero para un perfil alar. De esta manera puede verse más claro cómo es que la ecuación de Bernoulli y la distribución de presiones afectan un cuerpo en un fluido.



**Figura 3.3** Distribución de presiones alrededor de un perfil alar [2].

Nótese que la figura 3.3 las flechas se dibujaron perpendicular a la superficie. Esto debido a que se asume que no hay fuerzas cortantes en una idealización para ayudarnos a entender mejor la distribución de presiones.

El aire por arriba del perfil se mueve más rápido que en la parte inferior. Es por esto que la presión es menor en la superficie superior del perfil provocando un efecto de sustentación.

La ecuación de Bernoulli dice que se puede convertir la energía cinética en presión estática. Esta presión estática ejerce una fuerza sobre la superficie lo que se puede utilizar para generar sustentación negativa o positiva. Ya que la energía que se puede convertir en presión estática está dada por la ecuación 2.3 (presión dinámica) entonces se aprecia que esta depende del cuadrado de la velocidad y de la densidad del fluido. Por esto es que normalmente se logran mayores fuerzas de sustentación a mayores velocidades y que a medida que pasaban los años en las carreras y los coches alcanzaban velocidades más altas, la aerodinámica se hacía más evidente.

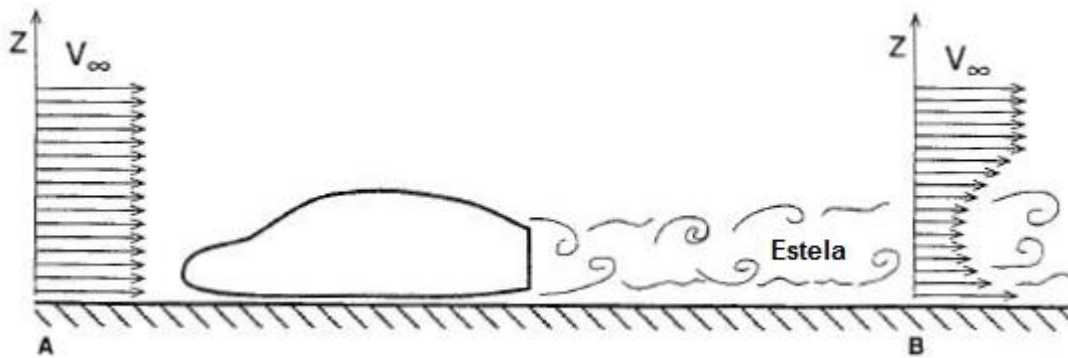
La diferencia de velocidades creada entre los cuerpos depende de la geometría del cuerpo y su ángulo de ataque. Por esto se debe prestar especial atención al diseñar un coche o alerones.

### 3.2 Estela

Cuando un cuerpo se mueve a través de un fluido este puede o no dejar una estela de fluido turbulento a su paso. Este flujo turbulento que un cuerpo deja a su paso algunos autores le llaman

estela. La estela se puede ver cuando un avión pasa a través de una nube y se aprecia como la geometría original de la nube es perturbada con vórtices que podrían parecer aleatorios.

La estela tiene su importancia aerodinámica ya que este rastro dejado por algunos cuerpos causa una pérdida de cantidad de movimiento o en otras palabras arrastre. Por ende si queremos disminuir al arrastre debemos primero saber que sucede en la estela.



**Figura 3.4** Estela detrás de un cuerpo parecido al de un coche [3].

En la figura 3.4 se observa la estela llamada “wake” en inglés. Para poder identificar como la estela afecta la aerodinámica del coche, primero hay que observar el campo de velocidades. Si realizamos medidas de la velocidad en un plano frente al coche podemos ver como las velocidades son similares sin importar a que altura se realice la medida. Por otro lado, detrás del coche vemos como las velocidades han sido alteradas y no son iguales. El efecto de la estela ha hecho disminuir las velocidades. Incluso a una distancia de 10 a 20 cuerpos atrás el campo de velocidades puede seguir alterado. Esta separación del flujo arrastra el vehículo hacia atrás, es por esta razón que algunos vehículos buscan erradicar al arrastre creado por la geometría. En la estela se pierde energía para mantener la turbulencia provocando una baja presión.

Dentro de la estela hay flujo que se mueve en dirección del coche y esto puede ser utilizado por un segundo vehículo que se mueva por detrás del primer vehículo. Este efecto es muchas veces utilizado en las carreras para bien o para mal. Por ejemplo, en vehículos donde la fuerza de sustentación negativa es importante, la estela puede disminuir la efectividad del alerón delantero del coche que viene detrás haciéndolo menos competitivo.



**Figura 3.5** Vórtices en la estela causada por un alerón trasero de un coche de carreras [3].

Normalmente, la estela tiene formas que se presentan como vórtices de forma periódica. Una forma frecuente en la que estos vórtices aparecen es detrás de los alerones en aviones y coches de carreras. Se presentan dos vórtices girando en sentido opuesto y normalmente giran como se muestra en la figura 3.5.

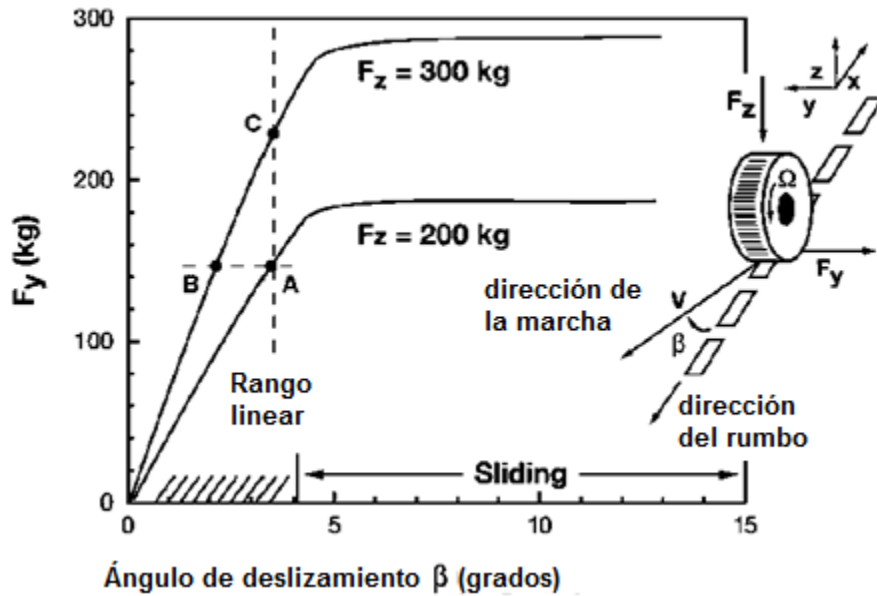
Un último ejemplo de la estela es cuando vas nadando detrás de una persona. Si alguna vez lo ha hecho o conoce a algún nadador él sabrá del efecto que causa nadar detrás de alguien. En esencia es lo mismo puesto que la primera persona está causando que las partículas de agua delante de él cambien de posición mientras que la persona detrás no tiene que invertir tanta energía puesto que el fluido ya se encuentra con cierto nivel de energía.

### 3.3 Relación de las llantas con la aerodinámica

Cuando se habla de automóviles de carreras una de las primeras cosas que se nos viene a la mente es un coche con llantas descubiertas. Además, instintivamente pensamos que las llantas pueden producir altas cantidades de arrastre.

Para poder empezar el capítulo, primero se debe entender cómo es que las llantas interactúan con la aerodinámica. Los coches de carreras vuelan hacia abajo empujando las llantas hacia el suelo así como los aviones usan las alas para iniciar el vuelo.

Las fuerzas aerodinámicas se utilizan para mejorar la adhesión de la llanta al suelo y de esta manera mejorar el desempeño del vehículo. Por ejemplo en la figura 3.6 se describen las fuerzas actuando en una llanta que se encuentra virando a cierta velocidad. La parte derecha de la imagen muestra tres fuerzas ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) actuando sobre la llanta alineadas al vehículo en un sistema de coordenadas cartesianas. En este caso, el vehículo se mueve en dirección  $-x$  pero debido a una fuerza la llanta se desliza a un ángulo  $\beta$  (ángulo de deslizamiento "slip angle").



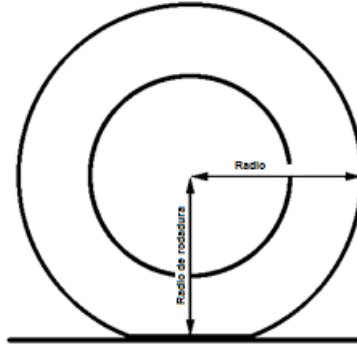
**Figura 3.6** Fuerza lateral contra ángulo de deslizamiento (slip angle), y de lado derecho el esquema de la llanta con las fuerzas [7].

Una fuerza es creada en la llanta que es proporcional a la fuerza normal y que inicialmente varía linealmente con respecto al incremento del ángulo  $\beta$  de deslizamiento (slip angle). La primera observación aquí es que para generar cierta fuerza lateral es necesario que exista un deslizamiento lateral. Cuando este ángulo es muy grande, generalmente mayor que 5 o 6 grados, el vehículo se está deslizando. Es importante hacer notar que para las llantas de vehículos comerciales al pasar esta barrera de comportamiento lineal la pendiente se vuelve negativa pero en este caso la figura 3.6 aplica para llantas de coches de carrera en donde el comportamiento es el que se encuentra en la gráfica en donde después del comportamiento lineal se presenta una tendencia constante. Véase ahora como en la figura 3.6 se muestran que a mayores fuerzas normales ( $F_z$ ) se soportan mayores fuerzas laterales ( $F_y$ ) y de la misma manera se podría tener un diagrama similar para las fuerzas longitudinales (tracción/aceleración o frenado/desaceleración) contra deslizamiento longitudinal. En este deslizamiento longitudinal el deslizamiento es la relación entre la velocidad del coche y la velocidad de rotación de las llantas (relación de deslizamiento).

$$S = \frac{(\Omega R_0 - V \cos(\alpha))}{V \cos(\alpha)} \quad (3.1)$$

Donde:

- $S$  la relación de deslizamiento
- $\Omega$  es la velocidad angular de la llanta (radianes por segundo)
- $V$  es la velocidad del eje en dirección del vehículo
- $R_0$  es el radio de rodadura (Rolling radius en la figura 3.7)



**Figura 3.7** Radio de rodadura (Rolling radius).

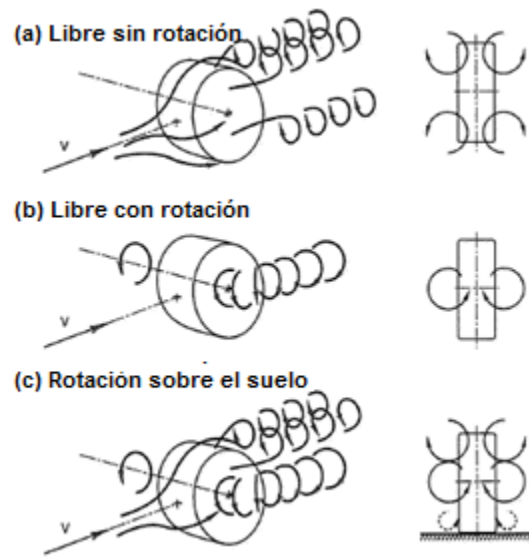
Como se mencionó previamente fue al final de los años sesentas cuando se empezó a notar la importancia de la aerodinámica y como esta mejoraba la tracción del vehículo y por ende la estabilidad del mismo.

Para sustentar la oración anterior se vuelve a ver la figura 3.6 y suponemos que tenemos una carga en dirección  $z$  de 200 kilogramos (kgf) que sería el peso del coche. Observando la figura se aprecia que la fuerza lateral que puede ser creada es poco menos de 200 kgf. Para simplificación se ignora la transferencia de peso y otros factores que tienen que ver más con la dinámica del vehículo que con la aerodinámica de este trabajo. Entonces, la figura 3.6 representa una condición estable de un coche a media vuelta en donde el punto A representa deslizamiento de la llanta, cabe mencionar que el derrape total de las llantas se encuentra grados más adelante. Sin embargo, con mayor fuerza aerodinámica (sustentación negativa) la fuerza en  $z$  puede incrementarse sin que el peso del coche cambie, resultando en un mejor desempeño.

Véase el punto B o el punto C de la figura 3.6. Si el conductor decidiera dar la vuelta a la misma velocidad (por lo tanto misma fuerza lateral) entonces la llanta requeriría menor ángulo de deslizamiento, y se desgastaría menos la rueda y se calentaría menos. Por otro lado, el conductor puede decidir dar la vuelta más rápido (punto C) y no corre riesgo que derraparse.

Esto servirá para ayudar a mejorar el desempeño de un coche en curvas al poder tomarse a mayores velocidades, la estabilidad lateral o incluso incrementando la aceleración al salir de la curva [7].

Otro factor importante al hablar de las llantas es el efecto que tienen en el aire. No solo son los receptores del efecto de sustentación, sino importantes creadoras de turbulencias que generan arrastre. Para entender lo que sucede cuando el aire se encuentra con las llantas hay que fijarnos en la figura 3.8.



**Figura 3.8** Patrones de flujo alrededor de las llantas en tres diferentes configuraciones [2].

Primero, el inciso a de la figura 3.8 es una llanta que no está ni girando ni tocando el piso y a pesar de eso nos sirve para tener una primera impresión de lo que es el aire alrededor de una llanta. En el inciso b se tiene una llanta girando lo cual ya se acerca más a la realidad de un estado familiar para nosotros al pensar en una llanta de un coche de carreras. El inciso c muestra una llanta rotando con la presencia de suelo. Observaciones experimentales permitieron determinar las posibilidades de trayectoria de un fluido al encontrarse con una llanta.

Esto cobra importancia ya que como se mencionó, las turbulencias crean zonas de fluido en donde la energía se está utilizando para seguir con la trayectoria turbulenta. Esto puede causar arrastre y como ya el lector debe saber, el arrastre es algo que comúnmente no es deseado.

Para evitar este tipo de arrastre muchas veces se aplica un alerón delantero el cual no solo tiene como función producir sustentación negativa sino que conduce el aire hacia las llantas y de esta manera tener cierto control sobre el posible arrastre que se creará en estas.

### 3.4 Fuerza de sustentación negativa

Downforce o sustentación negativa como se le conoce es una de las fuerzas más importantes para un coche tipo formula. Sin embargo no porque esta sea de suma importancia eso significa que siempre se deba diseñar con solo ese propósito. Un coche se debe diseñar de acuerdo a como va a trabajar. De hecho cada pista requiere diferentes configuraciones aerodinámicas. Primero hay que saber cómo producir Downforce o sustentación negativa y saber qué es lo que más conviene dependiendo de tus circunstancias.

Desde el inicio de la aerodinámica aplicada a los coches de carreras se buscaba tener coches con curvas suaves para disminuir la resistencia del aire al avance del coche. Además de que las curvas suaves mejoraban la estética del coche en efecto aumentaban el rendimiento del coche. Lo que sucedió cuando empezaron a notar la fuerza de sustentación fue que se agregaran aditamentos al

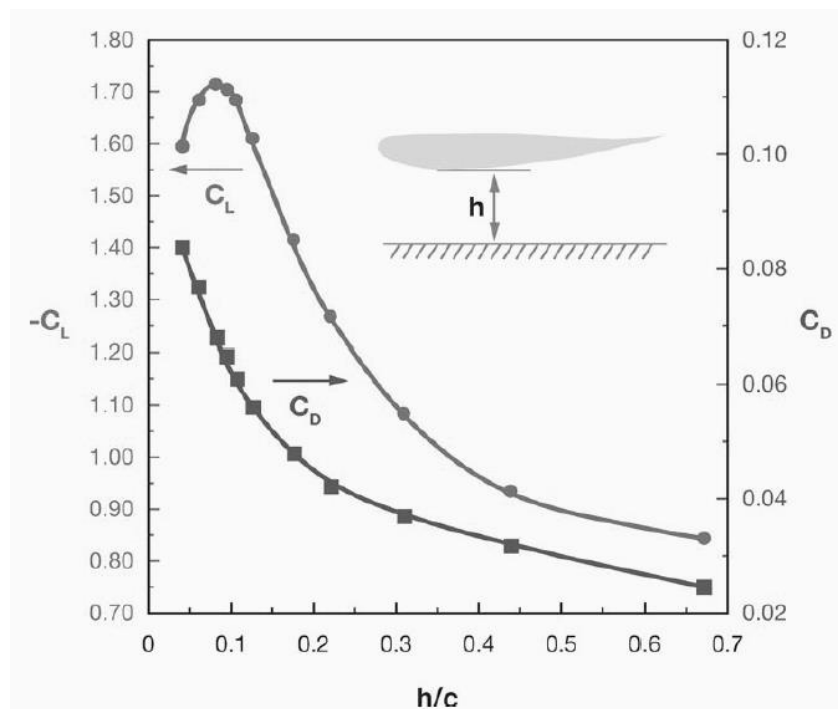


coche. Lo más lógico parecía utilizar alas invertidas. Claro que esto no vino sin complicaciones. La carga aerodinámica agregada es proporcional al cuadrado de la velocidad y esta carga tiene que ser recibida por el sistema de suspensión. El amortiguador utilizado entonces debe adecuarse para la carga que puede recibir el coche debido a los alerones.

La fuerza de sustentación negativa puede crearse de distintas maneras. Los primeros que analizaron esto fueron los que han estudiado los alerones y han determinado puntos clave para su entendimiento.

- a) Los alerones no funcionan como alas de avión invertidas puesto que los alerones tiene el efecto de estar a una corta distancia del piso.
- b) Hay una relación estrecha entre los alerones y todos los demás componentes (otros alerones, ductos laterales, carrocería, llantas, etc.) del coche en lo que se refiere a aerodinámica.

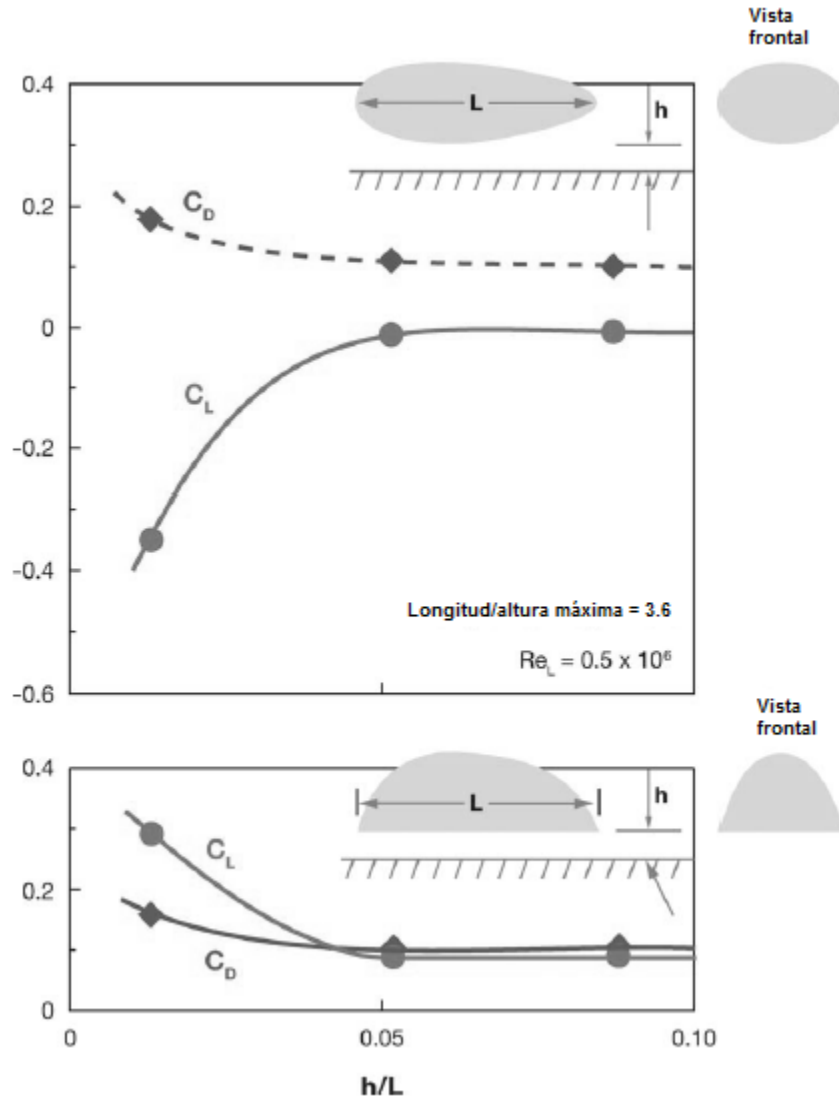
Otra forma de crear sustentación negativa es utilizando el efecto suelo. La sustentación positiva o negativa se potencia cuando las alas están cerca del suelo [7]. Sin embargo, esta ganancia no se da sin tener repercusiones. El incremento de este efecto incrementa el arrastre. Al hablar de alerones cuyo objetivo es la creación de sustentación negativa es mejor cuidar factores como la distancia al suelo, el ángulo de ataque y espesor ya que estos pueden incrementar el efecto creado. Sobre todo, se ha descubierto que la distancia al suelo es uno de los factores más importantes y con mayor influencia en los alerones y aditamentos diseñados para crear sustentación negativa.



**Figura 3.9** Sustentación negativa “downforce” contra distancia al suelo para un perfil LS(1)-0413 [ $\alpha=-1^\circ$ ,  $Re=2 \times 10^6$ , pruebas hechas con el suelo moviéndose] [7].

Como se aprecia en la figura 3.9 a medida que la altura disminuye el coeficiente de sustentación ( $C_L$ ) disminuye y puesto que un coeficiente de sustentación negativo significa fuerza de sustentación negativa entonces es bueno para los propósitos antes expuestos. Por otro lado vemos que a mayor sustentación negativa mayor arrastre. Para que un estudio de los efectos de un cuerpo cerca del suelo tenga mayor validez es necesario que el lugar, generalmente un túnel de viento, donde se realizan las pruebas tengan la capacidad de simular el movimiento del piso ya que estando tan cerca del mismo un piso estático afectaría enormemente los resultados.

Una vez descubierto el efecto suelo y su beneficio en las carreras este no solo se limitó a los alerones. Los diseñadores empezaron a experimentar con la geometría de la carrocería. Se hizo evidente como a mayor área mayor efecto de sustentación. Por ejemplo, si un avión necesita mayor sustentación entonces una de las tantas soluciones sería incrementar el tamaño de las alas. Sin embargo, una vez más no se trata de la misma física para un avión que para un coche de carreras donde el suelo se encuentra a poca distancia. Para entender el flujo debajo de un cuerpo que se encuentra cerca del suelo se realizaron diversos experimentos entre los cuales Joseph Katz [7] reportó algo de suma importancia para entender la creación de sustentación negativa en un coche. La distancia entre un cuerpo y el suelo, así como la geometría del cuerpo.



**Figura 3.10** Efecto de la proximidad en el arrastre y sustentación de dos elipsoides [7].

En la figura 3.10 se muestran dos cuerpos a  $h$  distancia del suelo. En la imagen superior de la figura 3.10 el aire es obligado a acelerar debajo del cuerpo y por ende sustentación negativa es creada debido a su proximidad con el suelo. Sin embargo la imagen inferior con la misma área no produce la misma sustentación negativa. Es más, a medida que  $h$  disminuye en la imagen inferior, la sustentación aumenta lo cual no es algo que se busque en coches de carreras.

De todo esto se deducen dos conclusiones:

- Es benéfico acelerar el aire debajo del coche utilizando la geometría del mismo para disminuir la presión y crear sustentación negativa.
- Otra opción es crear sustentación negativa colocando alerones lo más cerca posible del suelo.

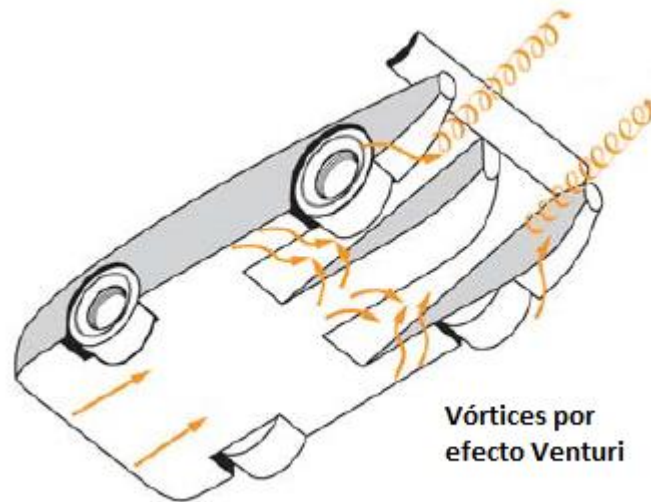
- Una tercera opción es sellar la parte debajo del coche dejando abierta la parte trasera lo que creará un vacío debajo del coche y por ende sustentación negativa. Así, la presión debajo del coche sería la misma que la presión detrás del coche. Claro que esta opción está sujeta a las reglas de la competencia y la categoría del coche que se está analizando.

Sabiendo esto, los analistas dedicaron esfuerzos a tratar de controlar la baja presión debajo del coche independientemente de la velocidad de este. Y así fue como se crearon los coches de succión. Este tipo de coches usaron sistemas auxiliares para alimentar dos ventiladores detrás del vehículo. Se sellaba la parte delantera y lateral debajo del coche y el aire que se metía debajo era succionado por los ventiladores asegurándose así de que la presión fuera controlada. Estos vehículos presentaban muchas ventajas y debido a esto fueron ganadores en diversas competencias desde el día uno. Por ejemplo en la fórmula 1 en 1978 se presentó un vehículo de succión resultado ganador. Obviamente los competidores no lo recibieron de la mejor manera y para el siguiente año se prohibió usar sistemas de succión. Es por esto que no se ven en las carreras y como se mencionó anteriormente es importante verificar las reglas de la competencia de los coches que se están analizando.

Al dejar fuera esa alternativa, la opción a desarrollar fue la creación de baja presión acelerando el flujo de aire a causa de la geometría de la carrocería inferior del coche. Lotus 78, formula 1, primer auto que desarrolla y presenta resultados exitosos en una competencia oficial utilizando el efecto suelo. El diseño consistía en ductos laterales “side pods” con forma de ala invertida. Esta geometría funcionó perfectamente. Años después, la sustentación negativa creada ya superaba incluso el peso de los coches. Esto último debido a la adición de un borde “skirts” que sellaba los laterales de los ductos laterales. Este borde sin embargo presentó dificultades ya que debido a su cercanía al suelo solía dañarse debido a imperfecciones en el pavimento, causando pérdidas de sustentación catastróficas. Los bordes se encontraban pegados al suelo evitando la entrada de aire a la parte inferior del coche. Un posible daño del pavimento creando una brecha en estos bordes podía resultar en la pérdida del 50% de la sustentación negativa. Al analizar que esto se presentaba debido a irregularidades en el pavimento el coche que se dañaba perdía sustentación en menos de segundos con la gran posibilidad de causar un accidente. La pérdida de sustentación se puede traducir en pérdida de tracción de las llantas afectando al piloto y al mismo coche.

Los bordes (skirts) fueron prohibidos por razones de seguridad y los diseñadores se enfocaron en geometrías tipo ala invertida. Fue por esto que surgieron los túneles o difusores. Sabiendo que la sustentación negativa puede crearse sin necesidad de los bordes los diseñadores se enfocaron en perfeccionar los llamados túneles que ya sabían que si servían. Gracias al apoyo de compañías de automóviles que también presentaron interés en el desarrollo de los difusores, se pudieron perfeccionar. Por ejemplo al variar el ángulo del difusor la sustentación se veía afectada [7]. Se observó también como al variar la posición de la parte más baja del coche se puede variar el centro de presiones del coche [7]. Al variar el centro de presiones del coche se modifica la estabilidad del coche lo cual es crítico para un coche de carreras.

Antes de entrar de lleno al tema del difusor es importante mencionar el objetivo del difusor. El objetivo principal del difusor es disminuir la velocidad del aire para reducir el arrastre e incrementar la eficiencia del piso plano cuya función es acelerar el aire a poca distancia del suelo. Es importante mencionar que el difusor no expande el aire ya que normalmente se podría pensar que para eso sirve el difusor.



**Figura 3.11** Visualización de los vórtices creados en un difusor [7].

Se identificaron dos vórtices en los bordes laterales del difusor. Parece que el flujo debajo del coche tiende a separarse a la entrada del difusor y se vuelve a unir a la superficie por medio de los vórtices laterales. Un conjunto de estudios mencionados en [7] demostraron que la pérdida de sustentación negativa se debe a una combinación de la separación del flujo con la ruptura de los vórtices. Se estudiaron difusores desde  $5^\circ$  a  $20^\circ$  y se clasificaron en: difusor de ángulo inferior en los que la principal causa de pérdida de sustentación negativa es debido a la ruptura de los vórtices. Mientras que los difusores de ángulo superior la combinación mencionada previamente es la causa.

En la figura 3.11 se observan los vórtices causantes de que el flujo que tiende a desprenderse vuelva a unirse a la superficie. En la misma figura se observa también como se crea una succión del aire a la entrada del difusor. Los vórtices son llamados vórtices de Venturi debido al efecto que determina el comportamiento del fluido en el difusor. El efecto Venturi se caracteriza por crear un incremento de la velocidad hasta alcanzar una máxima y después empezar a disminuirla hasta alcanzar la velocidad del flujo libre. La ecuación de Bernoulli nos dice que cuando la velocidad aumenta la presión local disminuye. Con la presión baja en esta zona y una presión mayor en la parte superior de la carrocería se crea la fuerza de sustentación negativa. De la misma manera que el efecto Venturi depende de la sección geométrica que está creando el efecto, la eficiencia del difusor se encuentra ligada a su geometría [6]. Lo ideal es tener un mayor ángulo sin que se presente separación del flujo. Se reitera que la separación del flujo causa pérdida de sustentación

negativa e incrementa el arrastre. Hay distintos estudios que presentan diversos resultados entre los cuales nos indican que el mejor ángulo del difusor es de  $5^\circ$  [8]. Solo hay que tomar en cuenta que esos resultados dependen de varios factores, y se debe considerar principalmente si el estudio fue realizado para dos o tres dimensiones. En este caso en el que se recomienda un ángulo de  $5^\circ$  el estudio fue hecho en dos dimensiones. Por otro lado, estudios hechos en tres dimensiones muestran como el efecto de los vórtices es determinante para incrementar la eficiencia de los difusores. Lo que hacen los vórtices es añadir energía al flujo por medio de un componente rotacional disminuyendo la presión a lo largo del mismo. También, retarda la separación del flujo.

Es por esta razón que los diseñadores se podrían enfocar en la creación de vórtices. Con esto se puede empezar a hablar de aditamentos generadores de vórtices lo cual este trabajo no abarca.

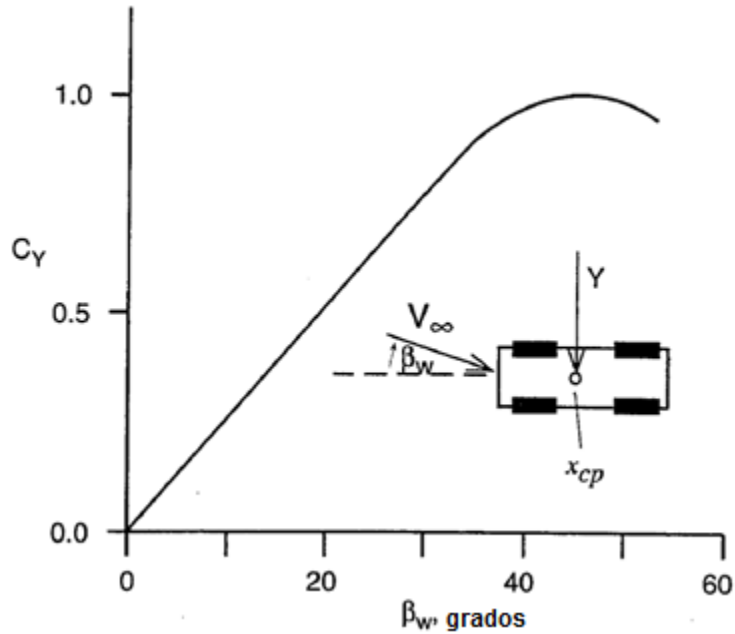
Para entender cómo crear sustentación negativa en un coche es importante entender que existe una estrecha relación entre el dispositivo utilizado, ya sea el efecto suelo con difusor o alerones, y la geometría de la carrocería del coche. Según estudios mencionados por Joseph Katz [7] el efecto conjunto del paquete aerodinámico puede ser mayor que la suma de los efectos que presentaron el paquete aerodinámico y la carrocería por separado. Pero no se debe tomar el resultado de un estudio como dogma ya que la aerodinámica de cada coche es distinta. Es importante conocer los artículos de sociedades de renombre y de las universidades así como también se deben probar siempre configuraciones diferentes para cada coche, de esta manera se han descubierto cosas nuevas. A veces hacer algo que parecería ir contra la lógica podría ser lo correcto.

### 3.5 Efecto de vientos laterales

Hasta ahora, los efectos de los vientos laterales no han sido mencionados como algo importante, sin embargo esto no es cierto todo el tiempo. Estos efectos son importantes cuando la velocidad del viento lateral es casi de la misma magnitud que la velocidad del coche. Así como la fuerza de arrastre y sustentación se ejercen sobre los ejes  $x$  y  $z$  respectivamente (figura 2.4), existe también una fuerza lateral sobre el eje  $y$ .

Generalmente se presentan dos posibles situaciones en donde se pueden observar los efectos de los vientos laterales. La primera posible situación es cuando se está manejando el coche en zonas abiertas en donde los vientos no se rijan por obstáculos del entorno. La segunda posibilidad es cuando se está saliendo de una zona donde existen vientos laterales. El cambio brusco de estos vientos laterales, por ejemplo la desaparición de estos, pueden causar la desestabilización del coche por medio de oscilaciones laterales de este.

Para medir la dirección del viento se utiliza el ángulo  $\beta_w$ . La  $w$  es por viento en inglés "wind". A medida que el ángulo varía el coeficiente lateral también varía. En la figura 3.12 se observa esta relación. El coeficiente de fuerza está normalizado simplemente para ver la comparación contra el ángulo  $\beta_w$ .



**Figura 3.12** Ángulo  $\beta_w$  contra coeficiente de fuerza lateral, vista superior del coche con resultante actuando sobre el centro de presiones [3].

Como se ha mencionado antes, es posible reemplazar un conjunto de fuerzas con una resultante. En la figura 3.12 se muestra la resultante actuando en el centro de presiones del coche. Se observa también como al incrementar el ángulo  $\beta_w$  la fuerza lateral aumenta.

### 3.6 Centro de presiones

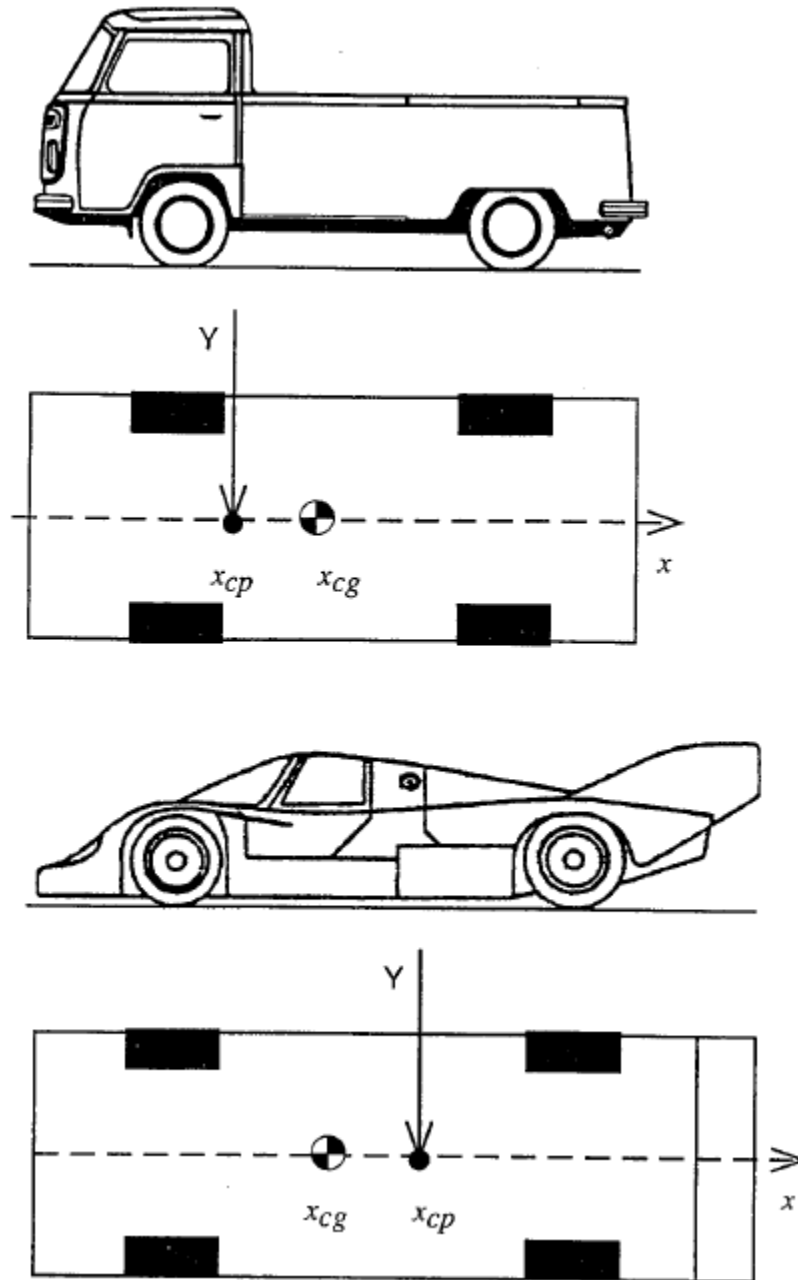
Poniendo atención al centro de presiones, generalmente se observa que en los vehículos de pasajeros el centro de presiones se encuentra delante del centro de gravedad del coche. Esta relación de distancias entre centro de presiones y centro de gravedad del coche se vuelve importante al tener altas velocidades donde se producen altas cargas aerodinámicas.

Por ejemplo, en la figura 3.13 se muestra un camión pequeño de carga el cual tiene su centro de presiones delante del centro de gravedad. Esto quiere decir que en la presencia de perturbaciones del suelo en combinación con altas velocidades generarán carga aerodinámica lateral. En esta situación en piloto tendría que estabilizar la dirección para mantener el vehículo en la dirección deseada.

Es por esa razón que los vehículos de carreras tienen el centro de presiones detrás del centro de gravedad. Lo que se ha descubierto sirve para mover el centro de presiones a una posición trasera es agregar platos laterales a los alerones traseros y ventiladores en la sección trasera del coche, incrementando la estabilidad del coche.

La distancia entre el centro de presiones y el centro de gravedad del coche se llama margen estático. Para tener un vehículo, aviones incluidos, aerodinámicamente estable se debe tener el

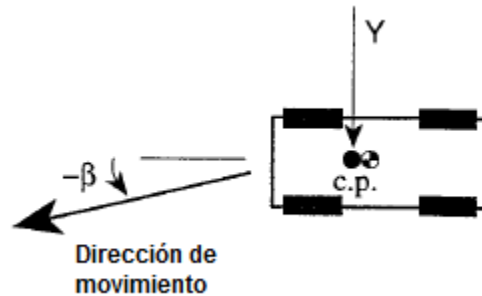
centro de presiones detrás del centro de gravedad [3]. Además, mientras mayor sea el margen estático mayor será la estabilidad del vehículo. Es importante aclarar que esta estabilidad de la que se está haciendo mención es la estabilidad tomando en cuenta cargas aerodinámicas. La estabilidad del vehículo está determinada por las llantas. Por ende, a bajas velocidades el efecto es despreciable.



**Figura 3.13** Posiciones típicas del centro de presiones y centros de gravedad dependiendo de la categoría del vehículo [3].



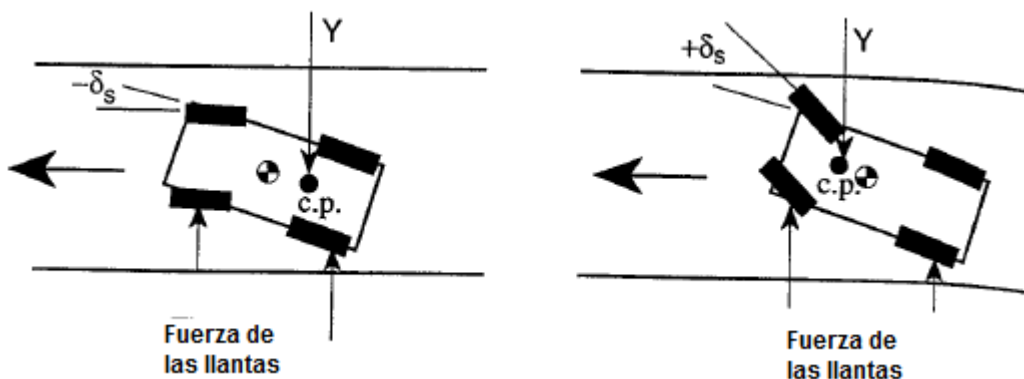
Para entender el porque es mejor tener un centro de presiones detrás del centro de gravedad véase la figura 3.14 donde un vehículo se mueve en línea recta en estado estable. En este estado permanente existe un viento lateral que produce una fuerza  $Y$  actuando en el centro de presiones que se encuentra por delante del centro de gravedad. Esto causa que las llantas tiendan a deslizarse en una dirección que apunta hacia  $\beta$  negativo. Esto se traduciría a que el piloto bajo estas condiciones tendría que virar la dirección ligeramente en dirección opuesta del viento para que las fuerzas creadas por el deslizamiento lateral de las llantas se contrarresten con la fuerza lateral causada por el viento [3].



**Figura 3.14** Deslizamiento causado por vientos laterales (fuerza lateral  $Y$ ) [3].

No solo esto afecta al piloto, sino que ahora se le agrega la variable del margen estático. Si el centro de presiones se encuentra por delante del centro de gravedad las llantas delanteras deben ejercer una fuerza de reacción mayor para contrarrestar la fuerza lateral ( $Y$ ). Además se debe girar el volante cierto ángulo en dirección opuesta de la fuerza lateral.

Si el centro de presiones se encuentra detrás del centro de gravedad el piloto debe virar en dirección del viento y la reacción que las llantas delanteras deben crear es menor como se puede apreciar en la figura 3.15.



**Figura 3.15** Redireccionamiento del vehículo debido a vientos laterales causando una fuerza lateral  $Y$  [3].

Al ser menor la fuerza de reacción de las llantas delanteras donde normalmente se encuentra la dirección del coche se incrementa la estabilidad del coche.

Ahora, esta explicación se ha hecho con respecto a la estabilidad lateral, pero lograr esta estabilidad no es tarea fácil. Cuidar que las fuerzas de reacción sean mayores en las llantas traseras no es algo que se logre sin comunicación entre varios sistemas. Además, el reto aumenta a medida que la velocidad aumenta ya que esto incrementa las fuerzas y momentos aerodinámicos. Sobre todo la rigidez con que se ajusta la suspensión es de vital importancia ya que no se presentarán las mismas cargas a lo largo de toda la carrera. Por esto se deben plantear distintas configuraciones de los dispositivos aerodinámicos dependiendo de la pista o de la prueba a la que será sometido el coche de carreras. La relación entre la suspensión y la aerodinámica es un tema delicado llamado “pitch sensitivity” en inglés. No es lo mismo generar sustentación negativa en las llantas delanteras que en las traseras. Esto ahora sabemos que afecta al sistema de suspensión. Por ejemplo, disminuyendo la distancia del alerón delantero al suelo se incrementa la sustentación negativa y por esto los resortes de la suspensión deben ser más rígidos y esto disminuye la estabilidad del vehículo. Ahora se imaginará una situación donde debido a cualquier razón el coche se inclina hacia adelante disminuyendo la distancia del suelo al alerón delantero y aumentando la distancia del suelo al alerón trasero. Esto ocasionará un reajuste de las cargas aerodinámicas haciendo reaccionar a la suspensión de una manera que quizás no estaba prevista. Incluso, el centro de presiones se encuentra cambiando de lugar y haciendo que las reacciones en las llantas delanteras cambien haciendo que el coche se encuentre en sobre-viraje o sub-viraje y dificultándole la tarea al piloto.

Este término llamado “pitch sensitivity” tiene que ver con la distribución de cargas aerodinámicas. Y su facilidad para cambiar. Si un aditamento aerodinámico puede cambiar su carga muy fácilmente se dice que es sensible y si en cambio es un aditamento más conservador se dice que es menos sensible. Un aditamento sensible sería un alerón delantero mientras que uno menos sensible sería un piso plano con difusor.

La estabilidad lateral del coche se ve afectada por diversos factores como la posición del centro de gravedad, las características de las llantas, suspensión y la aerodinámica. Ya se mencionó previamente que las llantas son el principal personaje para determinar la estabilidad del coche, pero si se desarrolla un análisis aerodinámico adecuado el desempeño del coche puede mejorar considerablemente. Aumentar velocidad en curvas o disminuir tiempos de frenado debido al arrastre sin necesariamente incrementar el peso del vehículo puede ser la diferencia entre equipos que tienen la misma configuración en su motor. Ya no es solo reducir el arrastre sino incrementar la estabilidad del vehículo y disminuir tiempos de vuelta el objetivo de la aerodinámica en un coche de carreras tipo formula.

## Capítulo 4 Metodología práctica para un análisis de fluidos computacionales (CFD)

Este capítulo presentará de forma breve como es que se puede utilizar la herramienta de los fluidos computacionales para resolver ciertos problemas en ingeniería. Se dará una introducción de algunos conceptos básicos para seguir paso a paso el análisis presentado en esta tesis. No es objetivo de este trabajo explicar con lujo de detalle las matemáticas de la simulación de fluidos en computadora. Se dará el sustento suficiente para que de manera práctica se haga uso de esta herramienta para analizar un coche tipo formula que concursará en la categoría formula SAE.

Como se vio en el capítulo 2 hay ciertas ecuaciones que rigen los modelos matemáticos para estudiar la aerodinámica. En el caso del estudio por medio de herramientas computacionales no es la excepción. El flujo como se describió en el capítulo dos puede ser descrito por las llamadas ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones junto con la ecuación de continuidad son la base del modelo matemático.

Para flujos compresibles, una ecuación que expresa conservación de energía es requerida adicionalmente. Sin embargo, los efectos de compresibilidad son insignificantes para el estudio a las velocidades de este trabajo. Es por esto que para vehículos de calle el flujo debe ser considerado incompresible.

Antes de la década de los años noventa las personas encargadas de estudiar la aerodinámica realizaban aproximaciones de las ecuaciones de Navier-Stokes. Esto debido a la escasez de recursos computacionales. Hoy en día las capacidades computacionales han sido enormemente incrementadas. Hay opción para realizar mallas de diez millones de puntos, pero aun así debe de realizarse una optimización del trabajo en el llamado estudio computacional de los fluidos.

Computational Fluid Dynamics, es el nombre en inglés que significa dinámica de fluidos computacional. Comúnmente conocido como CFD esta rama es muy importante para estudios en donde no se cuenta con un túnel de viento debido a costos y espacio principalmente.

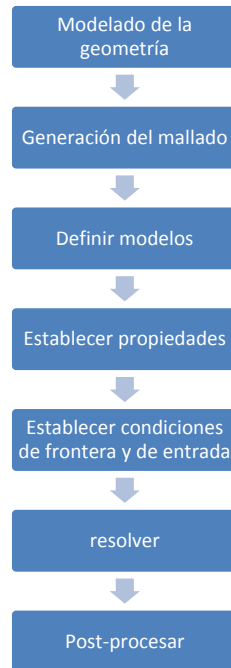
A pesar de todos los avances en cuanto a la tecnología computacional, el uso de este tipo de herramientas sigue sin ser aceptado por todo mundo como un único método para la justificación de un diseño o para el estudio de un fenómeno. De hecho, el CFD es utilizado en conjunto con túneles de viento reales para optimización, comparación y validación de carrocerías en competencias internacionales como formula uno.

Antes de empezar es necesario entender de mejor manera lo que es el CFD.

Primero que nada, el uso de esta herramienta requiere grandes cantidades de recursos computacionales. Segundo, se requiere tener conocimientos específicos del software a utilizar, así como las ecuaciones que utilizan estos programas. Para este trabajo se ha utilizado el software Star CCM+ proporcionado por la compañía CD- Adapco con sede en los Estados Unidos.

Los pasos para resolver un problema utilizando la dinámica de fluidos computacional se pueden englobar dentro de la figura 4.1

#### 4.1 Pasos para resolver un problema utilizando fluidos computacionales



**Figura 4.1** Pasos en la simulación de la dinámica de fluidos computacional (CFD) [10].

##### 4.1.1 Modelado de la geometría

Para resolver un problema de CFD se debe tener una figura de dos o tres dimensiones. Esta geometría puede ser dibujada en alguna paquetería compatible de dibujo asistido por computadora (CAD). Puede que algunos programas de CFD incluyan la parte de CAD y de no ser así existen muchas compatibilidades entre programas. Si se utiliza un paquete que no es precisamente el programa de CFD se debe verificar la calidad del dibujo al dibujarse y al importarse al programa que se utilizará.

El dibujo una vez importado debe ser examinado para que sea adecuado para el análisis. Generalmente los dibujos de objetos que se analizan contienen varios elementos que no son de importancia para el análisis por ejemplo algunos tornillos y tuercas. Si bien es cierto que todo afecta cuando se habla de fluidos también es cierto que el efecto de estos elementos puede ser despreciable para el nivel de resultados que se busca en ciertos casos como es el análisis de un coche tipo formula SAE. Además, mientras más elementos contienen más recursos computacionales son necesarios para su procesamiento como la generación del mallado.

Se recomienda tener una organización en los nombres de los archivos que se están importando ya que esto puede ser crucial para evitar confusiones durante otros pasos en el análisis. Se pueden importar piezas del coche por separado o como un solo volumen. La desventaja de importar un solo volumen es que si se quiere rotar o mover algún componente se estará rotando toda la geometría lo cual muchas veces no es lo adecuado.

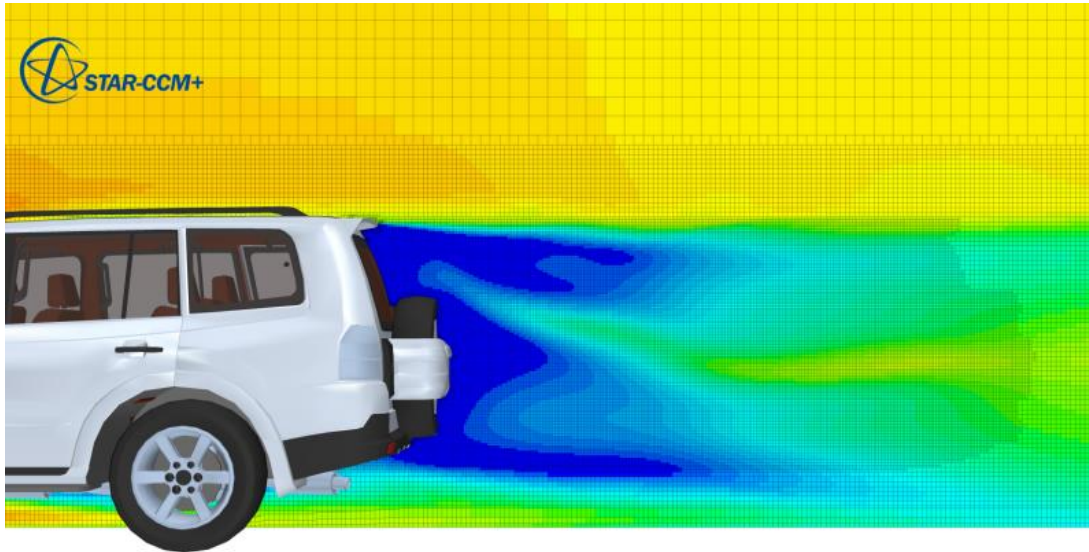
Para el caso de StarCCM+ la regla número uno es que una geometría limpia, es decir que contiene volúmenes cerrados y sin problemas superficiales, genera una malla de buena calidad. Es importante tener una malla de buena calidad para propiciar la convergencia de resultados.

#### **4.1.2 Generación del mallado**

Las ecuaciones utilizadas en este tipo de herramienta son no-lineales, lo que significa que el volumen computacional debe ser discretizado de la mejor manera posible para obtener buenos resultados numéricos. La correcta discretización del volumen es tan importante como la elección de los modelos físicos que rigen la física de la simulación. Se entiende por esto que si existe un mallado inadecuado los resultados que arrojen la simulación serán erróneos. Algunos programas de CFD tienen la opción para que una vez que la simulación ha terminado de correr, esta sea evaluada y se analice la posibilidad de una mejora en el mallado en las zonas que se consideren pertinentes.

Existen diversos tipos de mallado. Como en este trabajo se utilizó el software Star CCM+, se explicarán brevemente los mallados de ese programa. El primer tipo de mallado es el mallado superficial el cual se divide en dos categorías: el primero es llamado envoltura “wrapper”. Esta categoría se refiere al mallado que se le hará a la superficie del cuerpo de trabajo. Es un mallado que envuelve como su nombre lo dice al cuerpo que se estudiará. Esto ayudará a reparar ciertos errores y así se puede esperar una mayor probabilidad para que los resultados puedan converger. La segunda opción que nos proporciona Star CCM+ es la herramienta de re-mallado. Esta herramienta te permite hacer de nuevo el mallado que importaste del software de dibujo de donde se importó la pieza.

Para el mallado volumétrico el código de StarCCM+ utiliza tres tipos de celdas las cuales son: “trimmer, polyhedral y tetrahedral”. “Trimmer” se refiere a un tipo de mallado volumétrico que se forma utilizando celdas hexaédricas, figura 4.2. Éste se usa cuando la geometría no te permite realizar un mallado poliédrico, “polyhedral”, y es generalmente usado para aerodinámica externa por su capacidad para definir correctamente la zona definida previamente como estela. Puede servir exitosamente para modelos donde se presenta esa estela debido a la separación de la capa límite volviendo el fluido turbulento. Se recomienda utilizar este mallado para volúmenes en un túnel de viento y en general en dominios de grandes dimensiones como aviones y barcos.



**Figura 4.2** Mallado volumétrico hexaédrico aplicado para estudiar un coche dentro de un túnel de viento. Tomada de [13].

“Polyhedral” o poliédrico en español es una tipo de mallado volumétrico formado por celdas poliédricas (figura 4.3). Numéricamente es una malla que se considera estable y contiene aproximadamente cinco veces menos celdas que el mallado tetraédrico para ciertas superficies [12]. Este mallado se le denomina como confiable y para propósitos generales.



**Figura 4.3** Mallado poliédrico de un avión y el volumen en estudio en interfaz de Star CCM+.

Malla tetraédrica (Tetrahedral mesh) es una malla compuesto por tetraedros. Este modelo no es muy utilizado. De acuerdo a CD-Adapco este tipo de malla se utiliza para comparar modelos en los cuales se han utilizado este tipo de mallados.

Existen otras opciones de malla para Star CCM+ que aquí no se explicarán. Para mayor información leer las referencias [11,12, 13].

### **4.1.3 Definir Modelos**

Para un flujo monofásico y laminar las ecuaciones de Navier-Stokes puede ser resueltas directamente con sus respectivas consideraciones. Sin embargo, para flujos multifásicos y turbulentos se deben escoger los modelos apropiados. Existen modelos de turbulencia que generalmente son aceptados para flujos multifásicos y turbulentos. Cada modelo tiene distintos parámetros que deben ser configurados. Dependiendo de cada Software se recomienda dejar la configuración original para los modelos de turbulencia. Esto no significa que el usuario no pueda cambiarlos, de hecho al cambiarlos puede el usuario tener condiciones más adecuadas para el análisis [10].

### **4.1.4 Establecer propiedades**

Todas las propiedades físicas de un fluido deben ser establecidas, por ejemplo, la viscosidad, temperatura, densidad, composición y presión. Los programas como Star CCM+ incluyen bases de datos en donde correlacionan propiedades entre sí. Incluso en algunos programas existe la opción de agregar tus constantes a los modelos polinomiales.

### **4.1.5 Establecer condiciones iniciales y de frontera**

Las condiciones a la entrada y salida deben ser definidas apropiadamente. Incluso, las condiciones en las paredes también deben ser definidas con sus condiciones de frontera. Se pueden establecer condiciones periódicas de frontera las cuales son muy útiles con equipos rotacionales por ejemplo una turbina. Esto es importante ya que las simulaciones realizadas en este trabajo son estacionarias y en un futuro se recomienda realizar simulaciones con condiciones no estacionarias. Las condiciones iniciales son importantes para los análisis no estacionarios o simplemente para establecer una primera condición a la cual la simulación debe llegar por sí sola durante las iteraciones.

### **4.1.6 Resolver**

Para resolver se necesita seleccionar

Cuando se trabaja con fluidos es pertinente tener un solo volumen de trabajo y es por esto que se recomienda realizar una operación de sustracción del volumen de coche del volumen del túnel de viento. Para lograr eso se recomienda importar el volumen del coche como cerrado y un único volumen. Esto te permite ahorrar tiempo en la parte de preparación de la geometría. Se debe definir que se acepta como un resultado óptimo para la convergencia de tus resultados. El análisis de tus residuales se debe hacer para determinar si tus resultados tienden a converger.

## **4.2 Tipo de Flujo**

Es importante separar las propiedades de un flujo y de un fluido. Las propiedades de un fluido por ejemplo son la viscosidad, densidad, tensión superficial, conducción de calor, todas estas son propiedades intrínsecas<sup>3</sup> que pueden ser descritas como función de la temperatura, presión y

---

<sup>3</sup> Propiedades intrínsecas - Son las cualidades características de cualquier muestra de una sustancia independientemente del tamaño o forma de dicha muestra. Es decir, que estas propiedades no cambian aunque cambie, por ejemplo, la masa de una sustancia.



composición. Las propiedades que dependen del flujo son presión, turbulencia y viscosidad turbulenta.

Para un análisis de fluidos computacionales es útil separar los distintos tipos de flujo dentro de las siguientes categorías.

*Laminar – turbulento*

*Estacionario – no estacionario*

*Monofásico – multifásico*

#### **4.2.1 Flujo laminar**

En un flujo laminar las ecuaciones de Navier-Stokes describen la cantidad de movimiento que transporta el flujo dominado por fuerzas viscosas. Es posible obtener muy buena aproximación de un flujo monofásico laminar en un software de CFD. La transición de laminar a turbulento es difícil de modelar adecuadamente.

Una simulación de transferencia de calor puede también arrojar resultados precisos así como también puede obtenerse una predicción de temperaturas adecuada. Sin embargo, la difusión en los líquidos es un tema difícil de modelar en los fluidos computacionales.

#### **4.2.2 Flujo turbulento**

Las ecuaciones de Navier-Stokes en efecto describen los flujos turbulentos, sin embargo debido a las propiedades del flujo, es casi imposible resolverlas para aplicaciones reales de ingeniería incluso con supercomputadoras. Se necesita una división de tiempo y espacio muy fina en la simulación para realmente tener una aproximación a la solución real. Esto no significa que no existan simulaciones que si arrojen soluciones parecidas a la realidad. La solución directa de las ecuaciones de Navier- Stokes (DNS) para sistemas pequeños puede servir para el entendimiento de la turbulencia y para el desarrollo de nuevos modelos.

Otra posibilidad para el flujo turbulento es resolver solamente las turbulencias de gran tamaño, filtrando las turbulencias pequeñas. A este método se le llama simulación de grandes Eddys (LES) y en los últimos años ha ganado popularidad ya que vuelve posible resolver problemas simples de ingeniería en una computadora de escritorio de gran capacidad. No por eso se disminuye el tiempo de computadora utilizado. Incluso pueden llegar a necesitarse semanas para obtener buenos promedios estadísticos aun para flujos sencillos.

Para flujos turbulentos más complicados no es posible resolver con éxito las fluctuaciones de las turbulencias. La mayoría de las aplicaciones de ingeniería se resuelven utilizando el método de las ecuaciones de Navier-Stokes de Reynolds promedio. En este modelo las fluctuaciones de la turbulencia son promediadas en el tiempo y aun así tener acertados valores de velocidades. Sin embargo, varias propiedades del flujo quedan sin resolver. Todo lo que ocurre con un tamaño menor al mallado asignado queda sin resolver por ejemplo cuando las burbujas se rompen, o las



gotas en un flujo multifásico. Para resolver esto se deben añadir más modelos y mejorar la simulación.

#### **4.2.3 Flujo monofásico**

Los flujos monofásicos y laminares pueden ser resueltos de manera precisa, así como los flujos turbulentos monofásicos pueden ser simulados con resultados razonables. El problema viene cuando se quiere simular una reacción química rápida en una flujo laminar o turbulento. Cuando la reacción ocurre de manera muy rápida comparada con la combinación de sus componentes habrá unos gradientes que no pueden ser resueltos en el mallado. Otros modelos deben añadirse a la simulación.

#### **4.2.4 Flujo multifásico**

Un flujo multifásico consiste en una de estas posibles combinaciones: líquido-gas, sólido-gas, líquido-líquido o líquido-sólido.

Hoy en día la calidad de las simulaciones con este tipo de flujo se encuentran limitadas no solo por la capacidad de las computadoras en cuanto a velocidad o memoria sino también por la falta de modelos adecuados. Aun así este tipo de flujos son de gran importancia para la ingeniería pues muchos procesos incluyen flujos multifásicos.

Existe un interés especial en lo que es transferencia de masa y de calor en las aplicaciones de ingeniería. Esto es por ejemplo para procesos de ebullición o destilación. La ventaja en los dinámica de fluidos computacionales es que ciertas correlaciones como la del número de Nusselt ( $Un$ ) pueden ser calculadas con valores locales del flujo. Esto facilita algunos estudios para la investigación de ciertos procesos.

### **4.3 El mallado**

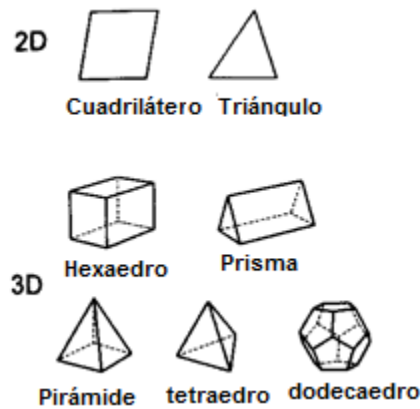
Para obtener buenos resultados o por lo menos buenas aproximaciones es necesario tener un mallado adecuado. Sin embargo, esto no sucede muchas veces y esto puede llevar a obtener resultados erróneos en los problemas reales de ingeniería.

Para generar un mallado se requiere explicar muchas cosas ya que es un proceso muy complejo. En este trabajo se mencionarán algunas cosas básicas para dar una idea al lector.

Ya se mencionó en los pasos para resolver un problema mediante el uso de los fluidos computacionales algunas características del mallado en el software de Star-CCM+. Por otro lado tenemos una división de categorías de mallados más general. Los mallados se dividen comúnmente en estructurados y no estructurados.

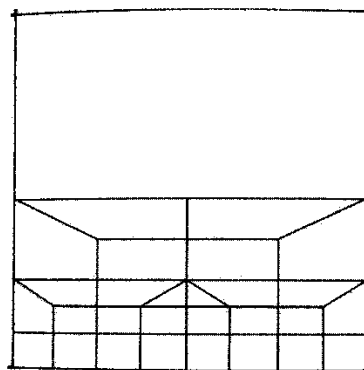
Un mallado estructurado se construye de elementos generalmente de 4 lados, aunque no por esto deben ser rectángulos. Por ejemplo, en tres dimensiones puede ser un hexaedro (figura de 6 caras), ver figura 4.4. Encontrar caras vecinas entre celdas es muy sencillo en este tipo de mallados. Los programas de CFD que usan este tipo de mallado son generalmente más rápidos y requieren menos memoria que los programas que usan mallas no estructuradas. Un mallado no estructurado se construye de diferentes elementos, cuadriláteros y triángulos en dos dimensiones,

tetraedros, hexaedros, pirámides, prismas e incluso dodecaedros en tres dimensiones. Usualmente, el mallado estructurado arroja mejores resultados que el no estructurado, sin embargo muchas veces no es posible crear un mallado estructurado debido a la complejidad de la geometría y es por esto que la mayoría de los programas trabajan con ambos tipos de mallado.



**Figura 4.4** Elementos base para la creación del mallado en dos o tres dimensiones [10].

Al realizarse un mallado lo que se está haciendo es una discretización de la geometría. Muchos programas te permiten dibujar tu geometría en el mismo software o permiten la importación de estos desde otros programas compatibles. Las geometrías se forman de puntos y líneas ya sean en dos dimensiones o en tres dimensiones. Estos puntos y líneas se utilizan para dividir el área en elementos de la malla estructurada o no estructurada. El ángulo entre los elementos de la malla y la superficie de la geometría debería ser cercano a noventa grados. Para lograr eso se empieza por crear un mallado superficial como se mencionó previamente. Cuando se requiera una malla fina en ciertas zonas, es posible ir aumentando el tamaño de la malla a medida que esta se aleje en distancia del área de interés como se muestra en la figura 4.5.



**Figura 4.5** Malla incrementando su tamaño a medida que se aleja del lado inferior [10].

Existen diferentes factores que afectan la precisión de los resultados de una simulación. Por ejemplo, si una celda adyacente es mucho mayor en tamaño y distinta en forma el error numérico se incrementará. Una solución óptima se da cuando existen ángulos de noventa grados en las

esquinas y los lados sean del mismo tamaño. Para las mallas triangulares se recomiendan ángulos de sesenta grados y también se recomienda evitar los ángulos mayores a noventa grados. Para los tetraedros se recomiendan ángulos entre cuarenta y ciento cuarenta. Para optimizar los resultados se sugiere alargar las celdas en dirección del flujo ya que en esa dirección difícilmente existen gradientes.

Ya se entiende que a mayor densidad del mallado mayor precisión en los resultados. Es aconsejable utilizar distintos espaciados entre diferentes posiciones del mallado. Por ejemplo en la zona donde se encontraría la capa límite se requeriría una malla densa y mientras más nos alejamos de la superficie que crea la capa límite mayor puede ser el tamaño de las celdas. El flujo que se encuentra alejado de la superficie no requiere ser resuelto con detalle y se podría decir que se aceptan ese tipo de errores en esas zonas. Para saber que zonas son las que presentarán un mayor gradiente se requiere primero correr una simulación para identificar dichas zonas, o bien el usuario debe usar su intuición basada en sus conocimientos para saber qué zonas necesitan una mejor resolución. Si el usuario cree pertinente realizar una segunda solución con un refinamiento de mallado, esté debe realizarse.

#### **4.4 Establecimiento de los modelos de turbulencia**

La turbulencia es encontrada en la mayoría de los flujos naturales así como también en los flujos de procesos industriales. Las turbulencias naturales pueden ser encontradas en los océanos, ríos y en la atmosfera mientras que las turbulencias de los procesos industriales pueden ser encontradas en un intercambiador de calor o en reactores químicos. De hecho la mayoría de los flujos en los procesos industriales presentan turbulencias ya que la turbulencia mejora el intercambio de calor y la transferencia de masa. Por todo lo anterior, el modelado de las turbulencias es un elemento clave al momento de utilizar los fluidos computacionales.

Para poder entender que modelo de turbulencia es el mejor se tiene que entender algunos factores en las turbulencias. En el capítulo 3 se menciona la estela formado detrás de un coche. En esta sección se explicaran algunas características de ese flujo. Puede que gracias a ese capítulo ya se tenga una idea de lo que la turbulencia es. La turbulencia se presenta día a día en actividades tan comunes como agitar la leche de nuestro vaso para que se combine con el chocolate en polvo. En ese caso sabemos que la turbulencia nos ayudara a que la combinación sea más efectiva. La turbulencia afecta la transferencia de: masa, calor y cantidad de movimiento. Esto puede ser aprovechado en diversos procesos para nuestro beneficio.

De acuerdo a Hinze [14], la turbulencia puede ser definida como:

*El movimiento de un fluido turbulento es una condición irregular del flujo en el cual muchas cantidades presentan una variación aleatoria en el tiempo y espacio, y que por lo tanto se pueden discernir valores promedio estadísticos.*

##### **4.4.1 Características de un flujo turbulento**

Ya que dar una definición para un flujo turbulento no es sencillo o no es tan fácil de apreciar. A continuación se presentan algunas características de un fluido turbulento. Como primera

observación se puede hacer notar a través del ejemplo del humo que sale del cigarrillo. Se puede observar que el flujo se vuelve menos caótico a medida que la distancia al cigarrillo aumenta. Esto habla de que la turbulencia es un proceso decadente en donde estructuras turbulentas grandes se van descomponiendo en estructuras más pequeñas hasta que el flujo vuelve a ser laminar. De hecho la turbulencia muere rápidamente si no se proporciona energía para que esta permanezca.

A continuación se mencionan las principales características según Teneekes y Lumley [15].

1.- Irregularidad – Los flujos turbulentos son irregulares, aleatorios y caóticos, estos se conforman de un rango de velocidades y tiempo. A los movimientos de gran escala se les llama Eddies largos (large Eddies) o vórtices largos. Un Eddie es un movimiento turbulento que sobre una determinada región tiene una coherencia moderada. La región del Eddie largo puede contener Eddies de menor tamaño dentro de ella. En los flujos turbulentos los efectos de gran escala son determinados por la geometría de la región, mientras que los movimientos de menor escala son regidos por la viscosidad del fluido. A medida que los vórtices se mueven, estos se alargan, rotan y rompen en dos o más vórtices. Para las simulaciones de problemas en ingeniería comúnmente se utilizan modelos estadísticos para resolver las turbulencias.

2.-Difusividad – Esta puede que sea la característica más importante de un fluido turbulento. La difusividad en un fluido turbulento se debe al movimiento caótico del mismo. Esto permite una combinación más rápida en procesos químicos. Ya que la turbulencia es un proceso que ocurre en el espacio, la difusión ocurre en las tres direcciones.

3.- Tridimensional – la turbulencia es intrínsecamente tridimensional. La razón es porque los mecanismos de alargamiento de los vórtices y giro de los vórtices no pueden darse en dos dimensiones como lo explica la referencia [10]. Sin embargo, los flujos turbulentos pueden ser bidimensionales en un sentido estadístico. Por lo tanto la simulación en dos dimensiones de flujos turbulentos se puede realizar. Actualmente la mayoría de los modelos de turbulencias aplicados a problemas de ingeniería se basan en modelos de tres dimensiones en donde sus fluctuaciones son filtradas, es decir que las fluctuaciones no se resuelven. Lo que se hace es un acoplamiento entre las fluctuaciones y el campo de flujo medio.

4.- Disipación de la energía cinética turbulenta- en todos los flujos turbulentos existe un flujo por unidad de área de energía que va desde las turbulencias de gran escala hasta la de menor escala. En las turbulencias de menor escala la energía cinética es disipada como calor debido a los esfuerzos creados por la viscosidad. A esto comúnmente se le conoce como cascada de energía “energy cascade”. En flujos no viscosos se puede decir que la energía fluye de turbulencias de mayor escala a turbulencias de menor escala y así continuamente. La razón por la cual esta cascada se da es por la inestabilidad de los vórtices grandes y se rompen en vórtices de menor tamaño transfiriendo la energía de esa forma. Esos vórtices creados tienden a hacer lo mismo y forman vórtices de menor tamaño hasta que los vórtices disipan la energía a través de calor debido a la viscosidad molecular. Como consecuencia de la disipación la turbulencia tiende a desaparecer si no hay una energía que se esté suministrando.

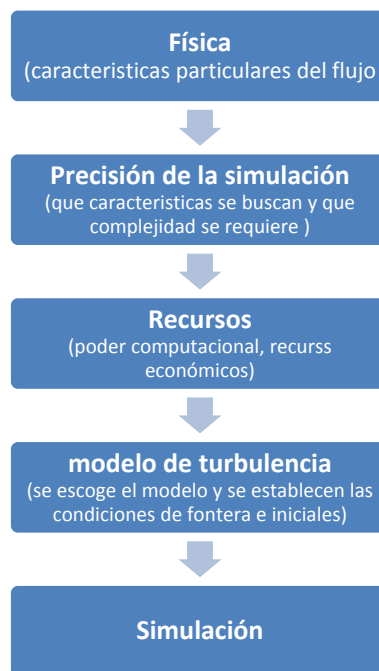
5.-Medio Continuo- la turbulencia es un fenómeno que se considera que sucede en un medio continuo debido a que incluso los vórtices más pequeños son mucho mayor en tamaño a la escala molecular. Es por eso que el flujo de los fluidos turbulentos se describe con las ecuaciones de continuidad, la ecuación de conservación de masa y la ecuación de cantidad de movimiento complementado con algunas condiciones de frontera e iniciales.

6.- un flujo turbulento es un flujo- la turbulencia es un tipo de flujo no un fluido, esto significa que cualquier fluido puede ser turbulento si el Reynolds necesario es alcanzado.

#### 4.4.2 Modelado de la turbulencia

El modelado de la turbulencia para las simulaciones va desde pronósticos del clima hasta la simulación de un coche de carreras. Debido al gran número de aplicaciones es que el interés por un correcto modelado de la turbulencia es alto para la sociedad y para la industria. Esta razón justifica por qué el modelado de la turbulencia es un factor clave para las simulaciones en CFD. Existen varios modelos propuestos en la literatura para modelar la turbulencia.

Desafortunadamente los flujos turbulentos se caracterizan por la fluctuación de su campo de velocidad en donde existen escalas pequeñas para el espacio y fluctuaciones a altas frecuencias. El espacio necesario para almacenar esta información en una simulación es bastante y por lo tanto caro. Afortunadamente normalmente se pueden ignorar las fluctuaciones a altas frecuencias y los vórtices de menor escala resultando en unas ecuaciones modificadas que son computacionalmente más accesibles para resolver. Como consecuencia de esas modificaciones se tienen nuevas variables desconocidas.



**Figura 4.6** caracterización esquemática de un proceso de modelado de la turbulencia [10].

Durante las últimas décadas bastantes modelos de turbulencia de diverso nivel de complejidad han sido propuestos. La correcta selección entre estos modelos puede ser determinante para la obtención de resultados cercanos a la realidad. En un caso ideal el proceso de selección debería realizarse de acuerdo a la figura 4.6. La figura 4.6 muestra como el conocimiento que se tiene del flujo y del fluido con el que se trabajará es crucial para la decisión pues reduce el número de modelos que puedes elegir. Muchas veces la selección del modelo se puede ver limitado por los recursos computacionales con los que se cuenta para la solución del problema.

En la figura 4.7 se puede ver un esquema de distintos modelos de turbulencia que existen para la solución de problemas turbulentos. Ya se mencionó que no existe un modelo general y que cada modelo debe ser seleccionado dependiendo de las características del problema analizado. Como la figura lo muestra existe una relación inversa entre aproximación al resultado real y costo computacional. A medida que la aproximación es mejor el costo de los recursos computacionales necesarios se incrementan.

La correcta selección entre modelos es factor clave para el éxito de la simulación. Incluso, si se escoge un modelo que no es muy preciso como el modelo de una ecuación, éste servirá para propósitos generales por ejemplo en fases tempranas de un proyecto los resultados de esta simulación pueden servir para cambiar un diseño. La calidad de la simulación puede ser reducida para obtener información que nos ayude a predecir ciertas tendencias.

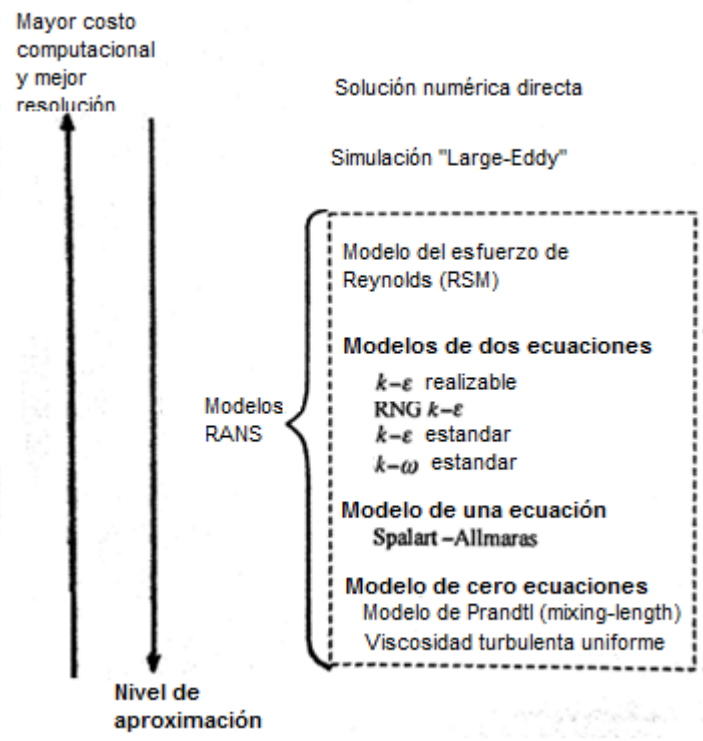


Figura 4.7 Esquema de distintos modelos de turbulencia [10].

#### 4.4.3 Modelo $k-\omega$

Se presenta una pequeña introducción al modelo  $k-\omega$  debido a que esa es la turbulencia utilizada en este trabajo. Estos párrafos tienen como objetivo presentar una introducción al modelo y no explicar de dónde fue determinado así como tampoco las matemáticas que sustentan al modelo.

Kolmogorov (1942) introdujo por primera vez un modelo completo para la turbulencia. En los modelos aparece una “ $k$ ” constantemente y de hecho es uno de los parámetros más importantes para los modelos turbulentos. Esta  $k$  es la energía cinética turbulenta total y de hecho es por unidad de masa por lo cual debería ser llamada energía cinética turbulenta específica. Para mayor información referirse a [10,16]. Además de modelar una ecuación para  $k$ , Kolmogorov introdujo un segundo parámetro “ $\omega$ ” al que se refirió como la razón de disipación de energía por unidad de volumen y tiempo. A este modelo se le conoce como modelo  $k-\omega$ , donde  $\omega$  satisface una ecuación diferencial similar a la ecuación para  $k$ . Por esto se le conoce como modelo de turbulencia de dos ecuaciones (two-equation model of turbulence). En la figura 4.7 se aprecia como los modelos denominados de dos ecuaciones tienen sus dos parámetros como nombre del modelo.

Después de Kolmogorov se desarrolló el modelo  $k-\omega$ . Saffman desarrolló y mejoró el modelo. Spalding ofreció también por parte del colegio imperial de Londres un modelo mejorado  $k-\omega$ . Para este modelo se propusieron diversas mejoras desde 1970 hasta 1990 con el modelo de Abid y Anderson. Esto quiere decir que el modelo de Kolmogorov tiene fallas que fueron mejoradas. Como resultado se le fue cambiando la interpretación al parámetro  $\omega$ . El modelo  $k-\omega$  ha evolucionado y también la forma de sus ecuaciones estas últimas décadas.

## Capítulo 5 Estrategia para el CFD utilizado para una competencia Formula SAE

En este capítulo se explicará lo que es la competencia para la cual se diseñaron dos carrocerías. Se explicarán los requerimientos y restricciones de los diseños con que se debe cumplir un diseño de este tipo. Además, se explicarán las condiciones generales utilizadas para la simulación en CFD de las carrocerías para concursar en los años 2013 y 2014.

### 5.1 Competencia Formula SAE y reglamento del sistema

Formula SAE es una competencia internacional organizada por la Sociedad de Ingenieros Automotrices, SAE por sus siglas en inglés. La sociedad organiza varios eventos alrededor del mundo. Existen 9 sedes para esta competencia en 8 países. Específicamente ésta competencia es para coches tipo formula en donde el coche es un monoplaza de llantas descubiertas, figura 5.1. La competencia en donde el equipo de la Universidad Nacional Autónoma de México compete es en una de las dos competencias con sede en Estados Unidos, Lincoln, Nebraska. El idioma oficial para presentar reportes, diseños y costos es el inglés.



**Figura 5.1** Dos coches monoplazas de llantas descubiertas. A la izquierda el coche competidor de la competencia de Formula SAE (UM-524) en Lincoln, Nebraska, EUA en el 2013. A la izquierda un coche con los colores de Ferrari competidor de alguna categoría tipo Formula.

La competencia tiene por objetivo hacer que estudiantes no graduados y recién graduados de universidades de todo el mundo concebir, diseñar, fabricar, desarrollar y competir con un coche pequeño tipo formula.



La competencia cuenta con un reglamento al que todos los equipos participantes de distintas universidades se apegan. Sin embargo, el reglamento te da como diseñador suficiente espacio para que la creatividad y la imaginación se reflejen en el coche de cada universidad.

El reto de la competencia se encuentra en que los vehículos deben superar un conjunto de eventos descritos en el reglamento de la competencia. Los equipos deben superar los eventos al mismo tiempo que ponen a prueba su imaginación, creatividad y trabajo en equipo, todo esto en competencia contra universidades de todo el mundo.

Los eventos de la competencia se dividen en dos tipos: estáticos y dinámicos. Los eventos estáticos incluyen inspección técnica, costo, una presentación del coche y el diseño en ingeniería. Los eventos dinámicos están constituidos por pruebas de resistencia, aceleración, velocidad y frenado que califican que tan bien se desempeña el coche.

El ganador de la competencia es determinado por medio del mayor puntaje obtenido a través de los distintos eventos. Los siguientes puntos son posibles [18]:

Eventos estáticos:	
Presentación	75
Diseño de ingeniería	150
Análisis de costos	100
Eventos dinámicos:	
Prueba de Aceleración	75
Skid-Pad	50
Autocross	150
Economía del combustible	100
Prueba de Resistencia	300
<b>Puntos totales</b>	<b>1000</b>

El equipo con mayor puntaje es el ganador de la competencia. Los puntos están sujetos a ecuaciones que se explican en la referencia [18], así como los eventos estáticos y dinámicos. En ese reglamento se aprecia como la competencia no está enfocada únicamente a ingeniería, sino que también intervienen elementos como costos y presentación del coche.

En la competencia los equipos simulan pertenecer a una firma de diseño que se encuentra diseñando, fabricando y probando un vehículo prototipo para un mercado no profesional de

competencias de fin de semana. El vehículo además de cumplir con las normas de seguridad podrá contar con elementos estéticos, fácil manufactura, ergonomía y confianza para el usuario.

## **5.2 Reglas para el sistema de aerodinámica en la competencia**

Los primeros 4 capítulos hablan de como cualquier superficie sólida afecta el desempeño en cuanto a aerodinámica de un cuerpo. Es por esto que las reglas a las que se deben poner atención no solamente es a lo dispositivos aerodinámicos sino a la carrocería o “bodywork” como se menciona en el reglamento. En los siguientes párrafos se le llamará sistema a no solo el sistema aerodinámico sino también a la carrocería. La referencia [18] es el reglamento del año 2015 para la competencia. Esto se debe a que las reglas no afectan o modifican los diseños de los años 2013 y 2014 del equipo de la UNAM. Este apartado pretende dar una idea de las reglas que existen en la competencia para los dispositivos aerodinámicos. De ninguna manera pretende que al leerse este capítulo ya no sea necesario leer el reglamento de la competencia

### **Requerimientos generales de diseño que afecten al sistema**

#### **Carrocería (Bodywork)**

No puede haber espacios abiertos en la parte delantera del coche hasta el tubo del chasis llamado arco antivuelco principal (main hoop) o hasta la pared de protección contra fuego (firewall) sin contar el espacio para el piloto y los agujeros de la suspensión.

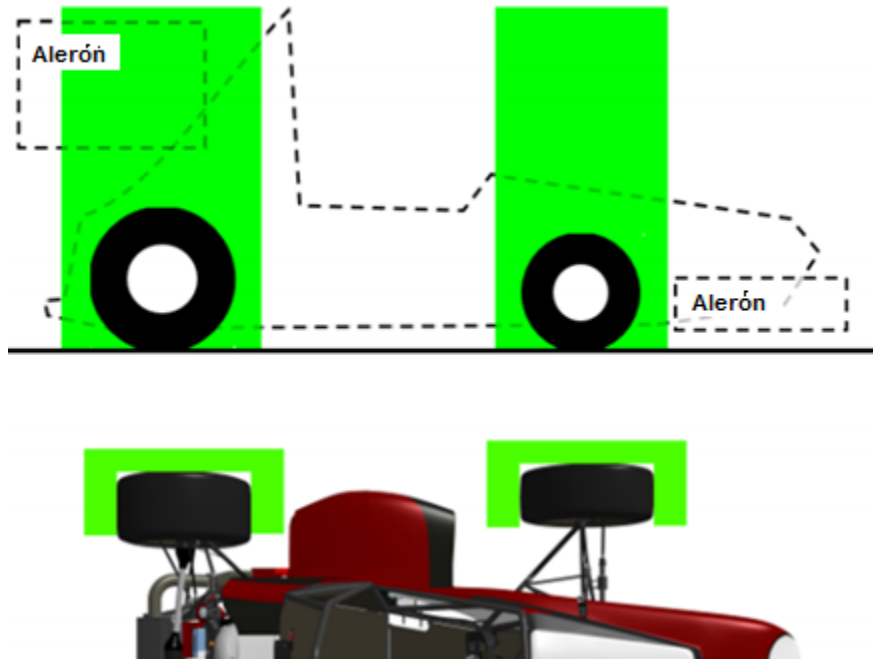
### **Ajustes permitidos después de la inspección técnica**

Cambiar el ángulo de los alerones sin alterar la posición general.

#### **Llantas descubiertas**

Se mencionó que por ser un coche tipo formula lleva las llantas descubiertas y esto por definición es:

- a) Los 180 grados sobre el vehículo deben permanecer sin obstrucción alguna desde un punto de vista desde arriba de las llantas.
- b) Las llantas deben permanecer sin obstrucción alguna vistas desde los laterales.
- c) Ninguna parte del vehículo debe entrar a la zona marcada como prohibida. Esta zona se delimita por dos líneas rectas que se extienden verticalmente desde una posición de 75 mm hacia adelante y hacia atrás del diámetro exterior de las llantas delanteras y traseras vistas de lado. Esta zona también se extiende por afuera de las llantas vistas de un plano superior lo que marca una zona como en la figura 5.2 se puede apreciar.
- d) Los dispositivos deben cumplir las dimensiones establecidas en el artículo 9 de dispositivos aerodinámicos.



**Figura 5.2** Zonas prohibidas alrededor de las llantas vista lateral y superior [18].

### **Atenuador de impactos**

Este elemento sirve como su nombre lo dice para atenuar un posible impacto. Este va colocado en la parte delantera del coche y su importancia con respecto al sistema viene cuando en las reglas vienen sus dimensiones mínimas ([18] sección T3.21.1). Recordando que la carrocería envuelve todo dentro de ella es importante no ignorar este elemento así como todo el chasis.

Los equipos que presenten alerón delantero deben probar que el atenuador de impactos en combinación con el atenuador cumple con el mínimo de absorción de energía y el valor de desaceleración especificada en T3.22.3 y T3.22.2 de [18].

Las pruebas físicas realizadas para demostrar los puntos anteriores deben ser mostradas en la competencia y por lo tanto si se probó con alerón, este deberá mostrarse también. Más detalles en la referencia [18] o contactar por correo a los organizadores de la competencia.

### **Carrocería frontal**

No se permiten bordes afilados en la parte delantera de la carrocería, así como tampoco componentes con filo.

Toda la parte delantera de la carrocería que pueda impactar a la gente, por ejemplo la nariz, debe tener un radio mínimo de 38 mm (1.5 in). Este radio debe extenderse por lo menos 45° relativos en dirección del conductor. Esto aplica para la parte superior y los laterales.

## **Egreso del piloto**

Todos los pilotos deben de poder salir del coche en menos de 5 segundos ([18] en T4.8). Lo que afecta a la carrocería es que al salir del coche el piloto puede o no usar como apoyo parte de la carrocería. Esto tiene que tomarse en cuenta al momento de realizar el diseño de la parte del habitáculo del vehículo. Esa parte tiene que soportar la salida de una persona con prisa.

## **Reglas generales de chasis – Espacio con el suelo**

Tendrá que existir suficiente espacio entre la parte baja del coche y el suelo. Solo se le permite a las llantas tocar el suelo durante los eventos de la competencia. Todo contacto intencional o excesivo será penalizado. ([18] T6.2)

Principalmente se quiere evitar que la pista donde se realicen los eventos salga dañada. Es por esto que si se está diseñando un piso plano este punto debe discutirse tomando en cuenta que el coche con piloto se encuentra a menor distancia del suelo que cuando no tiene piloto. Este detalle debe preverse al momento de diseñar el piso tomando en cuenta solamente el CAD de piso ya que este muchas veces no toma en cuenta el peso que el piloto aumenta a toda la estructura del coche.

## **Punto de apoyo (Jacking Point)**

En la referencia [18] T6.6 se menciona un punto de apoyo llamado “Jacking point” en inglés. Este punto se encuentra en la parte trasera del coche y es capaz de darle un apoyo al coche para cuando este requiera ser transportado de un lado a otro. Viendo el artículo T6.6.2 se aprecia que el punto de apoyo necesita verse y estar en cierto lugar. Esto cobra importancia cuando se quiere implementar un difusor en la parte trasera del coche. Una manera de solucionar esto es colocando ese punto de apoyo como parte del difusor, claro que esto requeriría que el difusor fuera capaz de soportar la carga ejercida en el cuándo el punto de apoyo se esté utilizando. Aquí interviene la creatividad y la habilidad de manufactura del equipo.

## **Artículo 9 – Dispositivos Aerodinámicos**

### **Dispositivos delanteros**

La sección T9.2.1 [18] especifica que en vista lateral ningún dispositivo aerodinámico o parte de este como alerones, piso plano o “splitter”, deben:

- a) Encontrarse a una distancia mayor que 700 mm (27.6 in) por delante de la parte delantera de las llantas frontales.
- b) Ser más amplio que la parte exterior de las llantas delanteras medida a una altura del centro de la llanta.

La sección T9.2.2 [18] especifica que desde una vista frontal del vehículo, todo aquello que se encuentre por arriba de 250 mm (9.8 in) sobre el nivel del suelo debe permanecer sin

obstrucciones por parte de dispositivos aerodinámicos con excepción de los platos laterales de los alerones o superficies planas que tengan menos de 25 mm de espesor.

### **Dispositivos traseros**

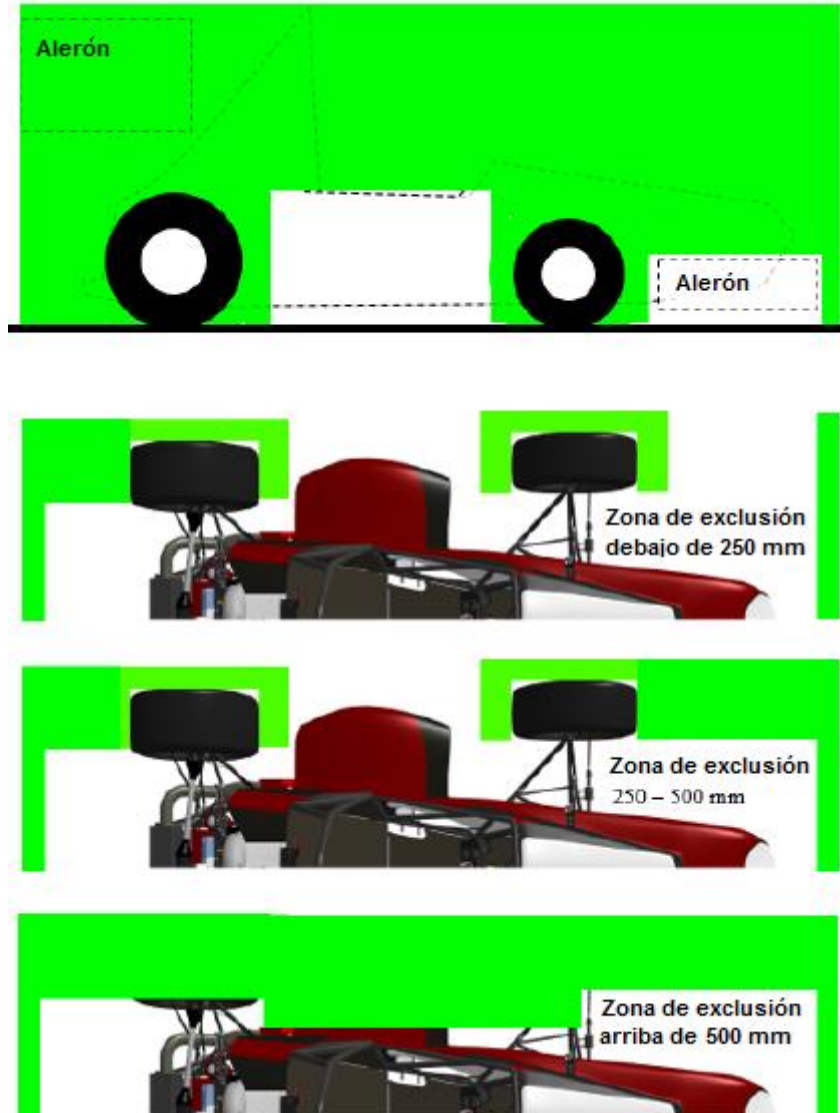
La sección T9.3 [18] especifica las distancias en las que se pueden montar los dispositivos traseros. En esta categoría estarían entrando el difusor y los alerones traseros.

Con una vista en paralelo ningún elemento del sistema ya sea dispositivo, alerón o difusor puede:

- a) Encontrarse por detrás de 250 mm (9.8 in) de distancia de la parte trasera de las llantas traseras.
- b) Encontrarse por delante de un plano vertical que se posiciona en la parte delantera del soporte de la cabeza del piloto. Excluyendo el piso plano ya que este puede extenderse desde la nariz hasta detrás de las llantas traseras.
- c) Sobresalir de la medida interna de las llantas traseras, medida desde la altura del centro de la llanta.

En la Parte T artículo 9 sección 3.2 [18] menciona que no puede haber alerón trasero o dispositivo aerodinámico (incluyendo platos laterales) que se encuentre a una distancia mayor de 1.2 metros sobre el nivel del suelo medidos cuando el coche no cuenta con el peso del piloto.

Se permite tener dispositivos aerodinámicos entre los planos frontales creados en el centro de las llantas siempre y cuando cumplan con no invadir la zona de exclusión marcadas en la figura 5.3, T9.4 [18]. La altura máxima a la que puede haber un dispositivo en esta zona, ya sea carrocería o ductos laterales, es de 500 mm [18].



**Figura 5.3** La zona verde es la zona de exclusión. Las tres últimas imágenes muestran la zona de exclusión a distintas alturas desde una vista superior [18].

T9.5 [18] Todos los vértices apuntando hacia el frente del vehículo incluyendo alerones, platos laterales, piso plano, etc., deben cumplir con un radio mínimo de 5 mm para los vértices horizontales y 3 mm para los vértices verticales. Especial atención a esta regla ya que se debe ver claramente que se diseñaron las partes para satisfacer esta regla.

T9.6 [18] la creación del efecto suelo está prohibida con el uso de ventiladores cuyo propósito sea extraer el aire debajo del coche, a menos de que los ventiladores sean para enfriamiento.

T9.7 [18] Todo dispositivo aerodinámico debe ser diseñado de manera que soporte las cargas que tendrá al estar estático y en movimiento. Se deben sujetar de manera que cuando el coche se

encuentre en movimiento, los dispositivos aerodinámicos no oscilen excesivamente. Esto se verificará durante la inspección técnica por los jueces.

### 5.3 Simulación Base CFD

Ahora que la teoría ha sido cubierta y se han mostrado las reglas que limitan la aplicación de dispositivos aerodinámicos, en este apartado se empezará a crear un análisis para ayudar a resolver el diseño de un coche tipo formula para la competencia Formula SAE. Este análisis se efectúa usando el software Star-CCM+.

#### 1.- Importación del modelo

El modelo se importa desde Solid Works o algún otro programa de dibujo como un archivo tipo STL (pueden ser otros formatos, revisar compatibilidad del software a utilizar). Este es un archivo que significa que estamos usando superficies. Para la importación simplemente mandamos a llamar el archivo a nuestro programa previamente abierto de Star CCM+.

Después de importarlo se tiene que limpiar la geometría y establecer algunos extras para simular un túnel de viento virtual.

Para limpiar la superficie se tiene que entender el software que se está utilizando. Existe una forma de evitar perder tiempo reparando superficies y esa es teniendo una calidad alta en tu CAD. Para la limpieza de la superficie se recomienda tomar talleres impartidos por la compañía Star CCM+.

Una vez limpia la superficie se crea un túnel de viento virtual. Este túnel se compone de un prisma rectangular cuyas dimensiones están determinadas por el tamaño del coche analizado. Existen recomendaciones en cuanto a la distancia entre el coche y las paredes. En el análisis realizado utilizamos la recomendación de CD Adapco ya que a través de distintos experimentos ellos han validado los resultados bajo estas condiciones. Ellos recomiendan establecer la entrada "inlet" del túnel de viento a 5 longitudes del coche delante de la nariz del automóvil a analizar, y 5 veces el ancho de tu coche hacia cada lado de este hasta las paredes laterales del túnel viento. Para la salida del aire "outlet" se recomienda dejar una distancia de 10 longitudes del coche. Estas distancias se establecieron para que el flujo no se vea afectado por las paredes del túnel. Se debe tener una distancia mayor hacia detrás del coche para que la estela se encuentre completa en el dominio computacional.

Partes:

- Paredes del túnel de viento
- Piso del túnel de viento
- Entrada de aire
- Salida de presión
- Carrocería, piloto, chasis, motor, suspensión
- Llantas delanteras
- Llantas traseras

## ***2.- Asignar regiones***

El siguiente paso es asignar regiones a cada parte que se estableció en el primer paso. Ya sea para las partes importadas o para las partes dibujadas en el software como el prisma rectangular.

A cada cara del túnel se le asigna un tipo de región. A la entrada del aire se le asigna el tipo de región llamado entrada por velocidad (Velocity Inlet), a la salida de aire se le asigna la región llamada salida de presión (Velocity Outlet), al piso se le asigna la categoría de pared (Wall), así como al techo, a las paredes y al coche junto con todas sus partes. Se podría establecer la entrada del aire al radiador y la entrada al múltiple de admisión de aire al motor como una salida de presión y medir el flujo de aire que la simulación calcula que entraría, claro que esto dependerá de los objetivos de la simulación y de los recursos con que se cuenten. Un análisis de utilizando fluidos computacionales puede ser tan complejo como uno quiera.

Regiones:

- Paredes del túnel de viento
- Piso del túnel de viento
- Entrada de aire
- Salida de presión
- Carrocería, piloto, chasis, motor, suspensión
- Llantas delanteras
- Llantas traseras

Nótese que las regiones son las mismas que las partes. Esto es debido a que cada parte tiene que tener asignada una región para después establecer propiedades físicas a cada región. Estas propiedades físicas pueden incluir movimiento o material.

Además hay que asegurarse de que el piso sea una región separada para poder establecer su velocidad lineal ya que simularemos el piso con movimiento para mejorar el parecido con la realidad.

A la región de las llantas hay que tenerlas separadas en delanteras y frontales ya que al asignarles rotación cada par tiene ejes de rotación distintos.

## ***3.- Definir propiedades del mallado***

Se selecciona como se quiere el mallado así como algunas opciones dentro del programa que se está utilizando. Para nuestra simulación seleccionamos modelos que nos facilitarán la solución a nuestra simulación. Se recomienda verificar esto con la compañía dueña del software que se esté utilizando.

Establecemos áreas donde queremos un mallado más fino en zonas de interés como la parte debajo del coche, las llantas y en general el coche. Este mallado fino solo se encontrará en las áreas de interés, es decir que a medida que la distancia aumenta con respecto a estas áreas de interés, el mallado aumentará de tamaño para ahorrar tiempo computacional.



El tamaño base de nuestra malla es de 20 mm para la zona del coche. Este tamaño varía según el área de interés o su distancia con respecto a estas áreas. De hecho, a cada región se le asignan variaciones en el mallado para optimizar la solución.

En los programas de fluidos existen muchas opciones para modificar al momento de realizar un mallado. Se recomienda las referencias [10,11 y 13].

Se procede a realizar el mallado volumétrico. Al terminar el mallado se debe verificar que el mallado sea apto para continuar con el proceso. Se deben evitar celdas de volumen cero y de baja calidad, así como cambios bruscos de volumen en las celdas. Una celda de baja calidad afectará los resultados o no dejará correr la solución de la simulación.

#### *4.- Definir propiedades del medio*

Se especifica que se está trabajando con gas, aire, flujo subsónico y densidad constante. También se especifica que el análisis será en estado permanente. Todos los análisis hechos para la aerodinámica del coche tipo formula de UNAM han sido en estado permanente debido a la simplicidad de realizar las simulaciones y de que este tipo de simulación da una idea del comportamiento aerodinámico del coche. Se especifica también que el flujo es turbulento y procedemos a seleccionar el modelo de turbulencia.

Se escoge el modelo K-Omega ya que se han hecho pruebas y este modelo de turbulencia presenta mejores resultados que el modelo K-epsilon para aerodinámica externa [11, 12]. Como se vio en el capítulo 4 este modelo es de dos ecuaciones y presenta una buena combinación entre precisión y velocidad de la simulación.

Se establecen también propiedades para las regiones. Propiedades como velocidad del aire entrante, velocidad del piso del túnel, velocidad de giro de las llantas sobre su eje, densidad del aire y presión (importante si quieres analizar condiciones en el lugar donde será la competencia).

La velocidad a la que se han hecho los análisis varía dependiendo de la temporada. Generalmente el análisis se realiza a 70 kph ya que esa es una velocidad alta que sí se alcanza en la competencia y es una velocidad demostrativa en la que podemos ver la aerodinámica tener cierto efecto.

Es recomendable tener simulaciones del mismo modelo de coche a distintas velocidades y distintos ángulos de posicionamiento para saber también cómo influyen los vientos laterales.

En esta etapa se tiene que tener comunicación con el equipo para determinar que velocidades son importantes analizar y cubrir los siguientes puntos.

- Velocidades son las más comunes
- Velocidades en cada prueba
- Velocidad promedio en la prueba de rendimiento (ya que esta es la más larga)
- Velocidades que alcanzan los equipos ganadores de la competencia en años pasados
- Velocidad a la que empieza a haber un efecto considerable para afectar el sistema de suspensión del coche

### ***5.- Obtener la solución y analizar los resultados***

La solución se corre en computadoras portátiles de los miembros del equipo y en una computadora marca "Dell". Las soluciones sin importar donde se corren arrojan resultados semejantes. Las simulaciones las corremos a la misma velocidad del aire y establecemos mismos parámetros de mallado. Correr una solución tarda de 5 a 12 horas dependiendo de la máquina que se está utilizando y el modelo que se está analizando.

En los resultados se realizan reportes de: arrastre total del coche, arrastre de la carrocería y sustentación de la carrocería. En los campos de presión se buscan áreas de interés como la presión debajo del coche. Se puede también calcular la cantidad de aire entrando al radiador o al múltiple de admisión. Se verifica que por cada rediseño de la carrocería se tenga un mejor resultado en cuanto a arrastre (menor) y a sustentación (cercano a cero). Es importante mencionar que se pueden obtener resultados por separado de cada componente. Esto para ver cómo va el proceso de diseño y mejorar eso que los resultados muestran no está ayudando a la fuerza de sustentación o disminución de arrastre.

Observando líneas de flujo y campos de velocidad podemos ver donde se desprende la capa límite y tratar de remediar lo mejor posible esos desprendimientos para disminuir el arrastre. El análisis de los reportes numéricos puede ser sencillo. El reto se presenta al aportar ideas para cambiar esos resultados. En la aerodinámica no se sabe con certeza cómo responderá el coche a un cambio de geometría. Es por esto que se deben utilizar los primeros capítulos de este trabajo para generar una idea y después empezar a probar con soluciones que otros equipos presentan y soluciones creativas que al diseñador se le ocurra. Es importante saber que la historia de la aerodinámica siempre presenta soluciones inesperadas. Así que cualquier idea tiene potencial de ser una buena solución.

## 5.4 Características de la simulación

Características de las simulaciones	
# de fases	monofásico
Estacionario/ transitorio	estacionario
Viscoso/ no viscoso	viscoso
Laminar/ turbulento	turbulento
Turbulencia	k- $\omega$
Re	$> 1 * 10^6$
Tipo de mallado	hexaédrico
Incompresible/ compresible	incompresible
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	1.2
*# de iteraciones	1000
Tipo de archivo exportado	stereo lithography (.stl)
Escala del modelo	1:1
Presión [atm]	1
Desplazamiento del piso	Sí, A la misma velocidad del flujo de aire
Rotación en las llantas	Sí, equivalente a la velocidad del piso

\* El número de iteraciones es 1000 porque una simulación puede tardar más de doce horas. Por lo tanto, al establecer un número alto de iteraciones el equipo se aseguraba de que la simulación convergiera y se guardara automáticamente al terminar las 1000 iteraciones. Si la simulación convergía antes y el operador del programa lo notaba entonces se detenía la simulación.

## Capítulo 6 Análisis carrocería temporada 2013

Para empezar a entender el diseño de la carrocería para el equipo de formula SAE de la UNAM se tiene que mencionar que este coche fue la cuarta generación de su tipo en la UNAM. La historia del equipo no se mencionará aquí pero si se hará mención de las carrocerías y enfoques que tuvieron en sus primeros tres años para incrementar el entendimiento de la evolución del equipo.

### 6.1 Primer Año California 2010

El proyecto se empezó a desarrollar en la UNAM en el año 2008. Finalmente, en el año 2010 el equipo participó en la competencia internacional organizada por la SAE en California obteniendo el título al novato del año. Su número de competición fue el 31, figura 6.1.



**Figura 6.1** Primera generación del coche del equipo de la UNAM. Foto tomada del reporte de temporada 2011.

No se tiene registro escrito del diseño de la carrocería de ese coche. Se aprecia en la foto el diseño de ductos laterales y una cubierta para el motor detrás de la cabeza del piloto. Se sabe que la carrocería fue manufacturada con lámina metálica y fibra de vidrio.

No se cuenta con un análisis de la dinámica del coche correspondiente a su aerodinámica ni con datos del peso de la carrocería.

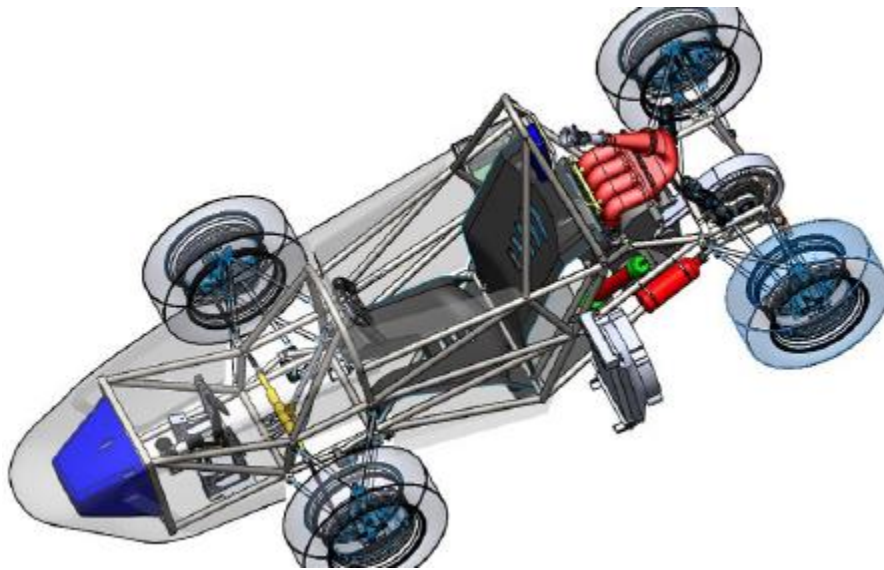
### 6.2 Segundo Año California 2011

En su segundo año el equipo de la UNAM compitió de nuevo en California con el número 36, figura 6.2. Este año por segunda vez el equipo mantuvo el título como mejor equipo mexicano en la competencia de esa categoría.



**Figura 6.2** Segunda generación del coche tipo formula compitiendo en California por parte de la UNAM en el año 2011. Imagen tomada del reporte de temporada 2011 [19].

No existe registro respecto al análisis aerodinámico del coche ya sea con pruebas físicas o simulaciones en computadora. Lo que si se tiene de información es que la carrocería fue hecha de fibra de vidrio utilizando una estereotomía<sup>4</sup> para su manufactura.



**Figura 6.3** CAD del coche tipo formula competidor de la competencia Formula SAE en California en el año 2011 [19].

En esta temporada se tiene registro de un CAD realizado por un equipo con más integrantes en comparación con la primera generación. En la figura 6.3 se aprecia la carrocería cubriendo la

---

<sup>4</sup> Estereotomía – (del griego estéreo: sólido + tome: sección) estudia la manera en que debe descomponerse una forma a construir y la forma de las piezas que la componen.

cabina del piloto incluyendo al atenuador de impactos azul al frente del coche. Con ayuda del CAD se pudo diseñar la estereotomía (figura 6.4) para después ser construida con MDF y espuma de alta densidad.



**Figura 6.4.** Estereotomía de la carrocería del coche tipo formula de la UNAM 2011.

No se tienen datos del peso de la carrocería ni de coeficientes aerodinámicos de este diseño. Sin embargo podemos apreciar que la carrocería no cuenta con ductos laterales y está formada por una sola pieza. Esta única pieza abarca toda la parte delantera del coche evitando realizar modificaciones a la pedalera o dentro del coche sin tener que desensamblarla del coche.

### 6.3 Tercer Año Nebraska 2012

Para el tercer año del equipo unammotorsports de la Universidad Nacional Autónoma de México se cambió el concepto del coche de manera drástica incluyendo colores y geometría.



**Figura 6.5** Tercera generación del coche tipo formula competidor en Nebraska por parte de la UNAM en el año 2012. Imagen tomada del archivo del equipo Unammotorsports.



El coche en la figura 6.5 presenta una carrocería compuesta de tres partes. La nariz, un ducto lateral junto con la parte trasera y finalmente el ducto izquierdo. Al separar las piezas se logra una mejora que evitará quitar toda la carrocería al querer tener acceso a la zona de los pies del piloto. Además, la carrocería de este año tiene por primera vez un piso plano con difusor. El diseño y construcción de este no están documentados por lo que es información perdida. Se sabe que para el diseño se utilizó Solid Works en su modalidad para el estudio de fluidos. Por lo tanto esta carrocería no cuenta con simulaciones ni pruebas físicas.



**Figura 6.6** Foto desde la parte posterior del coche número 51, competidor por parte de la Facultad de Ingeniería de la UNAM en Nebraska en el año 2012.

Algo característico del diseño de la carrocería de este año es que tiene una nariz muy grande y algo puntiaguda. Sin embargo, cumple con la regla, así como las carrocerías de los primeros dos años.

Al tener una nariz larga el piloto puede tener dificultades al conducir ya que tiene que tener una medida mental de cuanto mide el coche para calcular la ruta y no tirar conos durante la competencia en curvas cerradas, sobre todo en la prueba de curvas cerradas llamada "Autocross".

En cuanto a sujeciones, se utilizaron tuercas y rondanas soldadas al chasis para sujetar con tornillos la carrocería.

Para la manufactura de la carrocería se construyó el esqueleto de MDF y se utilizó unicel y espuma de alta densidad para rellanar los huecos. Una estereotomía requiere de mucho trabajo manual y que se requiere perfilar las piezas y lijar hasta hacerlas quedar como se supone deben de quedar.

Se está haciendo mención de la manufactura ya que como ingenieros, al momento de diseñar algo tenemos que pensar en cómo se va a manufacturar. Es por esto que antes de empezar a diseñar o

por lo menos al mismo tiempo hay que saber cuáles son los métodos de manufactura disponibles en cuanto a tiempo y dinero.

Una parte fundamental del diseño de la carrocería es saber cómo se va a sujetar al chasis. Este reto se presentó por primera vez en este coche número 51 debido a las geometrías que quedan en voladizo como se aprecia en la figura 6.6 la parte trasera de la carrocería es comprendida por una especie de aleta trasera. La importancia de cuando se diseña algo es asegurarse que lo que se manufacture será igual o muy parecido a lo que tienes en computadora. Al tener esta parte trasera volando aparece el reto de sujeción.

Para la sujeción de esa parte así como la parte última del difusor se utilizaron tensores de alambre de seguridad y se logran apreciar en la figura 6.6. Este funcionaría como un tope físico para esas partes. Por otro lado, este tipo de sujeción no evita las vibraciones causadas por el movimiento del coche.

Al vibrar una pieza, su posición cambia y por ende los efectos causados por esta en términos de aerodinámica son diferentes a los diseñados. No quieres decir que sean malos pero con seguridad son inestables y esto puede causar turbulencia detrás del coche e incluso afectar el coeficiente de arrastre del coche. Al vibrar una pieza de la carrocería significa que su carga aerodinámica variará a lo largo de las vibraciones. Algunos equipo de la formula uno utilizan están vibraciones a su favor coordinándolas con las vibraciones de la suspensión para obtener más agarre en momentos donde más se necesita (en curvas y cuando el coche se encuentra sobre el plano de la pista). De hecho, hay equipos estudiando la forma de producir vibraciones artificiales para lograr sus objetivos de fuerza de sustentación [20].

Para saber que tanto vibra tu pieza se necesita realizar pruebas físicas y verificar que tanto “aleteo” existe en esas partes en voladizo. Es importante mencionar que las vibraciones son inevitables. Las vibraciones existen en alas de aviones y alerones de los coches. El estudio de la interacción del aire con los sólidos y sus vibraciones cobró importancia después del accidente del puente Tahoma Narrows donde el aire hizo entrar en resonancia al puente ocasionando su ruptura. En cuanto a alas y alerones existe el término aeroelasticidad que se encarga del estudio de las fuerzas inerciales, elásticas y aerodinámicas. Sin embargo, las vibraciones y sus efectos en la aerodinámica no se abordan en este trabajo.

#### **6.4 Cuarto año: Etapa de Diseño 2013**

Nombre del coche: UM-524

Sabiendo los retos que dejaba la carrocería de la tercera generación del coche pudimos trabajar partiendo de eso. Los materiales con posibilidad a utilizar son: fibra de vidrio y fibra de aramida. Como sistema se tiene que saber el objetivo del equipo y de ahí determinar los objetivos por sistema.



Principal objetivo del equipo para la temporada 2013

- Completar de manera exitosa cada prueba dinámica de la competencia habiendo tenido confiabilidad y disminución de peso como filosofías de diseño.

Se establecieron objetivos del sistema para mejorar el sistema como:

- Tener una carrocería que vaya acorde con la geometría del chasis disminuyendo distancias entre sistemas.
- Aprovechar los puntos del chasis que estén cercanos a la carrocería para tener mejor sujeciones entre ellos.
- Tener mayor integración con los demás sistemas.
- Tener un diseño que presente el mínimo arrastre sin producir sustentación.
- Realizar por primera vez un análisis aerodinámico del coche y sus componentes para su documentación utilizando simulaciones por computadora.
- Tener un diseño simple en el que se puedan basar diseños de futuras temporadas.

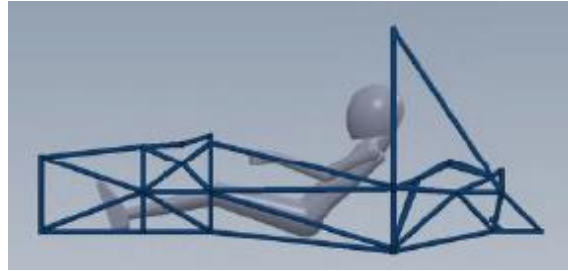
Consideraciones:

- Intercambiar datos con el sistema de masa no suspendida y enfriamiento para simular la transferencia de calor
- Intercambiar datos con el sistema de admisión de aire al motor "intake", para obtener una aproximación de cuanto aire entra al motor a cierta velocidad.
- Cuidar como afecta el diseño de la carrocería tomando en cuenta la ubicación del radiador
- Hacer distintos casos de simulación para comparar los coeficientes de arrastre y sustentación de los distintos diseños que se lleven a cabo durante la etapa de diseño y análisis.
- Se calculó un presupuesto para el sistema tomando en cuenta maquinado de los moldes en CNC por lo que pueden existir geometrías más complejas en comparación con las curvas suaves del coche modelo 2012.
- Cumplir con el reglamento actualizado de la competencia 2013.

Integrantes del sistema

- 2 Estudiantes de ingeniería
- 1 Estudiante de Diseño Industrial

Es importante hacer notar que como sistema estamos sujetos a otros sistemas. En este caso uno de los más importantes es chasis. Por esto, ese es uno de los sistemas con quien trabajar primero. Se tiene que esperar a que ellos como sistema manden un diseño avanzado del chasis para poder empezar a trabajar junto con el diseñador para tener una carrocería pegada al chasis y así tener buenos puntos de sujeción. Para lograr esto es importante tener el CAD del chasis actualizado todo el tiempo así como de otros componentes que afecten la geometría del sistema.



**Figura 6.7** Vista lateral del chasis con piloto [21].

En la figura 6.7 se puede ver como el chasis de este año es más compacto que el del 2012. Gracias a este cambio podemos pensar en tener una carrocería más ligera y más estética. Al hacer más ligeros los componentes el coche puede alcanzar mejores velocidades en mejores tiempos.

Un factor importante que no había sido mencionado es el campo de visión del piloto. En el coche del 2012 se puede ver como el campo de visión del piloto puede no ser el mejor. Esto se debe al chasis y a la carrocería que lo envuelve.

Con este diseño del chasis 2013 el sistema de aerodinámica y carrocería se tuvo que asegurar que el piloto tuviera suficiente campo de visión para conducir el coche puesto que chasis se encargó de reducir sus dimensiones de la cabina gracias a un mejor ángulo para el piloto.

Las figuras 6.2 y 6.3 muestran coches donde el piloto solía conducir con un ángulo del asiento distinto al de los 45 grados propuestos en este modelo 2013, figura 6.7.

En el momento en que el sistema de chasis entregó su aproximación a nuestro sistema se nos actualizó en el uso de software Star CCM+ para el análisis de fluidos. Es importante que si un sistema ocasiona retrasos no se desperdicie tiempo. Los primeros pasos fueron realizar análisis de carrocerías entregadas por el diseñador o dibujadas por nosotros para aplicar lo aprendido en el curso de CD-Adapco.

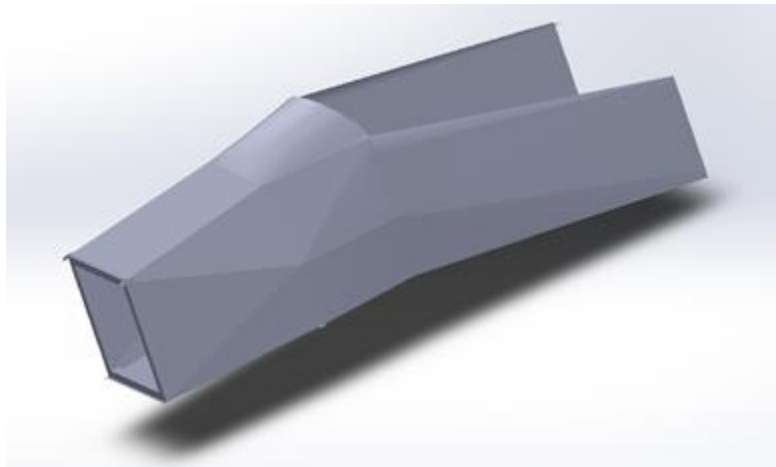


**Figura 6.8** Iteración de la carrocería #2 para analizar usando Star CCM+ [22].

Se comenzó analizando conceptos de carrocerías que pudieran llegar a parecerse al diseño final. La figura 6.8 muestra la segunda carrocería diseñada utilizando el chasis proporcionado por ese sistema. Se empezaron a calcular coeficientes de arrastre y sustentación sabiendo que estos no

podían ser los finales ya que solo se está analizando la carrocería. Cuando se analiza algo es importante tomar en cuenta la mayor cantidad de factores necesarios para tener resultados aproximados a la realidad. Una carrocería o paquete aerodinámico tiene que analizarse junto con los componentes con quienes causará el arrastre o sustentación (llantas, piloto, motor, etc.). De no ser así el análisis se considera incompleto.

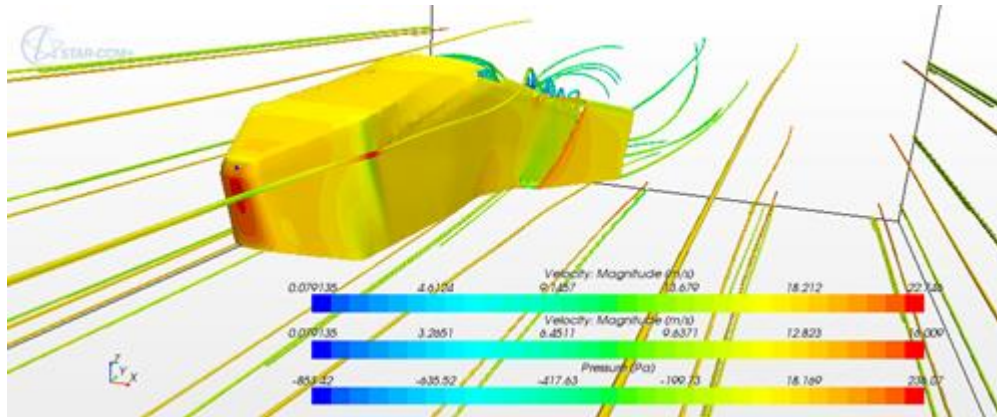
Al tener el chasis tubular lo que se realizó fue dibujar una superficie pegada a este como se observa en la figura 6.9. Como resultado se tiene una carrocería que parece no presentar curvas suaves o continuidad. De hecho se puede ver parte del chasis en la figura 6.9 al frente el cuadrado que se observa este ahí por reglamento. El atenuador de impactos se colocará a esa altura y hacia adelante. El atenuador de impactos se encuentra de color azul en la figura 6.3 y es un atenuador de impactos estándar distribuido por la Sociedad de Ingenieros Automotrices para los competidores que deseen utilizarlo.



**Figura 6.9** Iteración #2 para la carrocería de la temporada 2013.

Los primeros análisis de las carrocerías lanzaban resultados esperados. Por ejemplo, tener caras planas al principio de la nariz del coche ocasiona áreas de alta presión elevando el coeficiente de arrastre. En la figura 6.10 se aprecia el campo de velocidades representado por líneas de flujo y se aprecia también la presión sobre la superficie de la carrocería. Esta cara plana tiene que ver con la forma como fue diseñada esta segunda iteración.

Al ser un atenuador de impactos distribuido por la SAE entonces ya sabemos las medidas que tendrá y con esto se completó el diseño de la segunda iteración de carrocería para la temporada 2013. La simulación se realizó a 60 km/h y la presión máxima obtenida fue en la cara frontal de la nariz con un valor de 236.07 [Pa]. El software arroja un resultado combinado de presión y esfuerzo en la superficie. Esta simulación es un caso particular de una simulación realizada a 60 km/h. Como se mencionó previamente las simulaciones se realizaron a 70 kph.



**Figura 6.10** Líneas de flujo para el campo de velocidad y campo de presión sobre la superficie con sus respectivas escalas de la carrocería # 2.

Una ventaja del curso que nos dio la compañía para capacitarnos es que usamos el ejemplo de un coche tipo formula para la categoría estudiantil, específicamente para la competencia Formula SAE. De esta forma podemos comparar resultados con esa simulación. Además, en el curso se muestran una comparación de resultados obtenidos de esa simulación con esos modelos de turbulencia (k- $\omega$ ) con pruebas físicas comprobando que los datos tienen una aproximación aceptable para nuestros objetivos como primera temporada utilizando este tipo de herramientas. Estas comparaciones son propiedad de CD-Adapco y por eso no se pueden mostrar en este trabajo. Si se requiere mayor información contactar a la compañía.

Al empezar a diseñar la carrocería se empezó a diseñar como una sola pieza. No obstante, se sabía que iba a ser dividida para facilitar el acceso del equipo a partes del coche donde pudiera llegarse a necesitar mantenimiento y evitar quitar paneles de gran tamaño cada vez que esto suceda.

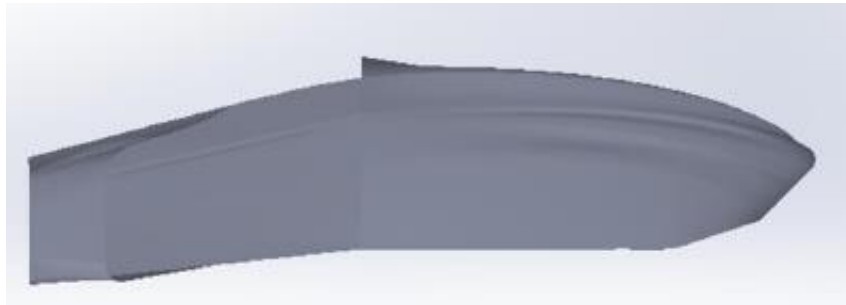
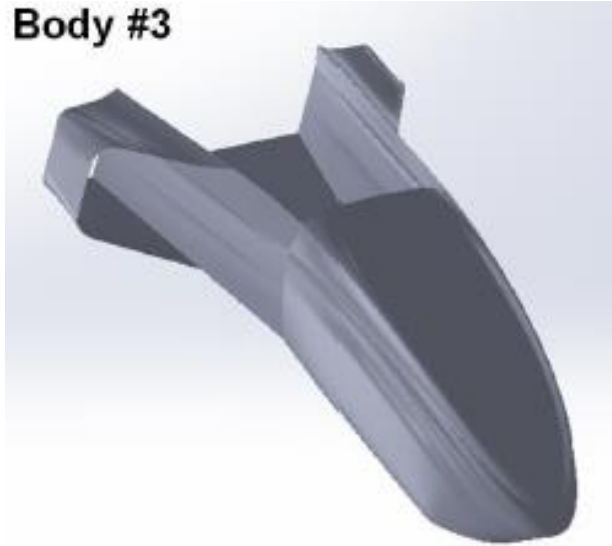
El método de trabajo adoptado por el sistema fue trabajar ingeniería en conjunto con diseño industrial. Algunos equipos se conforman de esa manera en la industria. Es vital tener buena comunicación entre los integrantes.

Como parte del proceso de diseño descrito en el párrafo anterior se establecieron puntos a tratar para la siguiente iteración de la carrocería los cuales fueron:

- Distancia que tendrá la carrocería al chasis
- Curvas suaves y continuas
- Seguir aproximando los ductos laterales ya que no se contaba con datos del sistema de enfriamiento

Para la tercera iteración ya se contaba con un mejor diseño. La parte delantera empezó a proporcionar mejores resultados ya que la cara plana desapareció y se apreciaba mayor continuidad por las líneas que van desde la nariz hasta los ductos laterales.

**Body #3**

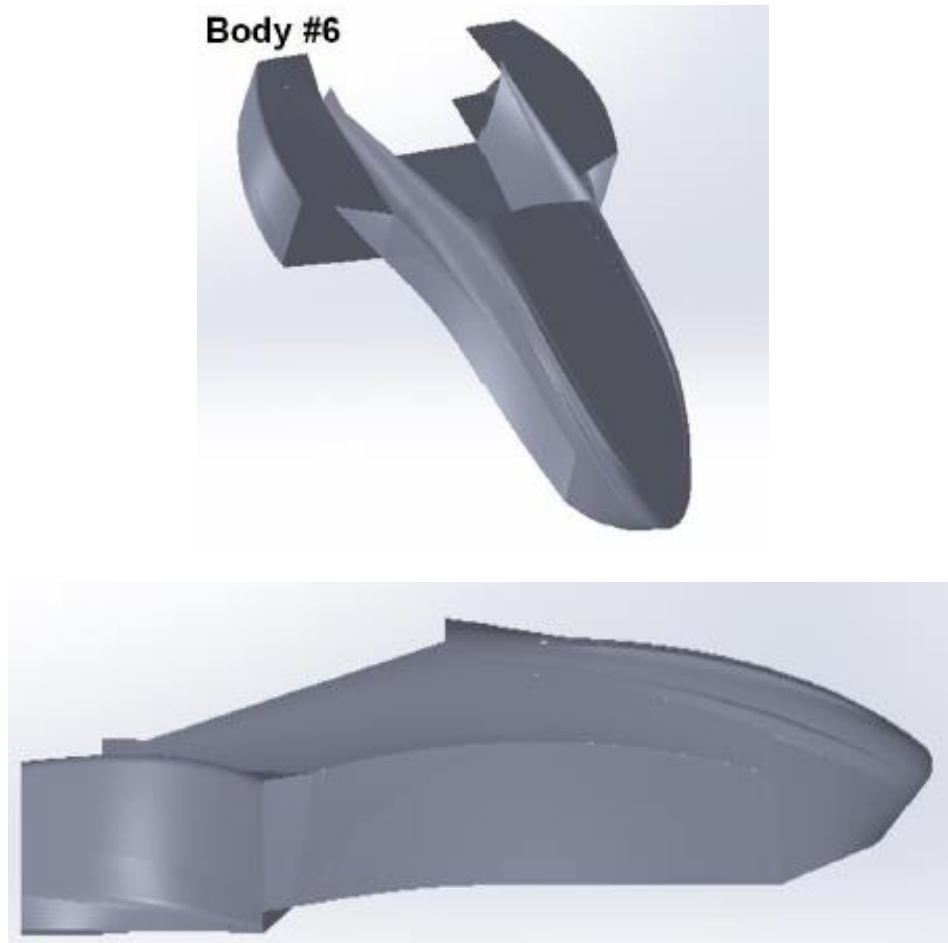


**Figura 6.11** Arriba: vista en isométrico del tercer diseño de la carrocería 2013. Abajo: vista lateral del tercer diseño de la carrocería 2013.

El diseño de la figura 6.11 presenta varias deficiencias. La parte delantera contiene líneas que para manufactura pueden ser complicadas. Ya sea que se estén maquinando o mandando a cortar por estereotomía esas líneas no eran viables para los recursos del equipo en tiempo y dinero. La cantidad de horas para lijar y perfilarlas son demasiadas, y un maquinado requeriría una máquina de 5 ejes para poder realizarlas la cual no es fácil de conseguir.

Otra deficiencia es que se el sistema de enfriamiento seguía sin enviar datos de su intercambiador de calor (posición y medidas).

Al ir en la iteración #6 ya se tenían datos del intercambiador de calor por lo que los ductos laterales ya tenían geometría aproximada. En este punto es importante mencionar que se tienen dos ductos laterales porque como hipótesis de este trabajo es demostrar que los ductos laterales disminuyen el arrastre. Como se menciona en el Capítulo 3 la estela presenta una baja presión debido a la pérdida de energía dentro de ella y provoca arrastre. Una manera para mantener o evitar la pérdida de energía es llevando un flujo de aire direccionado a la parte de atrás para mantener la turbulencia y evitar en lo posible la creación de arrastre.



**Figura 6.12** Arriba: vista en isométrico del sexto diseño de la carrocería 2013. Abajo: vista lateral del sexto diseño de la carrocería 2013.

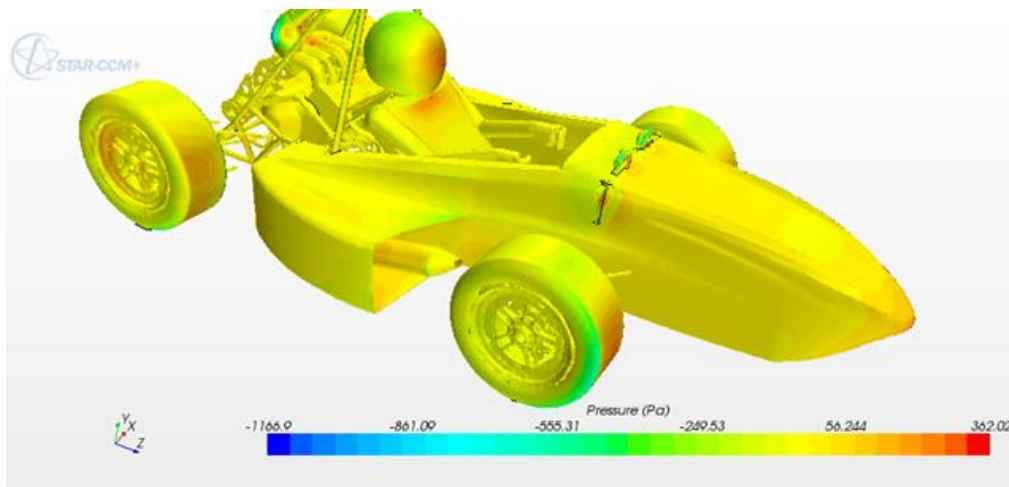
A partir de este diseño ya se empezó a realizar simulaciones con el coche completo. Al diseño #6, figura 6.12, se le realizaron varias modificaciones hasta llegar al diseño número 8 en donde los ductos laterales se parecen al diseño final. La parte delantera permaneció sin cambios en la parte superior porque no se querían hacer cambios bruscos. Se buscaba que cambios individuales produjeran cambios en los resultados y así se aseguraba que cambios realmente mejoraban el diseño.

Los análisis con los componentes del coche tomaban bastante más tiempo computacional para converger. De hecho, para limpiar las superficies se invirtieron muchas horas y cuando las superficies quedaban limpias lo único que se hacía era cambiar la carrocería. En el capítulo 5 se mencionó que se asignan regiones a las partes. Al cambiar una parte por otra se tenía que volver a asignar esa región y se volvía a realizar la malla.

En esta etapa del diseño es importante mantener la comunicación con el sistema de chasis ya que puede que hayan realizado cambios que afecten la geometría de la carrocería. Una de las desventajas de diseñar una carrocería pegada al chasis es que si el chasis cambia su diseño y no se

le avisa al sistema de aerodinámica y carrocería entonces durante manufactura surgirán errores difíciles de corregir.

En la figura 6.13 se observa el campo de presiones sobre la superficie de la carrocería y los demás componentes. Nótese que las llantas delanteras, la punta de la nariz y la cara del piloto son los componentes con mayor presión. Esta presión alcanza valores de 205.3 Pa. Los valores límite de la escala se encuentran relacionados con la definición del mallado.

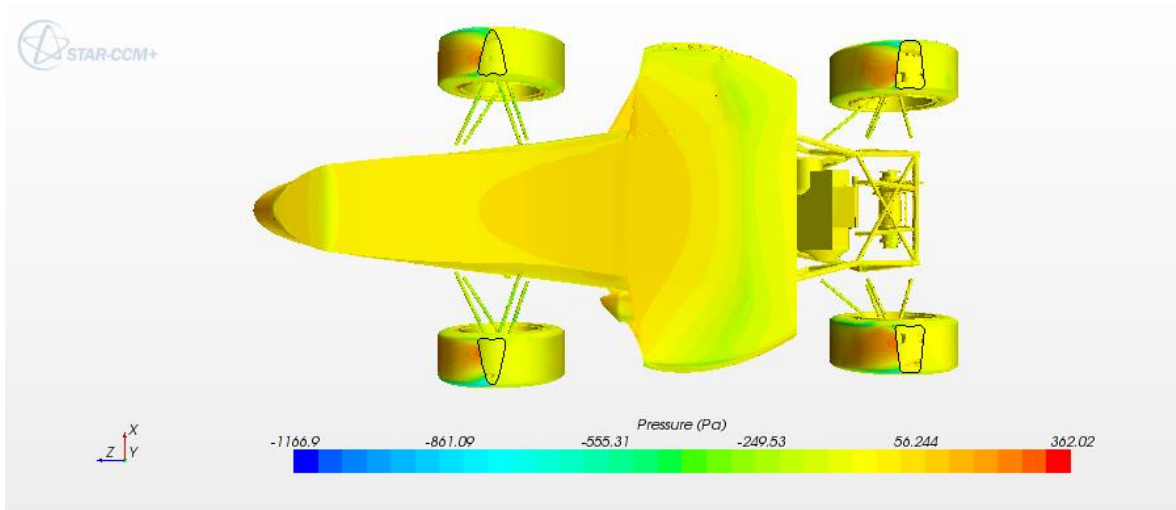
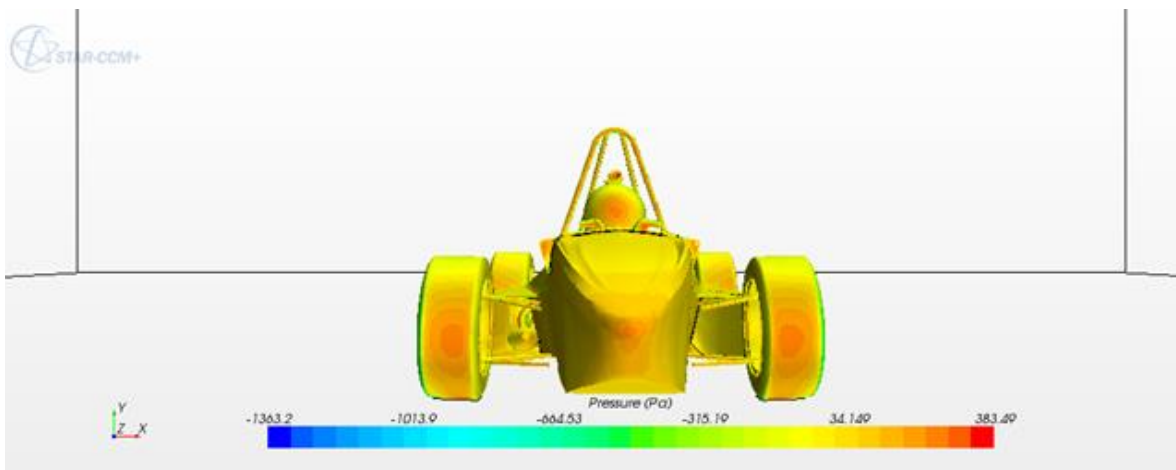
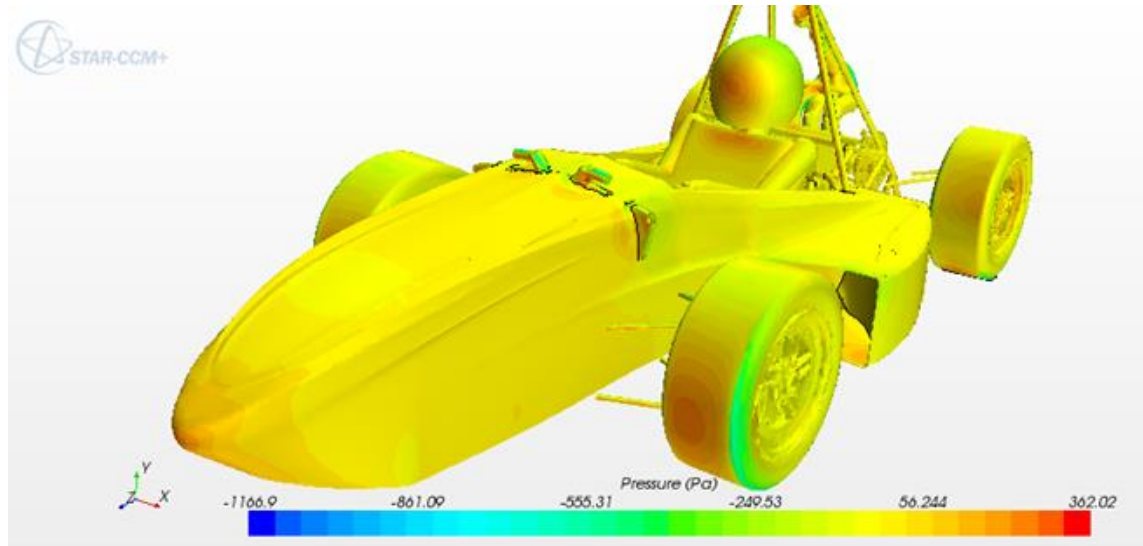


**Figura 6.13** Análisis computacional del octavo diseño de la carrocería 2013.

Los ductos laterales contienen al radiador y al silenciador. La distribución de presiones mejoró con respecto al análisis mostrado del segundo diseño de la carrocería (Figura 6.10) ya que se logró eliminar la zona de alta presión en la parte delantera de la nariz.

Diseño #	Coefficiente de arrastre total	Coefficiente de sustentación
8	0.8325	0.2906

En la figura 6.13 y 6.14 se muestran los cuerpos dentro de los ductos laterales. Especial atención a la figura 6.14 Arriba y Medio donde se aprecia el intercambiador de calor. Ahí el mallado se unió entre el intercambiador de calor y el ducto lateral. Para todas las simulaciones con intercambiador de calor. Éste se modeló con tres tipos de regiones. Se modeló la cara frontal como una salida de presión, la cara posterior como una entrada de masa al túnel de viento y finalmente el marco del intercambiador es una región pared. Esta región pared es la que se adhiere a los ductos laterales. Esto proporciona diferencias entre la simulación y la realidad. Esa parte del intercambiador de calor esta simulada como una cara tipo: salida de presión, mientras que la parte trasera del intercambiador de calor esta simulada como una cara tipo: entrada de masa, por la cual se hacía salir una masa igual a la que estaba entrando por la salida de presión delantera del intercambiador. Este método no es el mejor para simular el sistema de enfriamiento ya que en la formula 1 se simula el intercambiador de calor con un material poroso pero debido a los recursos computacionales nuestro mallado no podía ser tan específico.

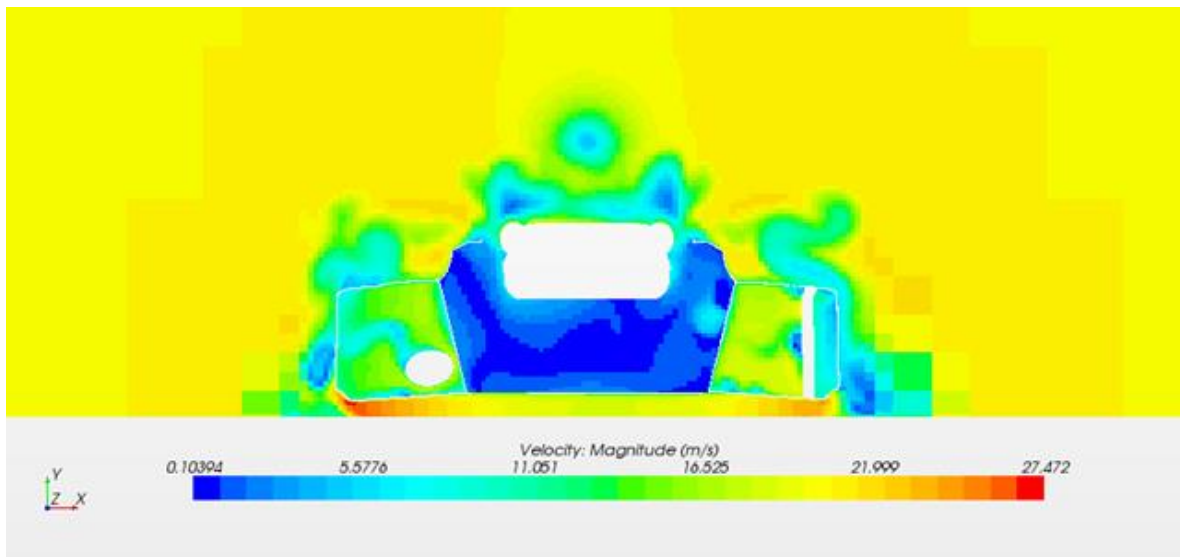


**Figura 6.14** Análisis computacional del octavo diseño de la carrocería 2013. Abajo: vista inferior del campo de presiones. Medio: vista frontal. Arriba: vista con perspectiva.



Teniendo una imagen del campo de presiones se puede visualizar que las curvas son suaves debido a la transición paulatina del campo de presiones. Teniendo datos de coeficientes podemos empezar a hacer cambios finales medibles. En la figura 6.14 Abajo se observa como la presión cambia lo cual afecta a la velocidad debajo del piso del coche (figura 6.15). Se puede notar el efecto suelo ligeramente en la misma figura 6.14 Abajo donde se ve una línea marcada por el color verde claro. Este verde claro es la presión más baja del piso y casualmente se encuentra en la parte más cercana al suelo.

Para tener una mejor idea de cómo esta interactuando el coche con el aire se utiliza además del campo de presiones en la superficie del coche los planos con el campo de velocidad como se aprecia en la figura 6.15.



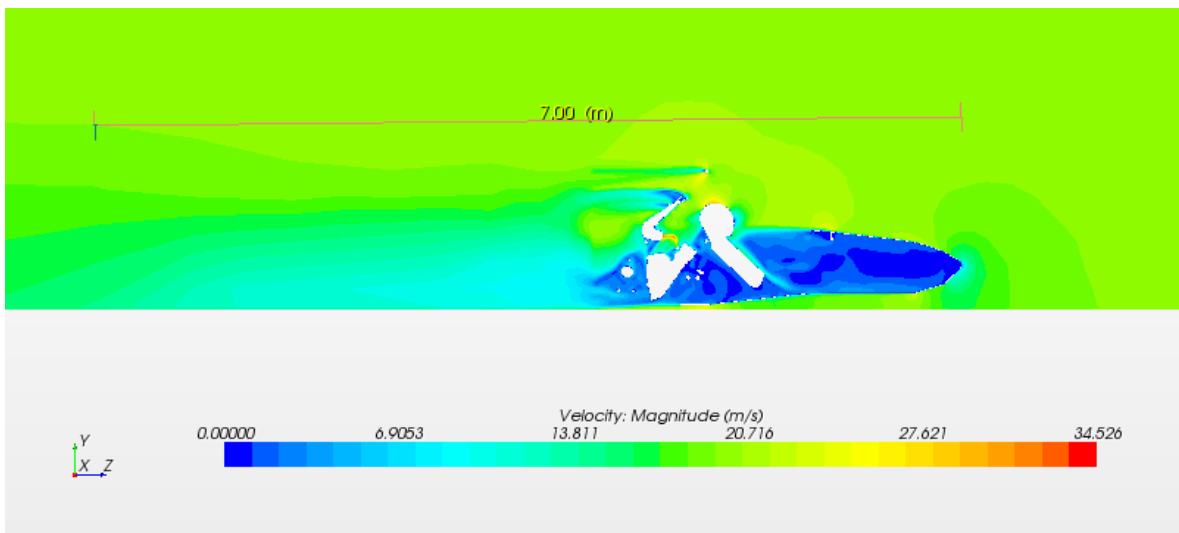
**Figura 6.15** Campo de velocidades sobre un plano paralelo a los ejes x-y a una distancia aproximada de una pulgada delante de la cara del piloto.

En la figura 6.15 se aprecian los huecos provocados por el cuerpo del piloto, el intercambiador de calor y el silenciador. Este plano muestra como el ducto lateral derecho (a la derecha del piloto) contiene al silenciador y este afecta el comportamiento del aire dentro del mismo. Para avanzar hacia un mejor diseño se usó la comparación entre dos configuraciones. La primera: con el silenciador hacia adelante como se muestra en las imágenes 6.13, 6.14 y 6.15 y con el silenciador hacia atrás. Para esto se mantuvo comunicación con el sistema del múltiple de escape de motor. Al final logramos mejores resultados con la configuración del silenciador en la parte trasera del coche alterando en menor medida el flujo del ducto lateral derecho. La comparación se realizó en los últimos dos diseños de carrocería (número 14 y 15).

Este plano de velocidades no se encuentra a la altura del punto más bajo del coche. Sin embargo se ve como el aire aumenta su magnitud debajo de los ductos laterales en los extremos. Algo curioso es que parece que el aire alcanza una mayor velocidad del lado derecho del piloto (derecha desde su perspectiva) Esto parece que se debe a que ese ducto se encuentra a menor

distancia del suelo que el ducto de la izquierda del piloto. El coche a pesar de parecer simétrico no lo es. La principal diferencia que concierne a los ductos es que el ducto izquierdo contiene al intercambiador de calor. Este debe afectar la velocidad alrededor del ducto izquierdo como se aprecia en la Figura 6.15.

Otro efecto que se aprecia en la figura 6.15 y 6.16 es la baja velocidad dentro de la cabina del piloto. De hecho se aprecian bajas velocidades dentro de la cabina y detrás del piloto en la zona del motor. Algunos equipos de carreras analizan los cascos de los competidores para ayudar a dirigir el aire de una manera positiva para disminuir el arrastre. Lo que se cree es la causa es que al estar el piloto más inclinado en comparación con el año pasado, éste produce menos arrastre ya que existe menor área perpendicular a la corriente de aire. Revisar la ecuación 2.2 para recordar la relación entre área y coeficiente de arrastre de un cuerpo (inversamente proporcional).

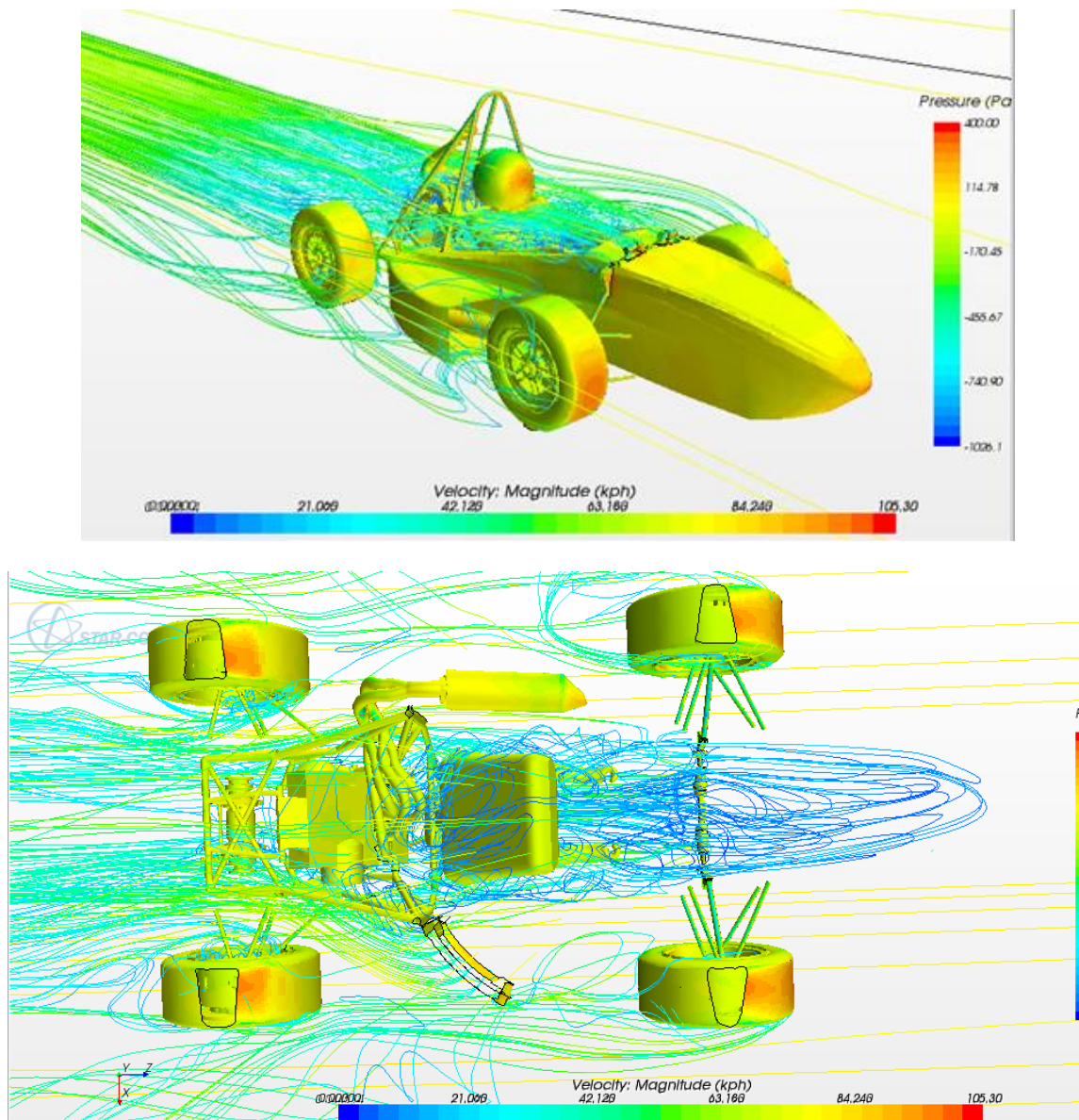


**Figura 6.16** Plano paralelo al plano y-z que contiene el campo de velocidades y una distancia midiendo longitud desde la punta de la nariz hasta la parte de la estela donde la velocidad se ve afectada por la estela de forma importante. Imagen con el diseño #8 para la carrocería 2013.

La figura 6.16 muestra una parte de la estela o “wake”. Los siete metros de la figura miden la gran distancia que la estela puede abarcar, claro que la estela no comienza en el mismo punto desde donde se empezó a medir. Como se menciona en el capítulo 3 la estela puede medir hasta 20 cuerpos de distancia. Si la velocidad a la que se realizó el análisis es de 20 m/s y en la estela estamos observando velocidades menores a 13 m/s quiere decir que se pierde energía en esa parte del flujo.

El plano lateral nos da otro dato interesante el cual resulta negativo. En el capítulo 1 en la figura 1.3 se aprecia un ángulo de ataque. Este ángulo de ataque se encuentra relacionado con la creación de sustentación (lift). Las ecuaciones 1.7 y 1.8 describen las fuerzas normal y axial. Si relacionamos esas fórmulas con las ecuaciones 1.1 y 1.2 recordamos la relación que guardan las fuerzas con el ángulo de ataque. En el caso de la carrocería 2013 se tendrá un ángulo de ataque

distinto de cero. Esto produciría un efecto de sustentación si se estuviera hablando de un perfil alar en pleno vuelo. Lo interesante aquí es que la aerodinámica de un coche de carreras está influida por el suelo. El efecto de este ángulo de ataque es que dificulta la creación del efecto suelo. Por otro lado, la creación de presiones de baja magnitud no es objetivo de esta temporada y no se le puede pedir al sistema de chasis que cambie su configuración delantera a mitad de temporada. Esto se puede tomar en cuenta para una temporada en la cual el objetivo sea producir un efecto suelo considerable para el coche. Queda en el equipo definir lo que se considera de importancia para crear sustentación negativa tomando en cuenta el efecto de ésta en la suspensión, el chasis y las llantas.



**Figura 6.17** Imagen del noveno diseño de la carrocería puesta en transparente y líneas de flujo para observar la velocidad. Arriba: carrocería número 9. Abajo: vista inferior sin carrocería.

En la figura 6.17 se deja transparente el noveno diseño de la carrocería para poder observar de mejor manera las líneas de flujo que señalan la velocidad del aire. Se aprecian las bajas velocidades en la parte de la cabina y dentro de la nariz. Se aprecia de igual manera que el cuerpo del piloto no tiene piernas. Esto se debe a que la parte dentro de la cabina no es de interés, por lo tanto se pueden eliminar. La parte frontal y media del chasis también no se encuentran en la simulación. Todos los elementos han sido eliminados pues solo aumentaban el tiempo computacional para realizar el mallado y no entregan beneficios para el resultado de la simulación. Esta figura nos muestra por primera vez el intercambiador de calor y se observa el aire saliendo por la cara trasera del mismo con un flujo constante como se mencionó previamente.

A las líneas de flujo se les asignó su origen en las llantas, carrocería y entrada del túnel de viento. La configuración fue elegida para visualizar de manera clara lo que sucede con el flujo alrededor de la carrocería. Asignando su origen en el coche se evita la necesidad de aumentar la densidad de líneas de flujo con origen en la entrada de velocidad del túnel de viento. Eso solo daría como resultado una imagen en que solo se pueden apreciar las líneas de flujo.

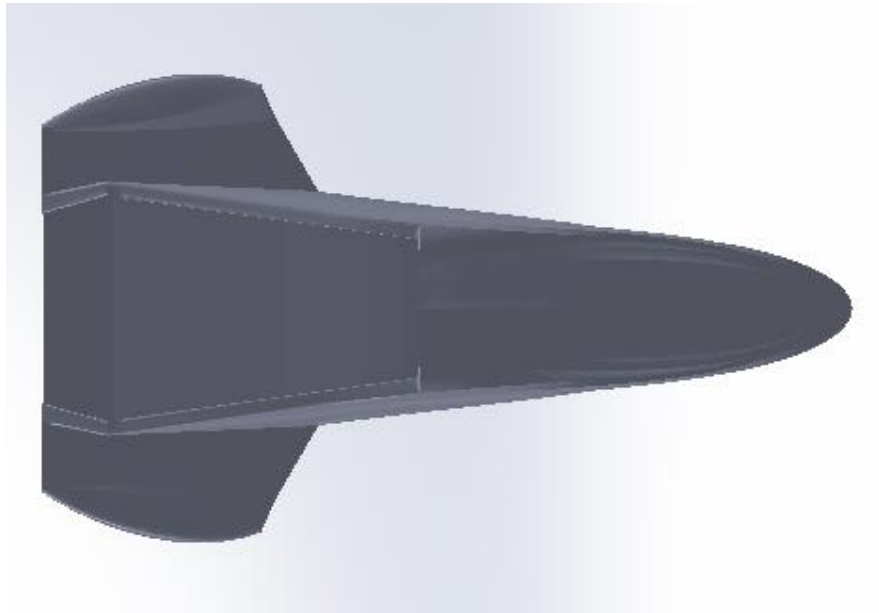
Diseño #	Coefficiente de arrastre total	Coefficiente de sustentación
9	0.8119	0.3402

Antes de continuar es importante mencionar con que datos se están trabajando las simulaciones.

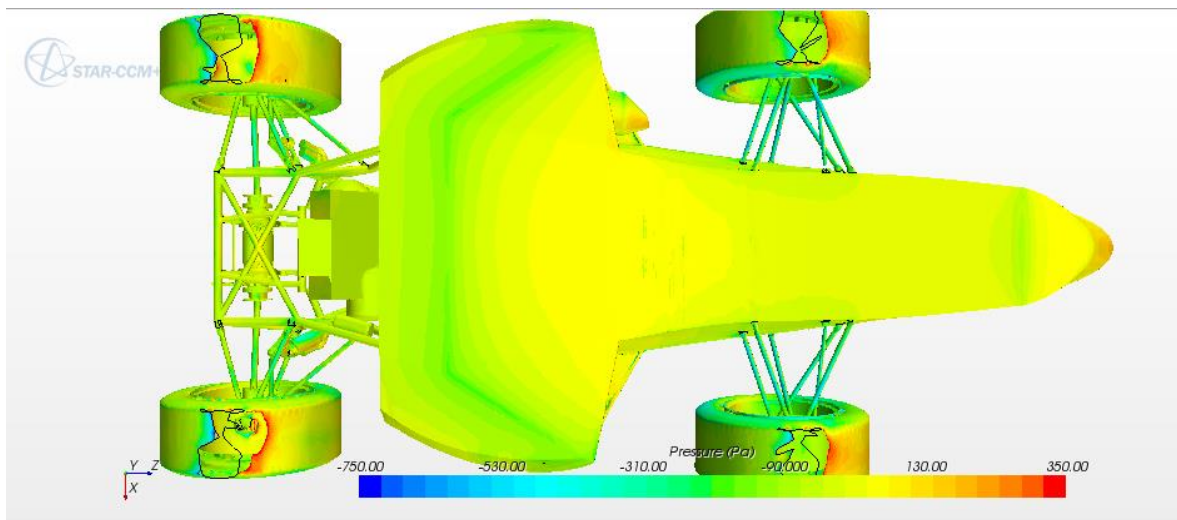
<b>Densidad del aire [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>1.2</b>
<b>Velocidad de referencia [m/s]</b>	<b>20</b>

El área de referencia permanece constante sin importar los cambios que se le realizan a la carrocería desde el diseño número 9. Claro que cambia pues la superficie no es la misma, pero este cambio no influye de manera importante en los coeficientes. La densidad del aire se asigna cuando se asignan las propiedades del medio. La velocidad de referencia se asigna en las regiones una vez que ya existe el mallado. Como se explicó en el capítulo 5 a cada parte se le asigna una región. En cada región se asignan velocidades y condiciones dependiendo del tipo de región que se esté tratando.

Se recomienda que la etapa de diseño dure un tercio de la temporada. El tiempo sobrante tiene que estar dividido en manufactura y pruebas físicas con el coche completo. Sabiendo esto, es importante aclarar que el número de iteraciones de diseño depende del tiempo que se asignó como equipo y como sistema.



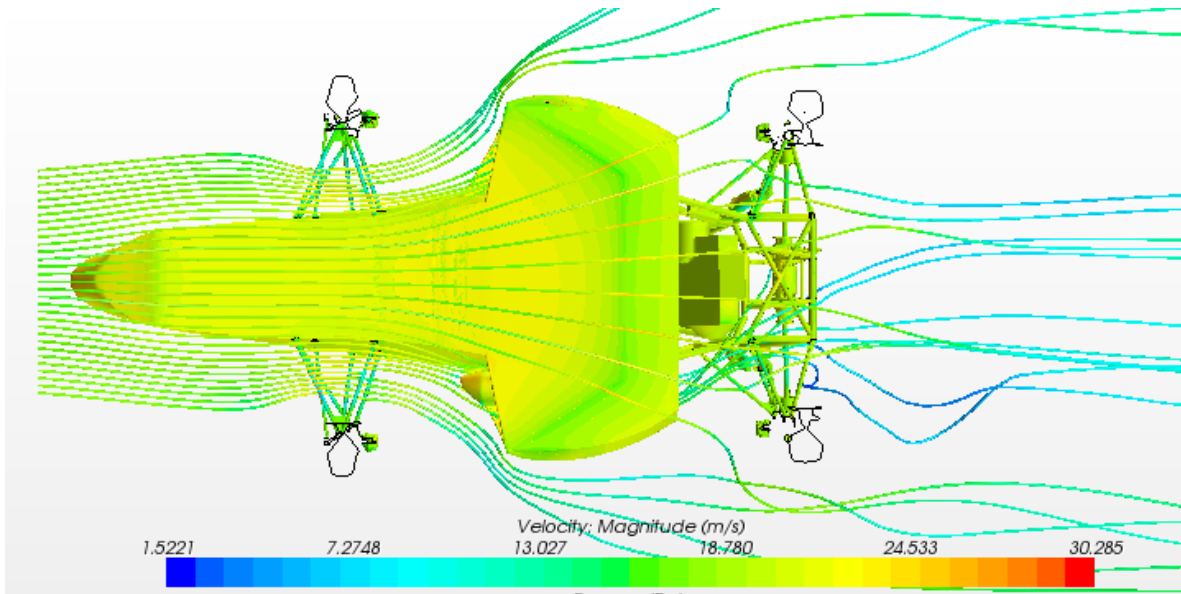
**Figura 6.18** Vista superior del doceavo diseño de la carrocería del equipo UNAM motorsports 2013.



**Figura 6.19** Vista inferior del doceavo diseño de la carrocería del equipo UNAM motorsports 2013 con el campo de presiones sobre la superficie.

La figura 6.19 en donde se muestra el campo de presiones se parece a la figura 6.14. Se aprecia una zona cerca de la nariz de color verde-amarillo que supone una presión alrededor de  $-90$  Pa y avanzando en dirección del flujo luego se observa una zona amarilla que supone una presión mayor a la previamente descrita. Después, la zona amarilla vuelve a bajar la presión y se observa una zona verde-amarilla hasta llegar a la línea verde que representa la zona de menor presión del coche que como se había mencionado corresponde a la zona de menor distancia entre la carrocería y el suelo.

Para entender mejor la causa de ese fenómeno en donde la presión pasa de un valor relativamente bajo a un valor alto y después a un valor bajo de nuevo, se añadieron líneas de flujo para facilitar la visualización de lo que puede pasar debajo de nuestra carrocería. Debajo de la carrocería lo ideal sería que las presiones fueran todas bajas para producir efecto suelo o por lo menos eliminar la sustentación.

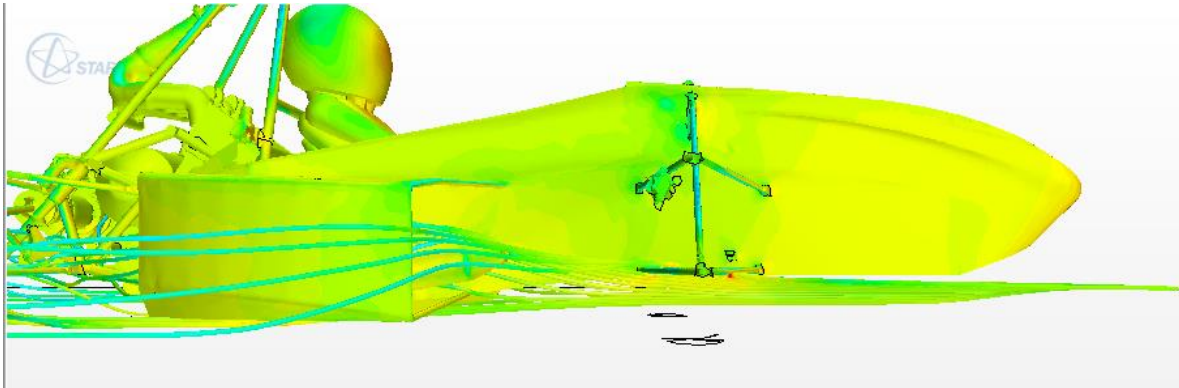


**Figura 6.20** Vista inferior del doceavo diseño de la carrocería con líneas de flujo y campo de presión sobre la superficie del coche.

Las líneas de flujo que observamos en las figuras 6.20 y 6.21 nos muestran el porqué de esa zona. Las líneas de flujo tienen su origen a una altura por debajo de la nariz. Estas se ven afectadas por las llantas ocasionando las curvas que se aprecian a la altura de la suspensión delantera. Las llantas se encuentran con su respectiva rotación en todas las simulaciones. Al terminar ese efecto de las llantas se ve como el flujo que va por debajo de la carrocería sufre una expansión ya que el flujo que va a lado de la carrocería se introduce a los ductos laterales o avanza por afuera de los ductos laterales. Esta expansión disminuye la velocidad del aire debajo del coche lo cual se aprecia de igual manera en la figura 6.14 donde se muestra el campo de velocidades en ese plano. Ese plano muestra debajo de la carrocería en el punto medio una velocidad casi de color verde lo cual significa una velocidad baja en comparación con los alrededores.

Al no tener un piso plano no se controla el aire debajo de la carrocería. Sin embargo creo que esta es un área de oportunidad para mejorar en futuros diseños. Quizás no sea necesario desarrollar un piso plano, quizás se pueda desarrollar algún elemento que mejora el comportamiento del aire debajo del coche sin necesidad de ser un piso de grandes dimensiones.

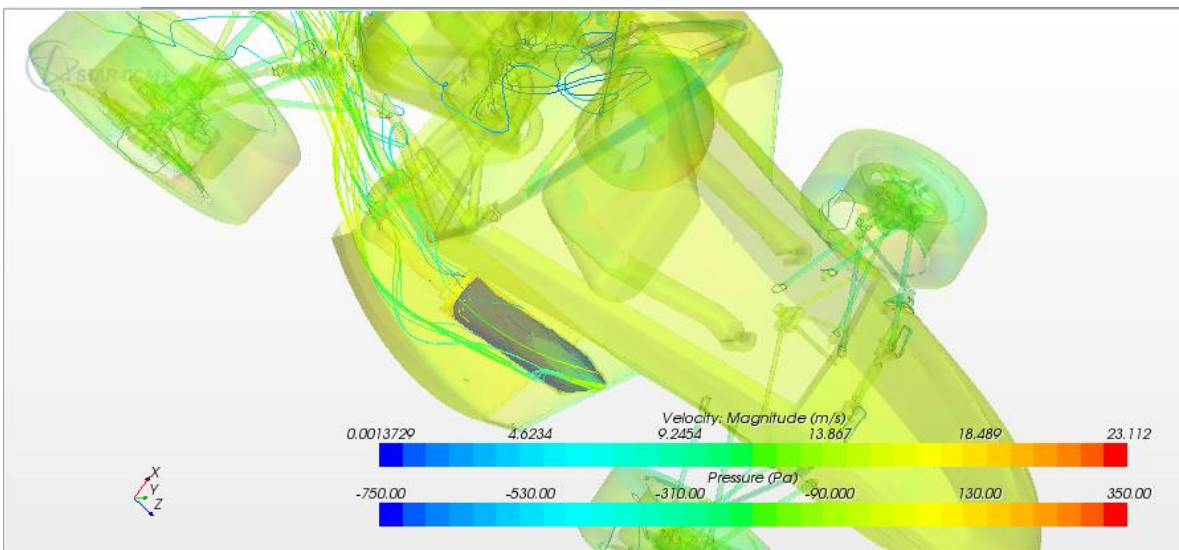




**Figura 6.21** Vista lateral del doceavo diseño de la carrocería 2013 con líneas de flujo mostrando velocidad y el campo de presión sobre la superficie del coche.

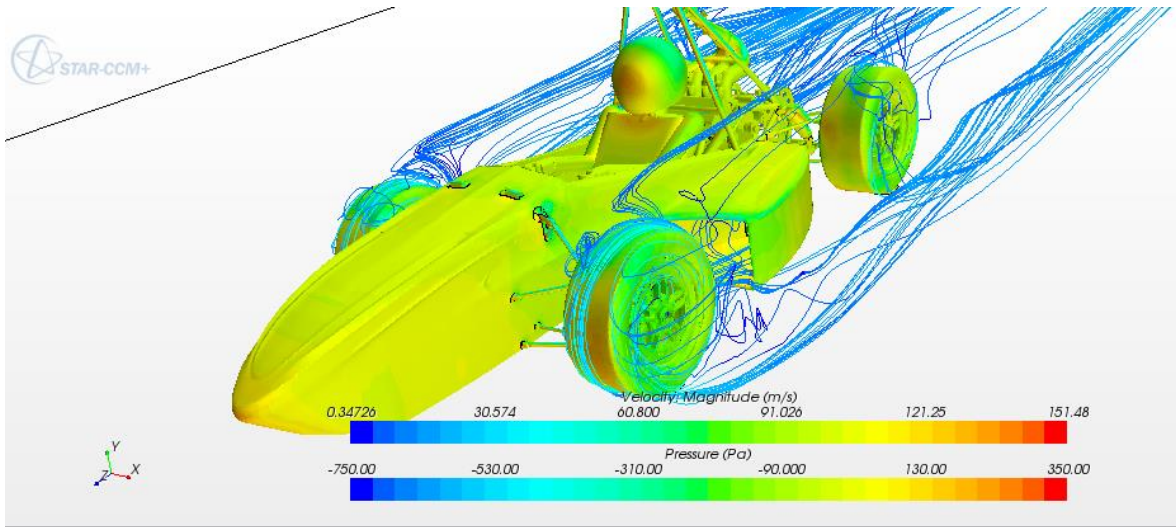
Con el doceavo diseño ya se contaban con buenos resultados. Para saber que son buenos resultados se consultaron blogs de la sociedad de ingenieros automotrices y blogs de la competencia específicamente. En estos blogs integrantes de los equipos de todas partes del mundo intercambian ideas y datos. En ellos se encontró que varios equipos que no cuentan con un paquete aerodinámico tienen coeficientes de arrastre alrededor de 0.9 y 1.0. La forma de determinar sus coeficientes variaba entre simulaciones computacionales y túneles de viento. Se recomienda leer esos blogs ya que son parte de la sociedad y los que comentan en ellos son estudiantes que desarrollan el trabajo de manera seria e incluso los jueces llegan a comentar en las discusiones lo cual agrega mucho valor [23, 24, 25].

Al ver lo que causaban las llantas al flujo se decidió realizar una simulación donde los gases de escape estuvieran presentes, figura 6.22, y el análisis de resultados se enfocaría también en ver lo que sucede con el flujo alrededor de las llantas.



**Figura 6.22** Doceavo diseño de carrocería con flujo másico saliendo del silenciador.

El análisis de la salida de los gases de escape, figura 6.22, se realizó en parte por dudas respecto a la dirección de estos al salir del silenciador. Lo interesante fue que los análisis muestran que los gases de escape pueden terminar al otro lado del coche. Claro que esta depende del modelo de turbulencia y es solo una aproximación de la realidad. Sin embargo, es interesante observar como el flujo desordenado en la zona del motor afecta la dirección de los gases de escape. Para mejorar esto se cree que los ductos laterales son parte importante. En los siguientes diseños se le harán cambios a los ductos para mejorar el coeficiente de arrastre teniendo como indicador el flujo en la parte trasera del coche.

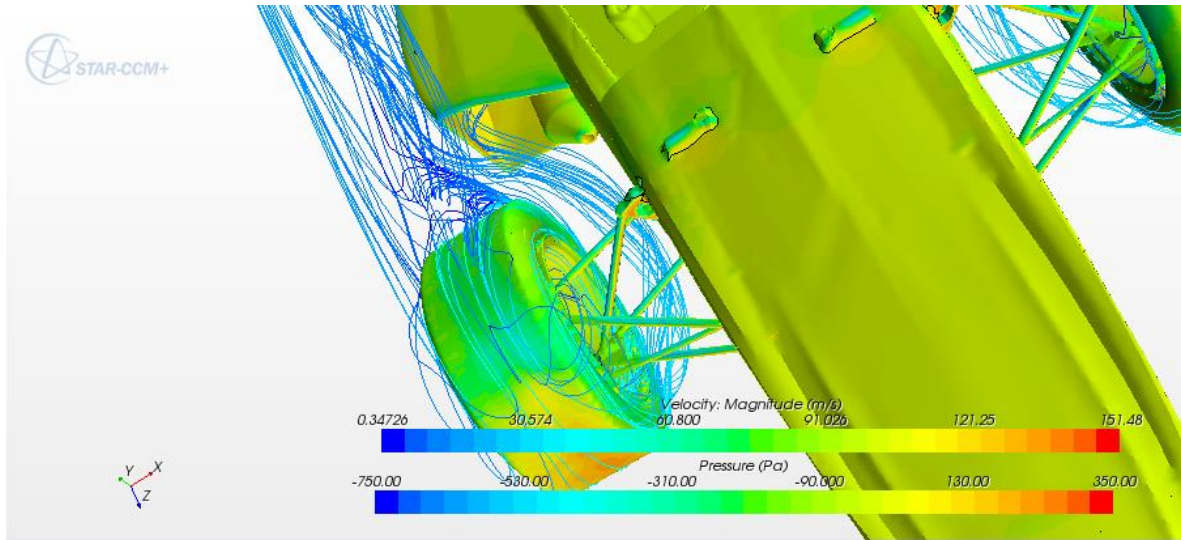


**Figura 6.23** Doceavo diseño de la carrocería con líneas de flujo con su origen en las llantas.

Al asignar las llantas como origen de líneas de flujo se obtiene como resultado la figura 6.23 y 6.24. En la teoría de los coches tipo formula se indica que las llantas son una de las principales causas de arrastre. Las figuras 6.23 y 6.24 muestran porqué. El aire al alejarse de las llantas tiende a no entrar completamente a los ductos laterales. Esto de cierta manera podría mejorarse al acercar los ductos laterales a las llantas o haciéndolos más anchos. Sin embargo, las reglas no lo permiten. En ambas figuras se aprecia la rotación que se les da a las llantas. Las líneas de flujo parecen estar girando y la velocidad del aire cerca de ellas es aproximadamente de la misma magnitud que la velocidad lineal de las llantas. Como todo cuerpo sólido estas interactúan con el aire teniendo su capa límite.

Para mejorar el comportamiento del flujo se puede añadir un alerón delantero que tenga como objetivo direccionar al aire de forma que el arrastre disminuya. Se propone este objetivo para otras temporadas.



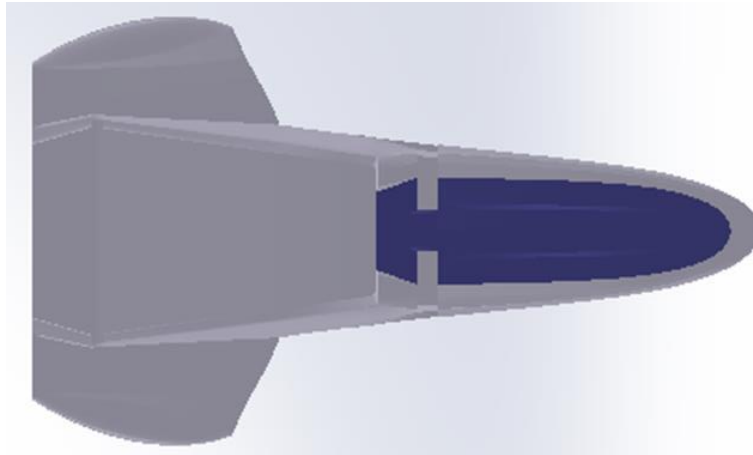


**Figura 6.24** Doceavo diseño de la carrocería con líneas de flujo con su origen en las llantas y acercamiento a la llanta derecha (perspectiva del piloto).

Se considera muy complicado poder predecir el flujo alrededor de las llantas. Lo interesante aquí es que al entenderlo mejor es posible disminuir arrastre y se puede entender mejor el enfriamiento de los discos de freno. Es una posibilidad realizar la simulación para ayudar al enfriamiento de los discos de freno. Se recomienda investigar los parámetros necesarios para realizar dicha simulación. Analizar el enfriamiento de los discos de freno es solo otra posibilidad en la que los fluidos pueden ser de utilidad. Al aire alrededor de los discos son catalogados como flujo externo por lo cual debería poder integrarse a este trabajo. Ese análisis no se realizó debido a la falta de tiempo y de interés ya que no fue objetivo de la temporada.

Diseño #	Coefficiente de arrastre total	Coefficiente de sustentación
12	0.8097	---

## 6.5 Diseño Final 2013



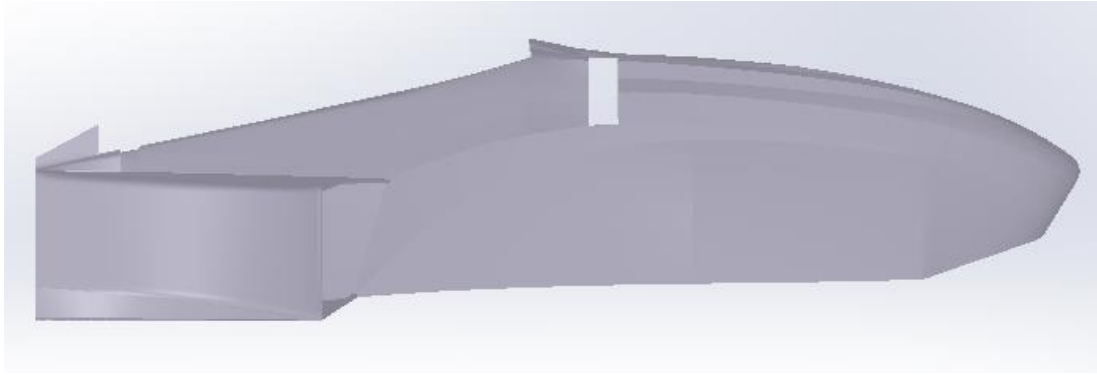
**Figura 6.25** Vista superior del diseño número catorce de la carrocería del equipo UNAM motorsports 2013.

Para el diseño 14 se realizaron cambios en las curvas de la nariz y en las curvas de los ductos laterales. Las curvas de los ductos laterales sufrieron leves cambios de ángulo mientras que las curvas de la nariz son notablemente diferentes. Ya no se muestran las curvas a los lados de la nariz. En su lugar se encuentran dos líneas en el centro de la nariz como se aprecia en la figura 6.25 en la parte de color azul.

Como se menciona previamente se realizó una comparación para ver que configuración era mejor, si el silenciador hacia adelante o hacia atrás. Al final los resultados fueron favorables para la configuración del múltiple de escape hacia atrás. El coeficiente de arrastre obtenido en esta iteración número 14 fue 3% mejor que el diseño 12.

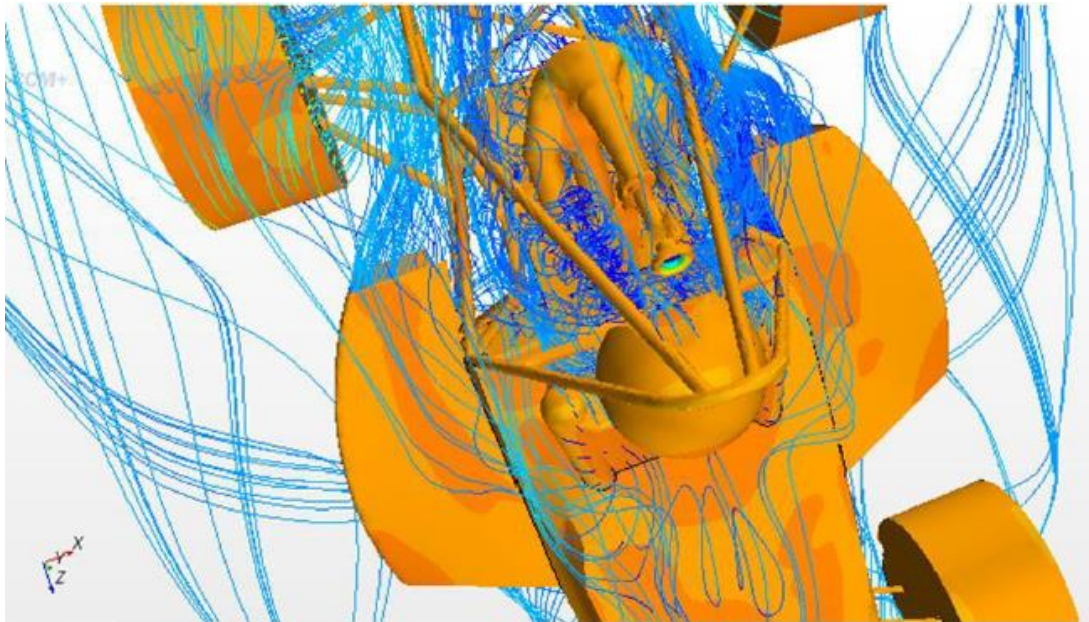
Los cambios propuestos fueron hechos por la intuición entre el diseñador y el ingeniero. Tal como David Barrera, exalumno de la facultad de Ingeniería, dijo “En la aerodinámica no hay nada seguro. Lo que funciona para un coche puede que arruine otro.” Esto quiere decir que los cambios propuestos no servirán forzosamente en otras carrocerías de otros años.

En la vista lateral del catorceavo diseño (figura 6.26) se aprecia el agujero que se tiene planeado para la suspensión delantera. Se observa también una superficie en curva justo antes de empezar la cabina del piloto. Esta curva ayudó a disminuir el arrastre en este diseño. Nótese que se conservan curvas laterales en la nariz. Se planeaba que esas curvas ayudaran al ensamblaje entre piezas. A diferencia de años anteriores la carrocería de este año estaría compuesta de 5 partes. Dos laterales, dos ductos laterales y una nariz que abarcaría desde la parte que cubre al atenuador de impactos hasta los agujeros de la suspensión.



**Figura 6.26** Vista lateral del catorceavo diseño de la carrocería 2013.

La simulación con este catorceavo diseño se realizó con la entrada de la admisión de aire al motor simulada como salida de presión. El objetivo de diseñar el múltiple de admisión tiene que ver con la restricción de aire que marca el reglamento. Al existir una restricción se diseñó un múltiple de admisión para simular presión atmosférica y así tener suficiente aire en las cámaras de combustión. La entrada se asignó como una salida de presión a presión atmosférica. Es por esto que las figuras 6.27 y 6.28 presentan un diferente color a comparación de las imágenes anteriores donde se presentan campos de presión.



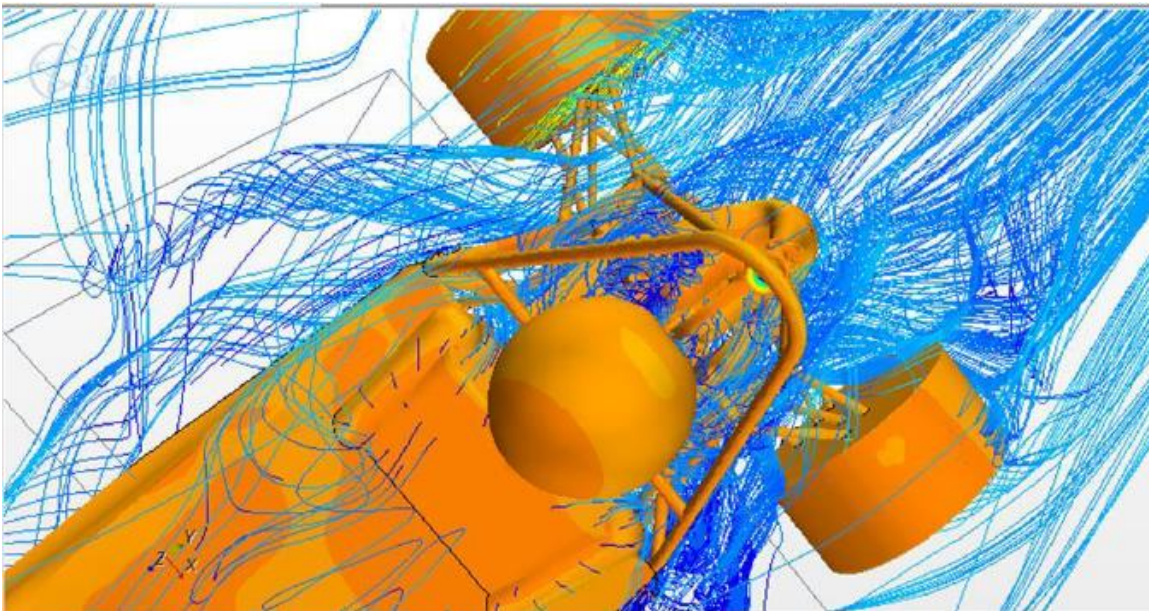
**Figura 6.27** Simulación con líneas de flujo y admisión de aire al motor con el catorceavo diseño de la carrocería 2013.

En la figura 6.27 se aprecia como en la admisión de aire los colores son diferentes a toda la superficie del coche. Además, lo valioso de esta imagen es ver como el aire sale de los ductos laterales hacia la parte trasera del coche. Las líneas de flujo se muestran por primera vez de esta forma. El aire está siendo direccionado de forma ideal hacia atrás permitiendo un flujo continuo

de adelante del coche hacia atrás disminuyendo la zona de baja energía detrás del coche y por ende disminuyendo el arrastre total del coche.

Los ductos laterales probaron ser vitales para el direccionamiento del aire y la disminución del arrastre. Sin importar mucho la nariz y la parte central de la carrocería con esta simulación parece mostrarse que con un adecuado diseño de ductos laterales (Side pods) se puede disminuir la carga aerodinámica que se opone al movimiento del coche. Esto es vital para futuros diseños, especialmente si se está planeando un chasis alternativo o un monocasco en donde los sistemas de carrocería y chasis serían uno mismo. De ser así se tendría prioridad en los requerimientos estructurales del chasis y después ver por la aerodinámica de la parte central. Sin embargo, sabiendo lo que ahora nos muestra esta simulación se sabe que el coeficiente de arrastre puede disminuirse con solo los ductos laterales.

Nuestro objetivo de tener el menor arrastre posible es difícil de establecer ya que no se tienen registros de pasados coeficientes como se menciona al principio de este capítulo. Este catorceavo diseño presenta resultados favorables y aun teniendo tiempo decidimos realizar un par de cambios para ver si podemos mejorar el resultado.



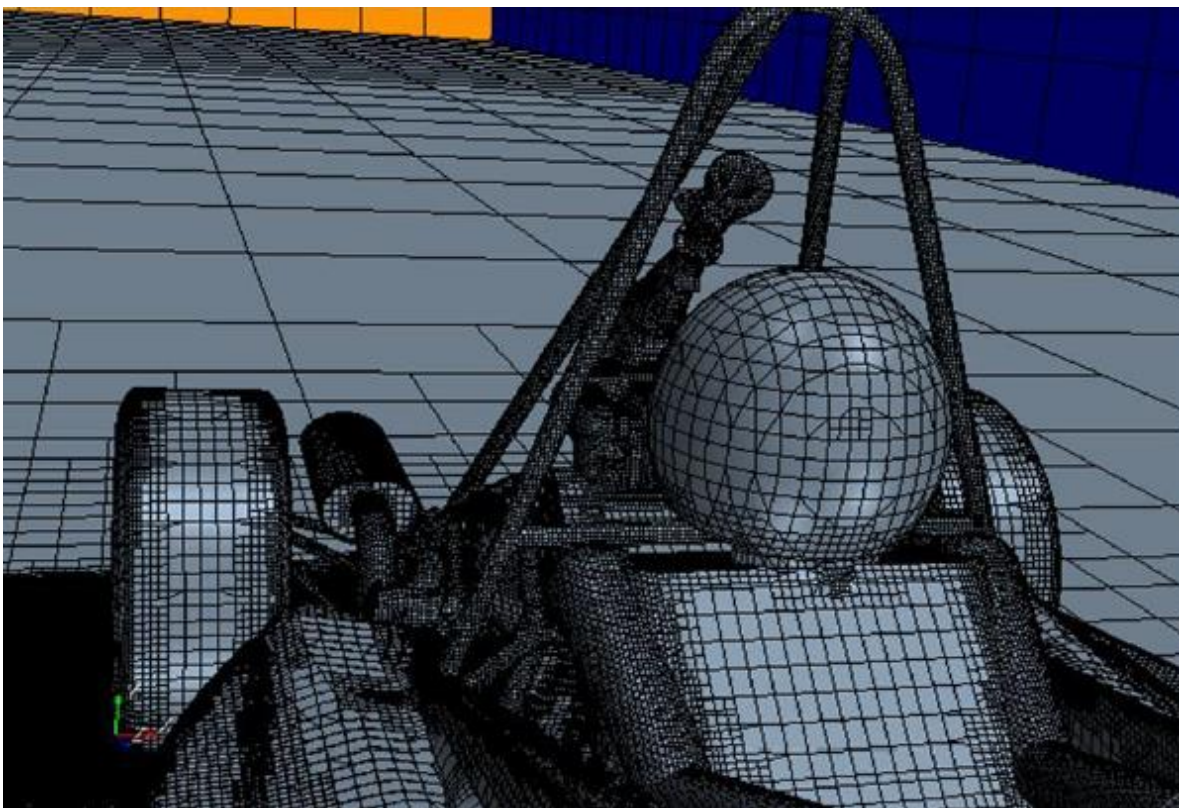
**Figura 6.28** Simulación con el catorceavo diseño de carrocería con los ductos laterales en invisible.

Antes de proceder a realizar los cambios finales. En la figura 6.28 se observa de mejor manera como es que los ductos laterales mejoran el flujo detrás del coche. Se observan dos corrientes principalmente. Una corriente viene desde las llantas delanteras y la otra es creada gracias a la geometría del ducto lateral. Ambas corrientes se combinan para que a la salida el aire evite chocar con las llantas traseras que es lo que se busca para mantener la cantidad de movimiento. Es interesante ver como una curva distinta produce una mejoría en los resultados tan importante como lo que se presenta con esta carrocería.



En la figura 3.11 se muestran vórtices y después se explicó como estos ayudan producir sustentación negativa. En este caso, los vórtices que vemos en la figura 6.28 son definitivamente positivos para la disminución del arrastre. Como se menciona en el capítulo 3 la ruptura de ellos causaría un efecto negativo en este caso en arrastre. Aquí la importancia de la creación de vórtices alrededor de las carrocerías de los coches tipo formula. Sí se demuestra algo con esto y se confirma con la teoría es que las geometrías que produzcan vórtices son lo más adecuado para mantener la cantidad de movimiento y evitar la pérdida de energía con la cual se incrementa el arrastre.

Diseño #	Coefficiente de arrastre	Coefficiente de sustentación
14	0.7854	--



**Figura 6.29** Mallado con el catorceavo diseño de la carrocería y el múltiple de escape apuntando hacia atrás.

El mallado en la figura 6.29 se aprecia de distintos tamaños, esto se debe a las distintas geometrías. Por ejemplo, para la entrada de aire al motor se aprecia un mallado muy fino pues se agregó en esa zona un volumen de control dentro del cual el mallado es mucho menor para poder satisfacer las necesidades de las curvas fuera y dentro de esa pieza. Se aprecia el múltiple de escape con dirección hacia atrás del coche. Esta es la configuración final del silenciador. Un segundo volumen de control se aprecia en el piso donde no se ve el mallado debido al tamaño tan fino de las celdas. Este volumen de control en el piso se debe al interés por el flujo debajo del

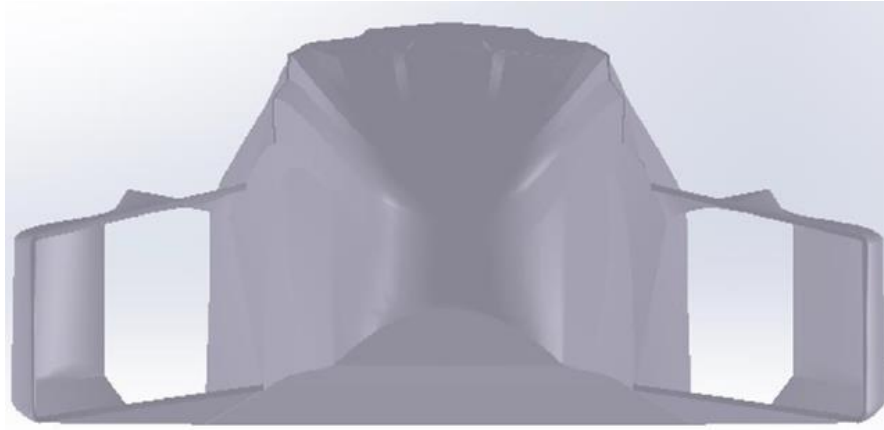
coche y la interacción entre el piso y las llantas. El volumen de control se realizó por recomendación de Star CCM+.



**Figura 6.30** Diseño número 15 y final de la carrocería 2013 para el equipo UNAM motorsports.

Finalmente para el último diseño de la carrocería, figura 6.30, se realizaron pequeños cambios como por ejemplo la esquina que se aprecia en la vista frontal (figura 6.31) en cada ducto lateral. Se aprecian superficies en forma de picos y sorprendentemente estos mejoraron el resultado del arrastre. Las imágenes mostradas no muestran la configuración final de las piezas que como se describió son cinco. Sin embargo ya cumplen con todos los objetivos propuestos al principio de la temporada. Las figuras 6.34 y 6.35 muestran la cercanía de la carrocería con respecto del chasis. Los puntos más cercanos al chasis tienen entre 3 y 6 mm de distancia. Esto es para evitar errores al momento de realizar los moldes ya que el sistema de chasis también cuenta con errores de manufactura.

Es muy complicado lograr un chasis exactamente como el que se tiene en CAD a pesar de que se diseñan escantillones que ayudan en la manufactura. Para evitar errores es mejor siempre contar con una tolerancia que deberá ser corroborada en el momento en que el sistema de chasis termine su manufactura.



**Figura 6.31** Vista frontal del diseño final de la carrocería 2013.

Al terminar ellos su chasis como sistema se tiene la obligación de medir y comparar con el CAD para corroborar que las tolerancias son suficientes. En nuestro caso, el chasis contaba con pequeñas imperfecciones que no afectaron a los moldes y se continuó con la manufactura.

Diseño #	Coefficiente de arrastre total	Coefficiente de sustentación
15	0.7774	--

Densidad del aire [kg/m <sup>3</sup> ]	1.2
Velocidad de referencia [m/s]	20
Área de referencia [m <sup>2</sup> ]	0.87
Fuerza de arrastre (20 m/s) [N]	155

#### Física de la simulación:

- Densidad constante
- Estado permanente
- Flujo turbulento
- Turbulencia k-Omega

La figura 6.32 muestra de nuevo el volumen de control para el mallado utilizado debajo del piso. Muestra también el intercambiador de calor que se encuentra de lado izquierdo del piloto y su color amarillo nos señala que esa parte está asignada a una región cuya clasificación es salida de presión.

Al momento de realizar el mallado se debe cuidar que las superficies no se fusionen. Esto suele pasar a veces debido a la cercanía de las geometrías y al tamaño de mallado. Existen herramientas para evitar que suceda. Atención especial entre el piso del coche y el suelo, entre las llantas y el suelo y entre componentes que se encuentren pegados a la carrocería y la carrocería. Nuestra

simulación contiene elementos en exceso en comparación con las recomendaciones de la compañía. Al contar con el equipo computacional se consideró apropiado dejar los elementos.

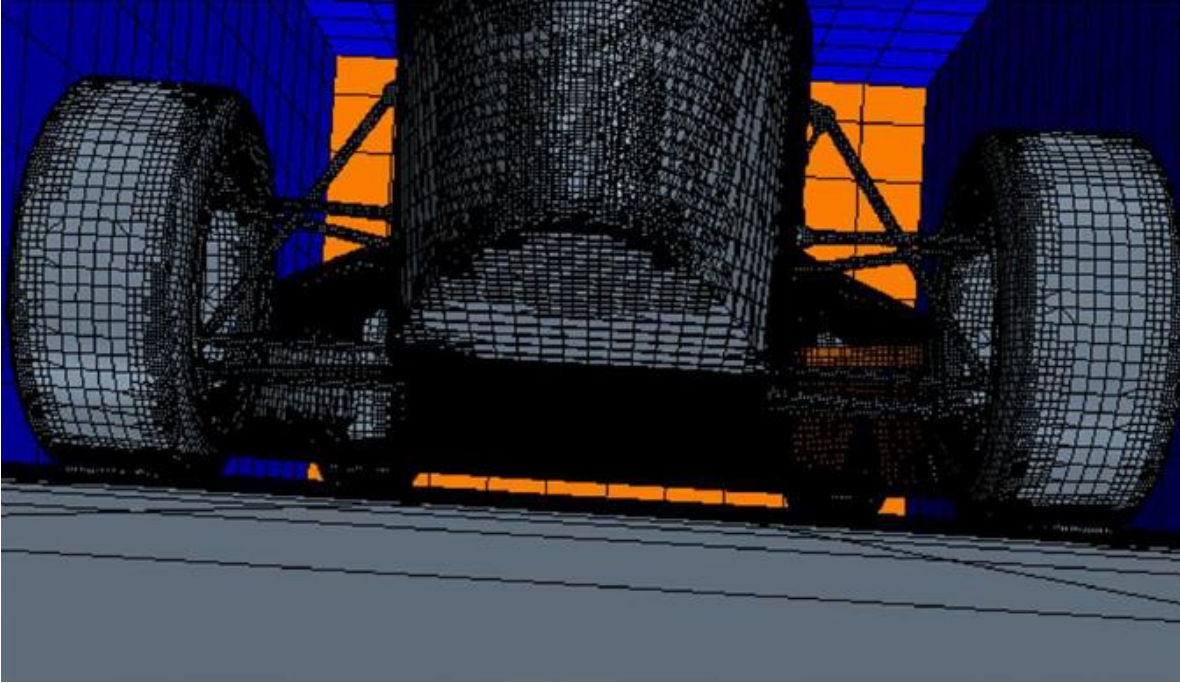


Figura 6.32 Mallado con vista desde abajo del coche.

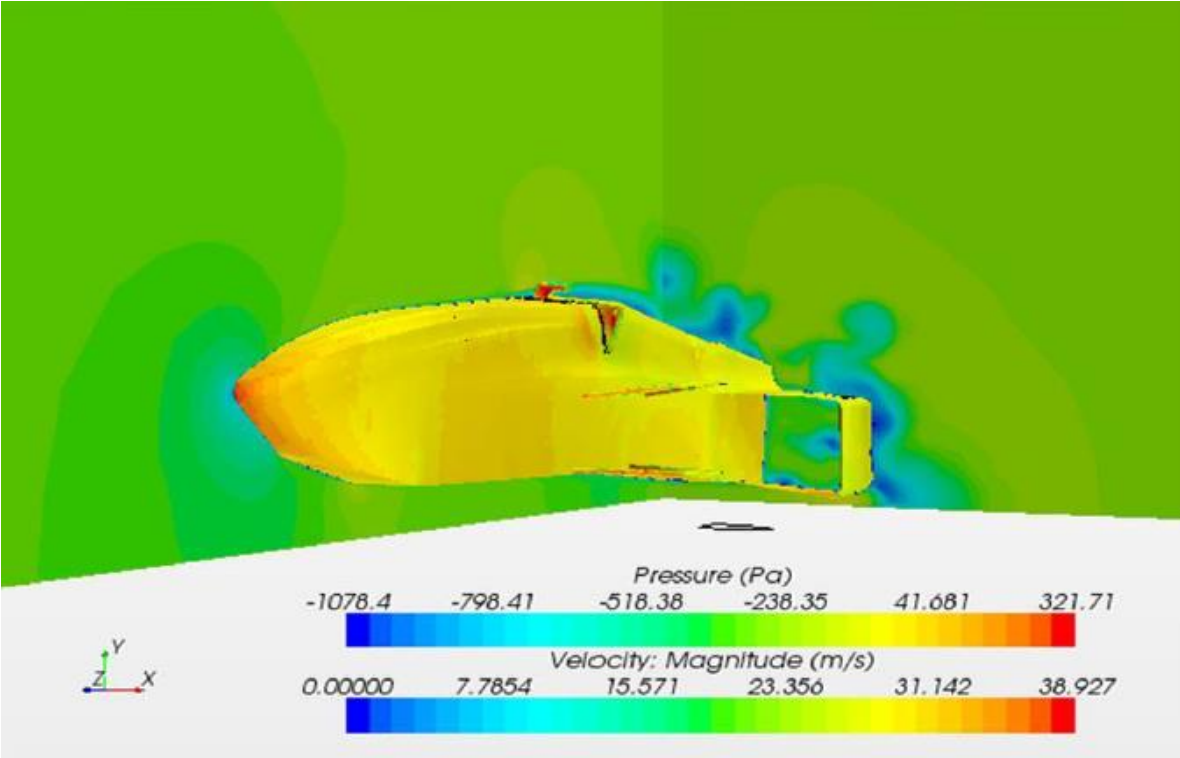
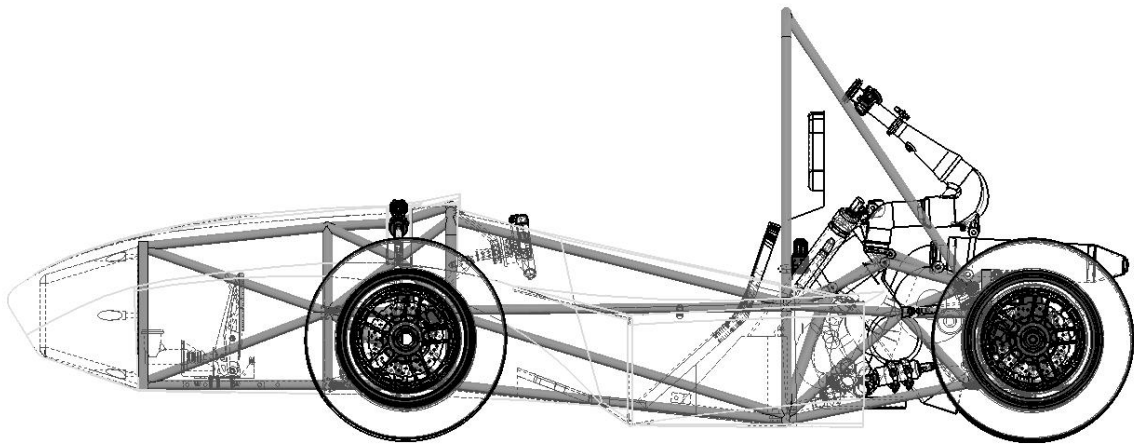


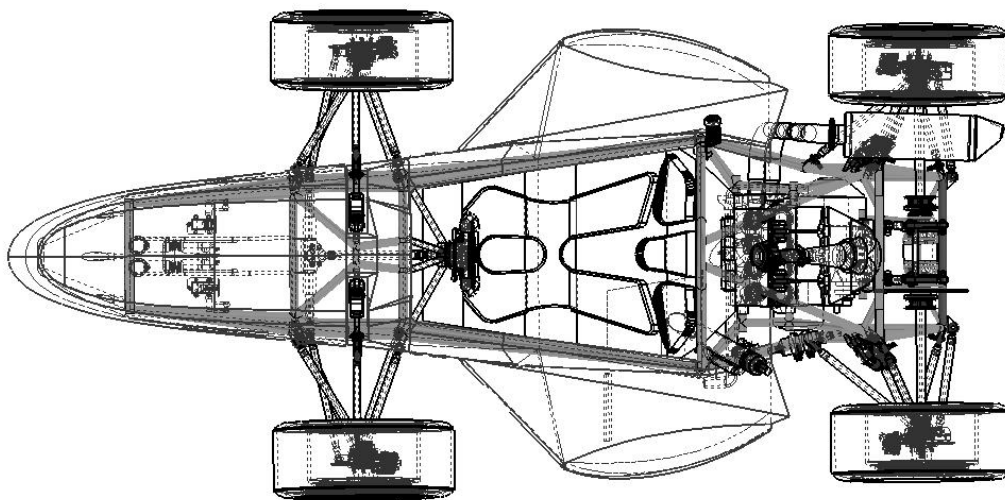
Figura 6.33 Planos con campo de velocidad y superficie del coche con campo de presión (llantas fuera de escena).



Llama la atención el plano con el campo de velocidades puesto que muestra como las velocidades siguen siendo afectadas principalmente por las llantas. Esto se aprecia debido a la zona donde las velocidades disminuyen. Estas se sitúan corriente debajo de las llantas. Otro factor importante es la distancia del piso del coche al suelo, esta tiene que ser simulada lo más real posible ya que al ser un cuerpo cuya aerodinámica interactúa con el suelo, la distancia se vuelve indispensable para la correcta aproximación de los resultados. La figura 6.33 muestra como existe mayor distancia de la nariz al piso que la parte trasera de la carrocería al coche. Para la simulación se utilizaron las llantas como referencia. En todo momento se realizaron los análisis con las distancias que suspensión determinaba. La figura 6.34 ayuda a visualizar como el chasis marca la geometría de la carrocería y efectivamente se encuentra a mayor distancia del suelo en la parte delantera que en la parte trasera. Las figura 6.34 y 6.35 muestran también las tolerancias que se mencionaron previamente.



**Figura 6.34** Vista lateral del coche con carrocería. (UM-524)

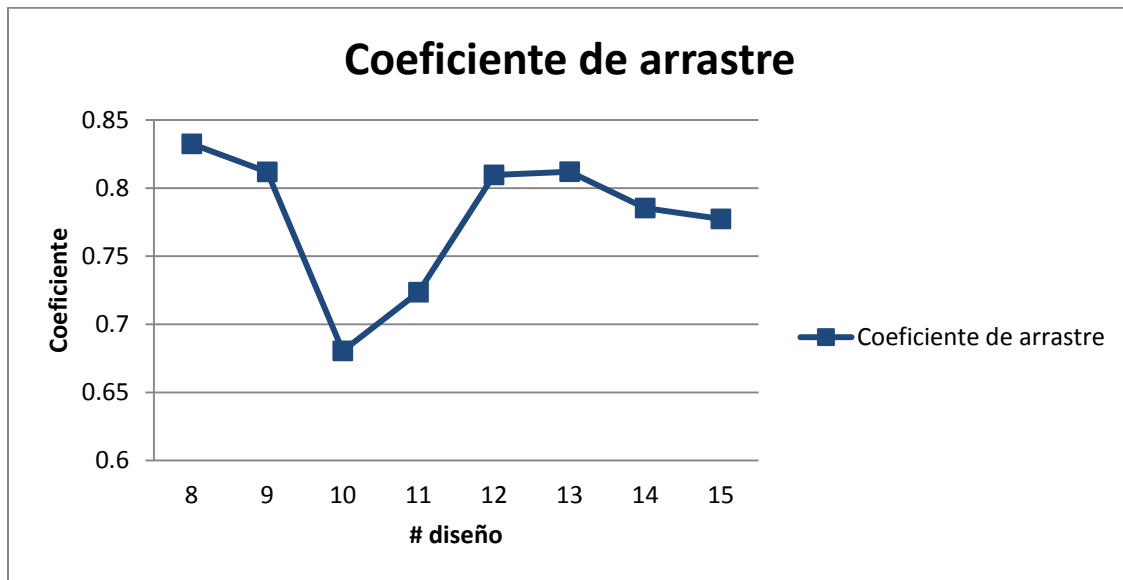


**Figura 6.35** Vista superior del UM-524 con carrocería y todos sus componentes.

Se pueden apreciar mejoras del diseño de la carrocería si se observa la figura 6.3 y se compara con las figuras 6.34 y 6.35. Se mejoró en cuanto a adaptación de la carrocería al chasis, así como diseño aerodinámico. Al tener menor área frontal, porque una comparación visual puede ser realizada, tendería a tener mejor coeficiente de arrastre. No solo se ve la evolución de la carrocería sino de todos los componentes del coche.

En cuanto a las sujeciones, al ser la carrocería una superficie más cercana al chasis, esta puede ser sujeta a éste con diferentes medios sin necesidad de usar tornillos y tuercas. Se analizaron piezas de plástico como cinchos y velcro y una combinación de estos fue lo mejor.

La figura 6.36 muestra la gráfica del avance que se obtuvo con las últimas carrocerías. Lo importante del último diseño es que ahora se tiene un parámetro para comparar futuros diseños. Ese coeficiente de arrastre debería ser mejorado o en todo caso se debería ver cuánto se afecta con la creación de sustentación negativa. Este resultado de 0.77 es un número muy bajo. Como se ha mencionado, algunos equipos tienen sus coeficientes alrededor de 1.0. La clave radica en la forma de determinar este coeficiente. Algunos equipos utilizan túnel de viento para determinar sus coeficientes lo cual es recomendable ya que cuenta como prueba física y las pruebas físicas deben corroborar las simulaciones por computadora.

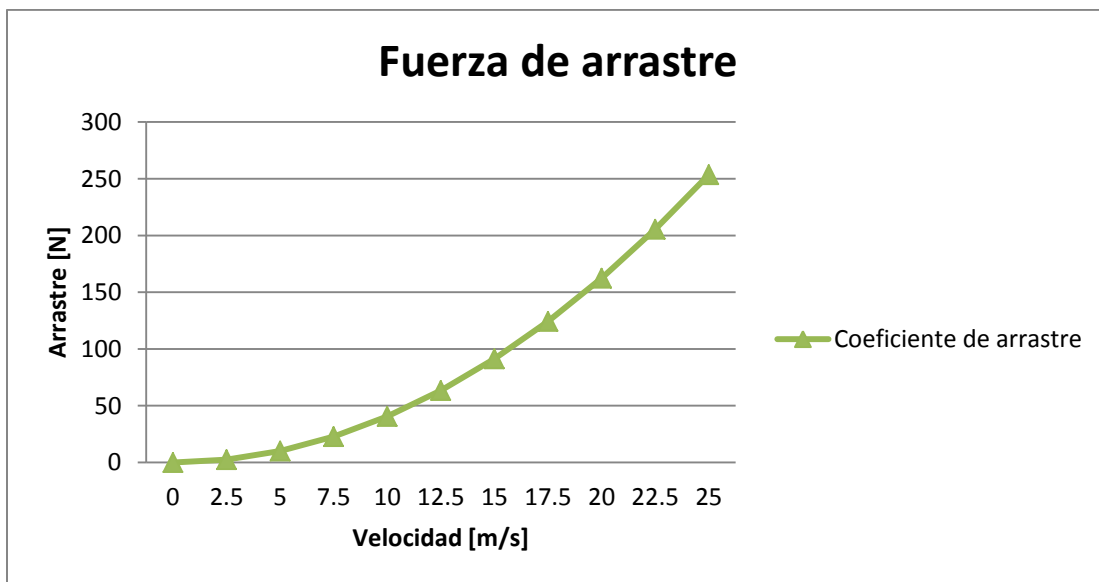


**Figura 6.36** Tabla comparativa de coeficientes de arrastre en diferentes diseños de carrocería de la temporada 2013 [ $Re=1.6 \times 10^6$ ].

Ahora bien, en la figura 6.36 existen dos valores que se encuentran por debajo del coeficiente de arrastre total (0.7774). Estos dos modelos son el resultado de un cambio importante que hubo en el sistema de enfriamiento de esa temporada. El sistema de enfriamiento informó que su intercambiador cambiaría de posición por lo que las simulaciones número 10 y 11 se realizaron sin una apropiada representación del intercambiador de calor dentro de uno de los ductos laterales.

Por esto, los resultados de esas simulaciones no pueden ser utilizadas para justificar el diseño de la carrocería 2013.

Dependerá de la manufactura el parecido de la realidad con la simulación. En las figuras 6.37 y 6.38 se muestran la carrocería en etapa de manufactura. La manufactura se debe realizar con por lo menos un mes de anticipación para terminarla justo antes de la competencia. Lo ideal es empezar la manufactura un mes antes de la pruebas para que la carrocería tenga sus respectivas pruebas. En estas pruebas se observa el comportamiento de las sujeciones sobretodo, así como vibraciones de los ductos laterales y estabilidad de todas las partes cuando el coche se encuentre en movimiento.



**Figura 6.37** Fuerza de arrastre del coche 2013 a distintas velocidades [Se calculó con la ecuación (2.2)].

La figura 6.37 muestra la fuerza de arrastre que se tiene a distintas velocidades. Es importante mencionar que la fuerza de arrastre toma importancia a altas velocidades. Altas velocidades que dependen de la dinámica del coche. Es decir, a un coche que alcanza velocidades alrededor de 25 m/s entonces dependiendo de su coeficiente de arrastre y área frontal (área característica) tendrá carga aerodinámica importante. Para saber que tan importante es la carga aerodinámica es necesario saber el porcentaje que la fuerza aerodinámica ocupa en un balance de fuerzas de todo el coche. Si bien es cierto que en vehículos comerciales un coeficiente de arrastre bajo se traduce en ahorro de combustible, es importante identificar la fuerza del vehículo para avanzar pues si esta fuerza es de 6,000 [N] y de arrastre se tienen 250 [N], entonces no es tan importante.

El balance de las fuerzas debe ser una sumatoria igualada a cero entre la fuerza motriz en dirección del movimiento del coche ( $F_m$ ), arrastre en oposición al movimiento del coche ( $F_a$ ), fricción de las llantas (resistencia a la rodadura,  $F_f$ ) y el producto de la masa del coche por la aceleración.

$$m * a = Fm - Fa - Ff \quad (6.1)$$

Cada equipo debe tener como objetivo el porcentaje de fuerza aerodinámica que se debe tener con respecto al balance de fuerzas. Se debe incluir esto en el concepto de coche. El concepto se aclarará en el siguiente capítulo. Es aquí cuando una vez más se ve que el sistema no puede trabajar solo. Tiene que estar en constante comunicación con otros sistemas y tener un entendimiento de lo que sucede con el coche como un todo.

Es importante saber que una manufactura requiere de adaptación al chasis y esto se traduce en tiempo de trabajo extra. Se recomienda tener el equipo de trabajo adecuado para manufacturar el diseño que se planeó en computadora. De no ser así los resultados de la simulación variarían mucho con respecto al valor real y no solo debido a manufactura si no a diferencia en diseño.



**Figura 6.38** Manufactura de la carrocería 2013. Presentación de la nariz y laterales al coche para afinar detalles.

Los ductos laterales presentan un problema de sujeción ya que las piezas resultaron ser demasiado pesadas para sujetarse con piezas plásticas. Por esto, se sujetaron con tornillos y tuercas. Las piezas se manufacturaron con fibra de vidrio y fibra de aramida.

Se utilizó el proceso de picado manual con resina y brochas. Para el uso de fibras y resina se necesitan cubre-bocas y dependiendo de las personas guantes. La siguiente tabla muestra el peso de las piezas de la carrocería 2013. La carrocería tiene un peso total de 10.7 [kg].

Pieza	cantidad	Peso [g]
<b>Nariz</b>	1	4900
<b>Lateral izquierda</b>	1	1500
<b>Lateral derecha</b>	1	1500

Side pod izquierdo	1	1400
Side pod derecho	1	1400



**Figura 6.39** Manufactura de la carrocería 2013. Presentación del ducto lateral izquierdo al coche.



**Figura 6.40** UM-524 en Lincoln Nebraska durante una prueba dinámica de la competencia formula SAE 2013.





**Figura 6.41** UM-524 durante su presentación ante la comunidad universitaria en CU en la facultad de Ingeniería.

Peso Total Final (después de pintura) [kg]
10.7

“Hard work and fun is what life is all about”

—Richard Branson

## Capítulo 7 diseño carrocería temporada 2014

El objetivo de este capítulo es señalar diferencias entre la temporada 2014 y 2013 para que se entienda el proceso de diseño de la temporada 2014 de mejor forma. Este capítulo le mostrará al lector lo que se buscó en algún momento que los nuevos integrantes del equipo buscaran al momento de realizar simulaciones.

Para un mejor entendimiento de las temporadas dentro del equipo es necesario saber que cada año los integrantes cambian. Ya sea que integrantes salgan o entren nuevas personas, el equipo cambia su manera de trabajar. Todas las temporadas se planean para un desempeño exitoso. Ya depende de distintos factores si esto se logra o no.

Como sistema, aerodinámica y carrocería ha tenido un avance considerable en diseño y manufactura. Sin embargo, aún falta mucho por desarrollar. La meta como sistema es tener una manufactura rápida y eficiente. Un diseño complementado con paquete aerodinámico y sujeciones adecuadas para la competencia.

Cada temporada comienza con una filosofía de diseño que se establece como equipo. La filosofía de diseño del equipo de la temporada pasada se veía reflejada en el objetivo del equipo. Completar los eventos dinámicos. Objetivo que casi se logra de no ser por la falla durante la prueba de resistencia.

El punto de mencionar competencias pasadas es que existe un aprendizaje por parte del equipo cada año. La importancia de mejorar la siguiente temporada radica en transmitir adecuadamente las enseñanzas a la siguiente generación de integrantes del equipo. Todo miembro que ha vivido un año de competencia cuenta con un año de enseñanzas y tiene como obligación transmitir ese conocimiento.

Cuatro puntos son la base de la filosofía del diseño de esta temporada.

1. Seguridad
2. Desempeño
3. Mantenimiento (facilidad de servicio)
4. costo

Seguridad como el punto clave para un buen coche. El simple hecho de cumplir con el reglamento de la competencia junto con saber que el coche siempre tiene personas alrededor cuya seguridad no debe comprometerse durante el diseño, manufactura y pruebas del coche. Si el coche inspira seguridad entonces se puede esperar un buen desempeño.

El segundo punto básicamente cubre toda posibilidad de mejorar. Se planea disminuir el peso del coche y por ende su desempeño mejorará siempre y cuando no se descuiden los sistemas. Además de disminuir el peso se planea mejorar el desempeño con el uso de un sistema de adquisición de datos para corroborar y comparar parámetros de diseño.

Un diseño que facilite el mantenimiento solo significa una cosa y esa es el no perder tiempo. En una competencia automotriz el tiempo es particularmente escaso por lo que un diseño con fácil acceso a partes que en otras temporadas han sido un problema se traducirá en tiempo ahorrado para ser invertido en otra actividad.

Un diseño bien pensado como se hizo mención en el capítulo anterior tiene que tomar en cuenta procesos de diseño y herramientas. Al pensar en esos procesos se puede diseñar desde el principio en procesos que se encuentren en una categoría de bajo costo. Se planea reducir costos sin sacrificar ninguno de los puntos anteriores.

El sistema de carrocería y aerodinámica alineó sus objetivos con los del equipo de la siguiente forma:

#### 1.- Seguridad

- Continuar con un diseño pegado al chasis para facilitar sujeciones.
- Cumplir con el reglamento
- Materiales más ligeros
- Manufactura mediante un proceso de calidad para disminuir el peso.

#### 2.- Desempeño

- Mantener el coeficiente de arrastre igual o menor que el de la temporada pasada
- Utilizar un proceso de infusión por vacío en la manufactura para disminuir el peso
- Diseñar la carrocería con curvas suaves para facilitar la manufactura
- Utilizar fibra de vidrio y fibra de aramida para la carrocería
- Crear una red de personas que entiendan los fundamentos de la mecánica de fluidos y su aplicación para la carrocería
- Crear una red de personas que sepan utilizar el software Star CCM+
- Manufacturar nuestras propias sujeciones

#### 3.- Mantenimiento

- Reducir el tamaño de los ductos laterales para quitarlos de manera más fácil
- Diseñar las sujeciones de manera que faciliten el ensamble y desensamble de las piezas de carrocería
- Diseñar de nuevo por partes (nariz, laterales y ductos por separado)

#### 4.- Costo

- Menos material gracias al proceso de manufactura
- Se diseñará pensando en el maquinado CNC de moldes en negativo

#### 5.- Extras

- Integrar al equipo



- Mejorar manufactura
- Dejar preparador a los alumnos para la siguiente temporada de Formula SAE

Integrantes del sistema

- 10 Estudiantes de Ingeniería
- 2 Estudiantes de Diseño Industrial

### 7.1 Proceso de Integración

Es importante hacer notar la diferencia entre los integrantes de esta temporada y la pasada. En esta temporada se integraron 11 nuevos integrantes, dos de ellos diseñadores industriales. Después de terminada la temporada 2013 dos integrantes se salieron debido a que se graduaron. El sistema cuenta con más integrantes debido a la necesidad de tener muchas manos en la etapa de manufactura. Durante la etapa de diseño por otro lado, no se necesitan tantas personas para tan pocos objetivos. Dependiendo de la cantidad de objetivos el sistema puede ser conformado por tantas personas como sean necesarias. Ahí surge el primer reto para el sistema.

En general el equipo UNAM motorsports sufrió un cambio generacional grande ya que cerca del noventa por ciento del equipo se salió por cuestiones de titulación o trabajo. Esto afecta la capacidad de trabajar en equipo ya que la temporada pasada se desarrolló un trabajo a lo largo de un año y ese trabajo ahora solo se encuentra reportado en reportes de temporada. Los reportes son necesarios y útiles, sin embargo creo que no hay mejor enseñanza que trabajar junto a ellos que pueden enseñarte directamente.

El sistema de carrocería y aerodinámica se dividió en grupos. Un grupo de personas trabajaría en conjunto con un diseñador por un lado y otro grupo trabajaría con otro diseñador por otro lado. La experiencia de la temporada pasada demostró como un diseñador es suficiente para desarrollar una carrocería exitosamente.

El objetivo de los grupos era tener que avanzar por medio de competencia sana. Cada grupo trabajaría para diseñar su carrocería. El trabajo siempre sería abierto sin esconder información. El sistema completo trabajaría en los mismos horarios y en casa cada quien organizaría sus horarios de trabajo.

Todo nuevo miembro tendría la obligación de leer el reglamento y existirían una serie de lecturas que deberían realizarse para empezar a comprender el trabajo para desarrollar una carrocería. El objetivo era claro. Generar la red de personas capaces de entender el proceso del equipo y el proceso de diseñar una carrocería.

Desde el inicio de la temporada el excesivo número de personas presentó retos. Para aprender a utilizar el software se necesitaron computadoras con la capacidad para correr el programa. Las computadoras fueron escasas. Debido al número de personas el trabajo en equipo al principio fue un reto pues tener a doce personalidades distintas en un cuarto no es sencillo. Al empezar a

entender de mejor manera algunos conceptos básicos el trabajo se fue librando de mejor forma. Los equipos presentaron distintos diseños que presentaban avances en cuanto al uso de conceptos básicos de aerodinámica y del uso del software.

Es importante entender esta etapa ya que un equipo trabaja mejor cuando existe integración. Al haber integración hay confianza para recibir críticas y trabajar no solo como individuo sino como equipo. Como ingenieros debemos trabajar junto con personas de otras disciplinas y mientras más rápido se entienda mejores resultados se tendrán.

“Whether it is a simple department restructure or the merging of two industry giant, it takes time for the dust of major change to settle. It seems that the act of encouraging newly formed team members to actively seek put examples of uncommon commonalities, while small, could prove to be a big step that speeds up cooperation, collaboration, and partnership.” [31]

—Steve J. Martin, Noah J. Goldstein and Robert B. Caildini

## 7.2 Quinto Año: Etapa de Diseño 2014

El proceso de diseño durante el quinto año se llevó a cabo de una forma similar a la de la temporada 2013. Este proceso consistió en una serie de retroalimentaciones con los diseñadores y el sistema de chasis principalmente. Las primeras simulaciones sirven para visualizar fenómenos sencillos gracias a la ayuda de Star CCM y su capacidad para mostrar campos de presión y campos de velocidades. Lo que se busca para el diseño de la carrocería es:

Ahora bien, según Claude Rouelle<sup>5</sup>, juez de renombre en las competencias de Formula SAE, la forma de trabajar debe ser la siguiente:

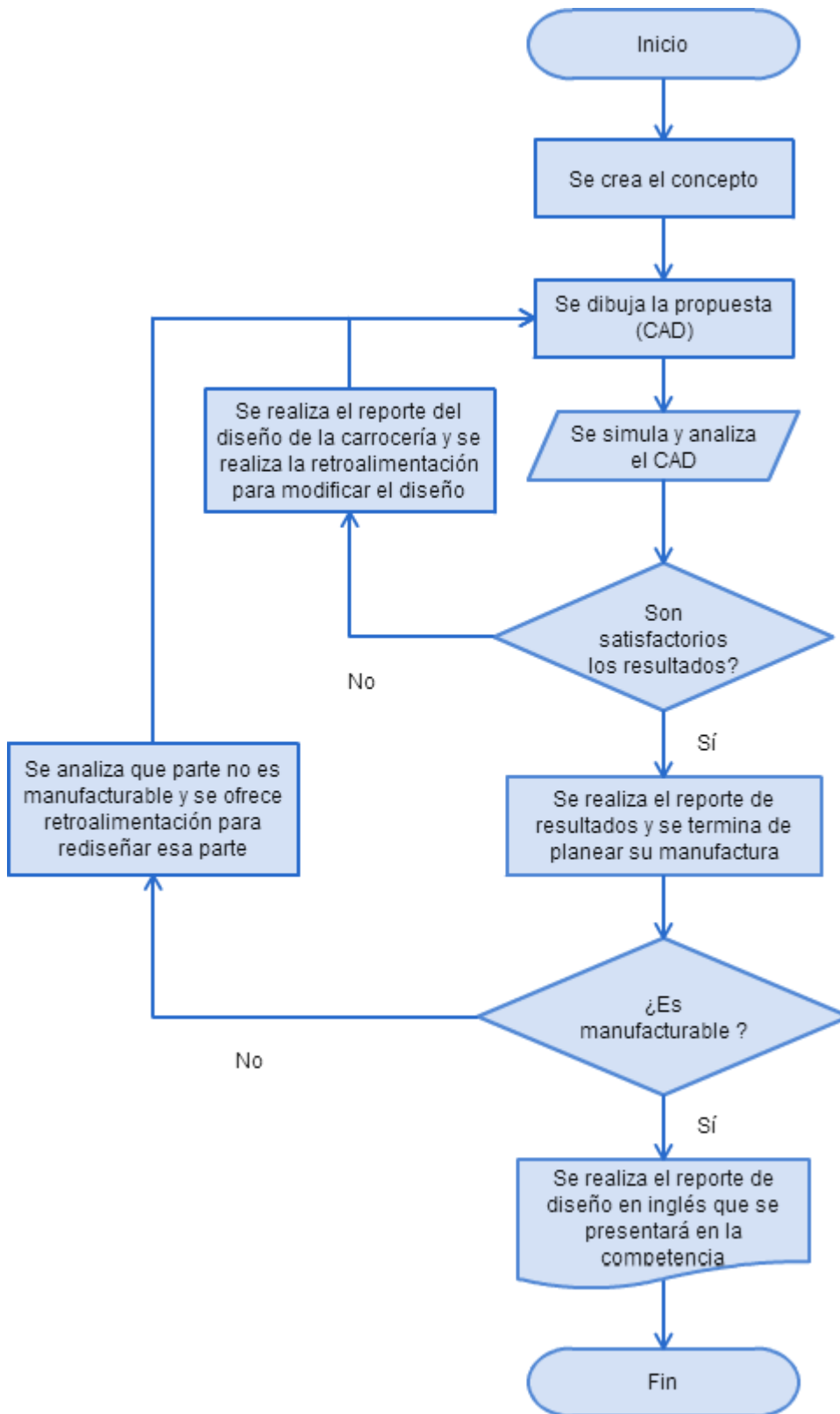
La temporada debe de estar compuesta de dos libros. El primer libro se compone de 5 capítulos. Concepto, simulación, diseño, manufactura y ensamble son los capítulos del primer libro. El segundo libro se compone de 4 capítulos. Pruebas, piezas rotas, entrenamiento y desarrollo.

Este trabajo de Tesis se encuentra dentro del primer libro. El proceso que se lleva a cabo para diseñar la carrocería se ilustra de mejor forma en la figura 7.1. Para entender este proceso es necesario definir algunos términos.

El concepto se refiere a la idea general del sistema. Por general se entiende que se debe pensar en todos los aspectos de la carrocería. El concepto debe incluir el método que se tiene pensado utilizar para la manufactura, la forma en que la carrocería y paquete aerodinámico debe ir sujetado al chasis o suspensión, la forma de transmitir la carga aerodinámica a las llantas, el material que se utilizará para los moldes, el tipo de maquinado que se utilizará para estos, la carga que quiere crearse (sustentación y arrastre).

---

<sup>5</sup> Claude holds more than 30 years of race engineering experience in F-1, CART, Indy Lites, Formula 3, ALMS, NASCAR, European and Japanese Touring Cars, and Australian V8 Supercars. As an acclaimed international lecturer, Claude teaches Vehicles Dynamics & Data Acquisition Seminars supported by MoTeC worldwide and has conducted more than 300 seminars to date with thousands of satisfied attendees. Additionally, he has taught dozens of in-house engineering seminars for major corporations engaged in motorsports [27]

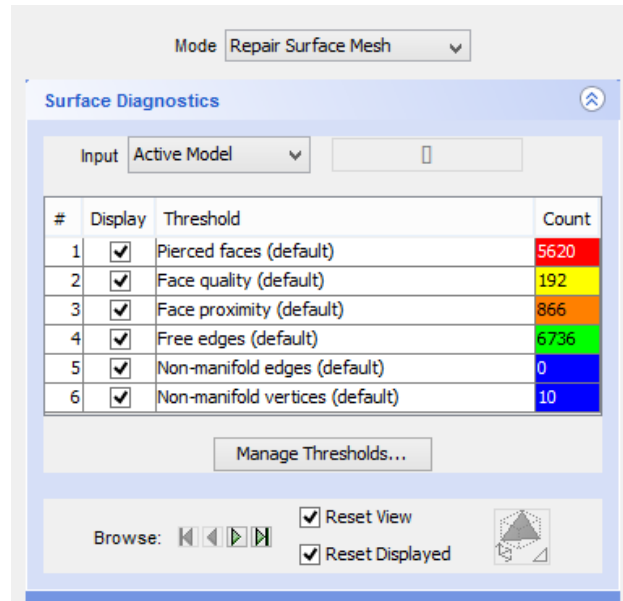


**Figura 7.1** Diagrama de flujo del proceso iterativo de diseño de la carrocería propuesto en las temporadas 2013 y 2014.

Las propuestas de dibujo deben ser un trabajo en equipo resultado de una lluvia de ideas entre el que dibujará la superficie en el programa y el que analizará su aerodinámica.

### 7.2.1 Calidad de dibujo (CAD)

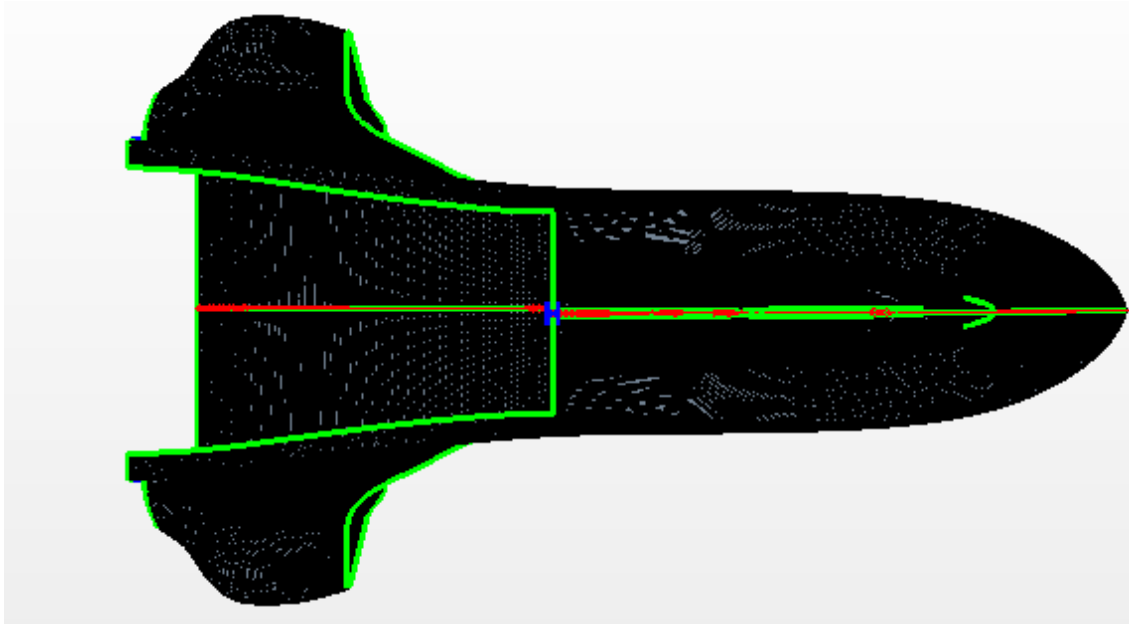
De acuerdo a los pasos que se mencionan en los capítulos 4 y 5 el primero tiene que ver con la calidad del modelo. La calidad del CAD debe ser suficiente para trabajar con ella en el software de fluidos computacionales y este pueda generar un mallado a partir de la superficie de estudio. Esto se lograba al verificar la cantidad de errores en la superficie. La figura 7.2 muestra la tabla mediante la cual el software te muestra los errores en la superficie.



#	Display	Threshold	Count
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Pierced faces (default)	5620
2	<input checked="" type="checkbox"/>	Face quality (default)	192
3	<input checked="" type="checkbox"/>	Face proximity (default)	866
4	<input checked="" type="checkbox"/>	Free edges (default)	6736
5	<input checked="" type="checkbox"/>	Non-manifold edges (default)	0
6	<input checked="" type="checkbox"/>	Non-manifold vertices (default)	10

**Figura 7.2** Tabla de errores del software Star CCM+ analizando el diseño número 2 de la temporada 2014.

La tabla de la figura 7.2 muestra una gran cantidad de errores. Estos deben ser reparados antes de proceder con el mallado. Junto con la tabla, el programa señala donde se encuentran los errores con un código de colores señalado en el CAD a analizar como se aprecia en la figura 7.3.



**Figura 7.3** Vista superior del segundo diseño para la carrocería 2013 con errores de superficie mostrados por el software de fluidos computacionales.

En la industria es sumamente importante y tardada la etapa de dibujo y limpieza de la superficie. Existen programas que se utilizan específicamente para la limpieza de las superficies. Existen programas en línea o los cuales requieren licencia. Reparar la superficie tarda un tiempo equivalente a la habilidad del usuario para utilizar las herramientas del programa. Esto representa un problema ya que si el usuario no conoce las herramientas de reparación, este tardará mucho en tener la superficie lista para empezar el mallado el cual sigue siendo uno de los primeros pasos para el análisis con fluidos computacionales. La práctica debe ser constante para que en el momento en que los sistemas como chasis, suspensión, enfriamiento tengan su diseño final, el sistema de aerodinámica y carrocería pueda responder con velocidad y realizar varias iteraciones de diseño sin tener el problema del tiempo invertido en la limpieza de las superficies.

Ahora bien, la limpieza de la superficie no depende del usuario del programa de CFD. La limpieza de la superficie es un reflejo de la habilidad de dibujo de la persona diseñando la carrocería. Gracias a que se pueden ver los errores estos pueden ser identificados y reparados desde el software de dibujo. Por ejemplo:

- Errores de proximidad de superficies (naranjas): en su mayoría se deben a que existen superficies repetidas en el CAD. Al momento de dibujar superficies existen herramientas para unir dos de estas. Muchas veces estas herramientas no unen las superficies sino crean una nueva que abarque el espacio de las superficies que se debían de unir. Esta nueva superficie se encuentra sobre las dibujadas en primer lugar lo cual generó un error de proximidad.
- Errores de borde libre (verdes): estos errores surgen en su mayoría debido a que detecta superficies sin espesor. Al dibujar una carrocería en cualquier software de dibujo por

ejemplo Solid Works o Rhino, esta se realiza sin espesor alguno ya que como su nombre lo dice son superficies. El problema es que el mallado volumétrico empieza de un sólido y una superficie no es considerada un sólido por lo que lo detecta como un error. La forma de reparar este error es dándole espesor, ya sea en Star CCM+ o desde el programa de dibujo utilizado.

- Los errores catalogados como “Non-manifold” son errores que prácticamente señalan geometrías que no pueden existir en la vida real. Ayuda verlos como geometrías que no se pueden manufacturar. Este tipo de errores es de los más complicados de solucionar ya que generalmente su origen viene del CAD. Para entender mejor este tipo de geometrías se recomienda la referencia [26]. Para lidiar con este tipo de errores se requiere conocimiento de las herramientas de solución de errores e identificar perfectamente el error antes de empezar a solucionarlo.

Solucionados estos problemas la solución correrá a pesar de tener errores de proximidad, de calidad y de caras perforadas. El mallado, sin embargo variará su calidad dependiendo de la calidad de la superficie. Esto quiere decir que a mayor número de errores, menor será la calidad del mallado.

Una vez solucionado el tema de los errores y continuando con los pasos descritos previamente para un análisis con fluidos computacionales se procede a realizar el análisis de resultados.

### ***7.2.2 Análisis de resultados***

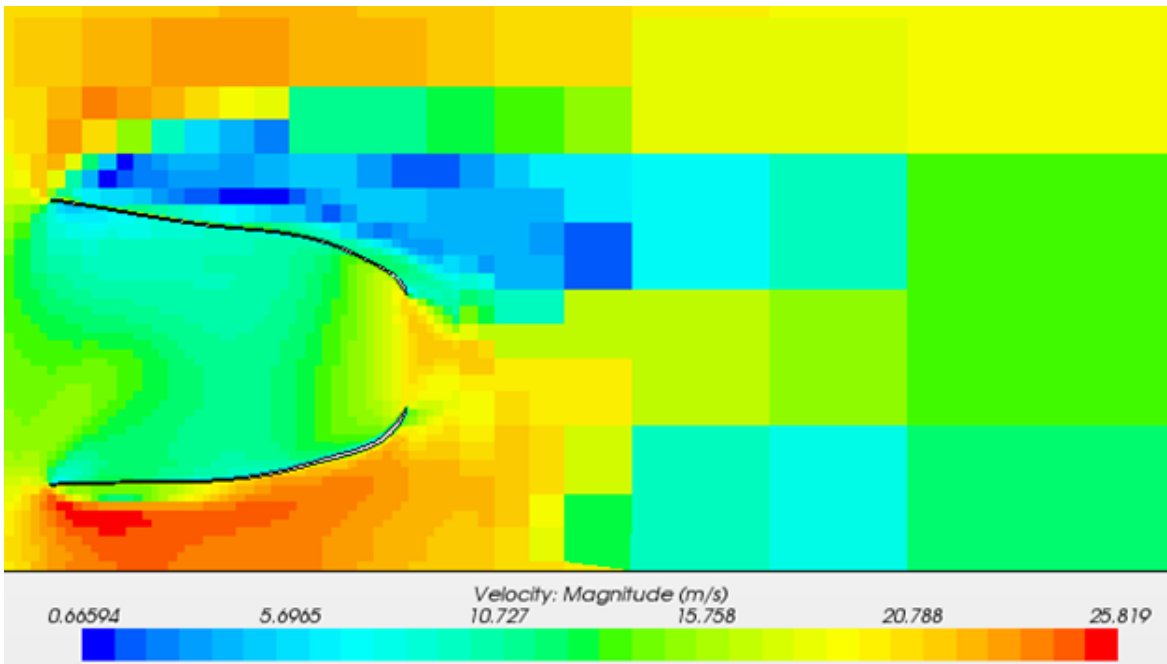
Sí se realizan los pasos descritos en capítulos anteriores con éxito y se sigue el diagrama de flujo de la figura 7.1, se realiza el análisis de resultados. Al diseñar una carrocería se buscan ciertos elementos que puedan servir como indicador para ciertas áreas en las cuales exista espacio para mejorar.

Se busca determinar el centro de presiones. En capítulos anteriores se menciona la importancia del centro de presiones. La investigación para determinar el centro de presiones dio como resultado que para lograrlo se necesita una integración por debajo del coche con efecto de fuerzas laterales. Al volverse este complejo y depender de un código que necesita ser escrito para introducirlo al programa, se decidió no seguir con este punto. La razón de esto es porque como se ve en capítulo 3 el centro de presiones cobra importancia cuando se alcanzan velocidades altas en donde la carga aerodinámica es considerable. Esto no concuerda con el concepto que se escogió para el diseño de la carrocería 2014. Los objetivos señalan disminuir o mantener el arrastre obtenido en la temporada pasada. Y como la fuerza de arrastre es de 155 [N] con un coeficiente de 0.77 entonces no se toma como una fuerza aerodinámica considerable. Lo cual es el objetivo después de todo cuando se trata de arrastre. De llegar a cambiar esta situación, entonces el centro de presiones debe ser encontrado.

Se busca encontrar una geometría adecuada que disminuya el arrastre. En el capítulo 2 se menciona como la carrocería puede ayudar a disminuir el arrastre. Se demostró incluso que los ductos laterales son fundamentales en esta tarea. Sin embargo, la carrocería es de gran ayuda como las imágenes 1.1 y 1.2 muestran. Los equipos empezaron a desarrollar carrocerías con

menor arrastre antes de producir fuerza de sustentación negativa. Como equipo primero se disminuirá el arrastre y después se puede empezar a pensar en producir fuerza de sustentación. Para producir fuerza de sustentación se necesita tener un método de manufactura eficiente y probado previamente, gente con experiencia en esa manufactura y sujeciones adecuadas para transmitir la carga aerodinámica a las llantas.

Se busca disminuir el arrastre del coche. Esto se busca en las simulaciones a través de la visualización del flujo. Se buscan partes en los planos con los campos de velocidades en donde la velocidad tenga valores cercanos a cero detrás del coche. Estas zonas de baja energía producen arrastre y es conveniente dirigir corrientes de aire hacia esas zonas para promover corriente y evitar zonas de baja energía. Por ejemplo, en la figura 7.4 se aprecia una zona de baja velocidad causada por la geometría del ducto lateral. Baja velocidad se traduce en un coeficiente de presión alto. Si tomamos la teoría del capítulo 2 sabemos que coeficiente de presión que aumenta es una condición desfavorable y esta condición induce una separación del flujo e induce una transición a un flujo turbulento. En este caso Este flujo turbulento no nos ayuda a disminuir el arrastre por lo que se puede rediseñar la geometría superior de ese ducto lateral con una curva suave. Es recomendable muchas veces no solo cambiar la geometría si no evitar bordes filosos como el que se muestra en la figura 7.4. Los bordes filosos son causa de turbulencias. Se le puede dar cierta curvatura al principio del ducto o incrementar espesor del ducto en general.



**Figura 7.4** Plano lateral con campo de velocidades a la mitad del ducto lateral derecho del cuarto diseño de la carrocería 2014. La dirección del aire es de izquierda a derecha, la nariz del coche apunta hacia la izquierda.

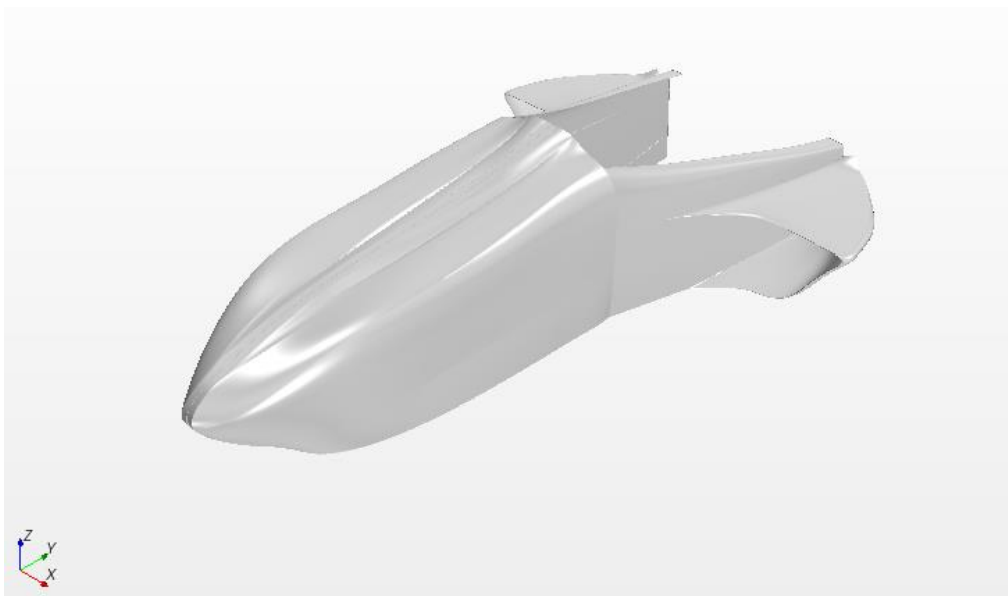
Se buscan condiciones desfavorables de presión y se identifica la razón de su existencia. Algunas veces lo único que se puede hacer es disminuir la variación de presión. No obstante, un grupo de

cambios pequeños tendrá un impacto favorable para disminuir el arrastre total del coche tipo formula.

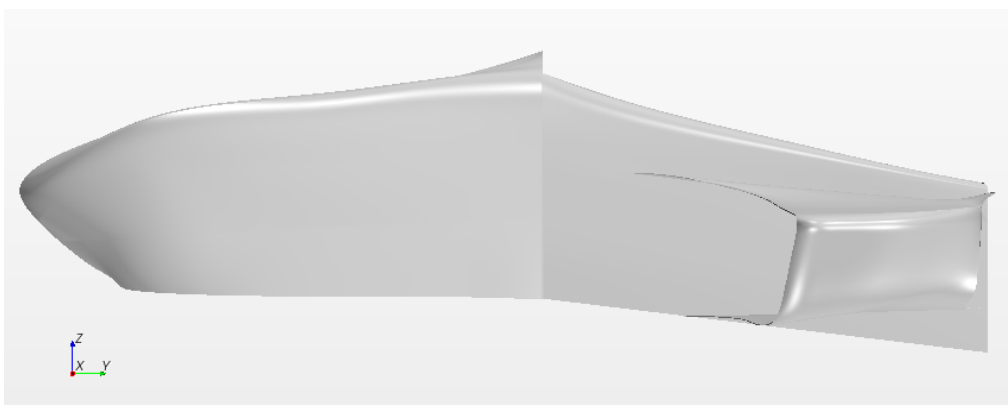
Las propuestas que se realicen como medio para solucionar las condiciones desfavorables no vienen en un libro de pasos a seguir. Sí existen diversos libros que señalan como solucionaron algún problema en particular, pero como se ha mencionado el comportamiento aerodinámico es difícil de predecir.

### 7.3 Presentación de modelos de carrocerías

Entre ambos equipos de trabajo se realizaron cerca de 15 diseños de carrocería. A continuación se presentan algunos que sirven para mostrar el avance obtenido por el sistema a través de la temporada 2014.



**Figura 7.5** Segundo diseño de la carrocería para la temporada 2014 del equipo UNAM motorsports.

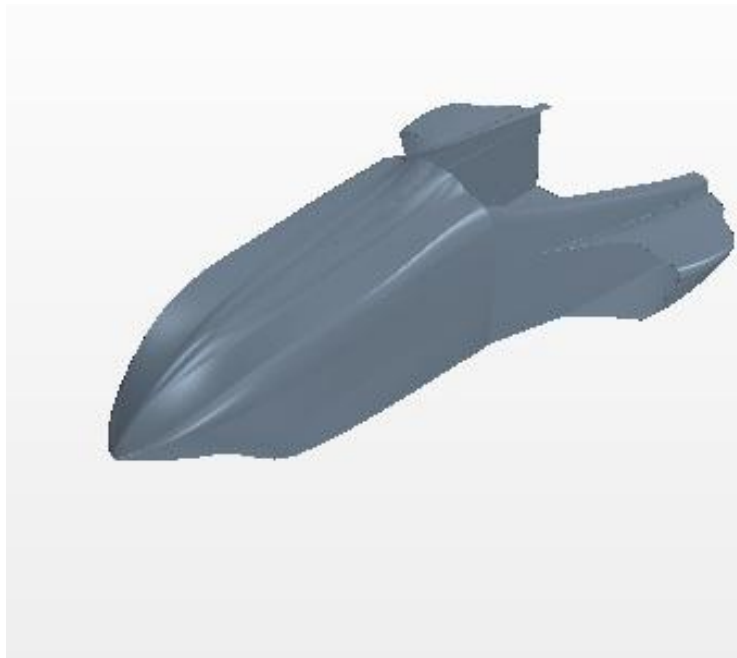


**Figura 7.6** Vista lateral del segundo diseño de la carrocería 2014

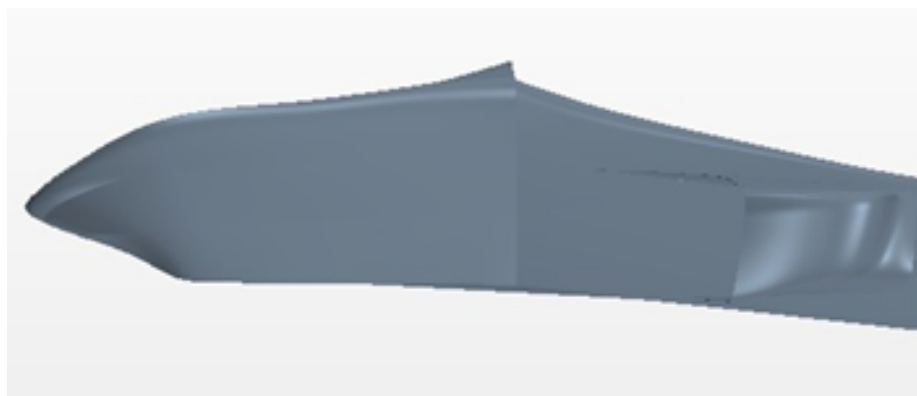


Este segundo diseño, figuras 7.5 y 7.6, muestra algunas de las fallas que se tiene cuando se empieza a dibujar una superficie como una carrocería por primera vez. La persona que realizó la carrocería no tenía experiencia en este tipo de superficies. Lo cual es normal al empezar ya que los integrantes del equipo son estudiantes. Lo difícil de dibujar una carrocería es lograr continuidad entre superficies y en este segundo diseño se nota una falta de continuidad especialmente en la parte superior de la nariz.

La figura 7.3 de hecho muestra el segundo diseño y se aprecia la falta de continuidad por los errores de bordes libres en la parte media de la carrocería.



**Figura 7.7** Tercer diseño de carrocería de la temporada 2014.



**Figura 7.8** Vista lateral del tercer diseño de carrocería de la temporada 2014.

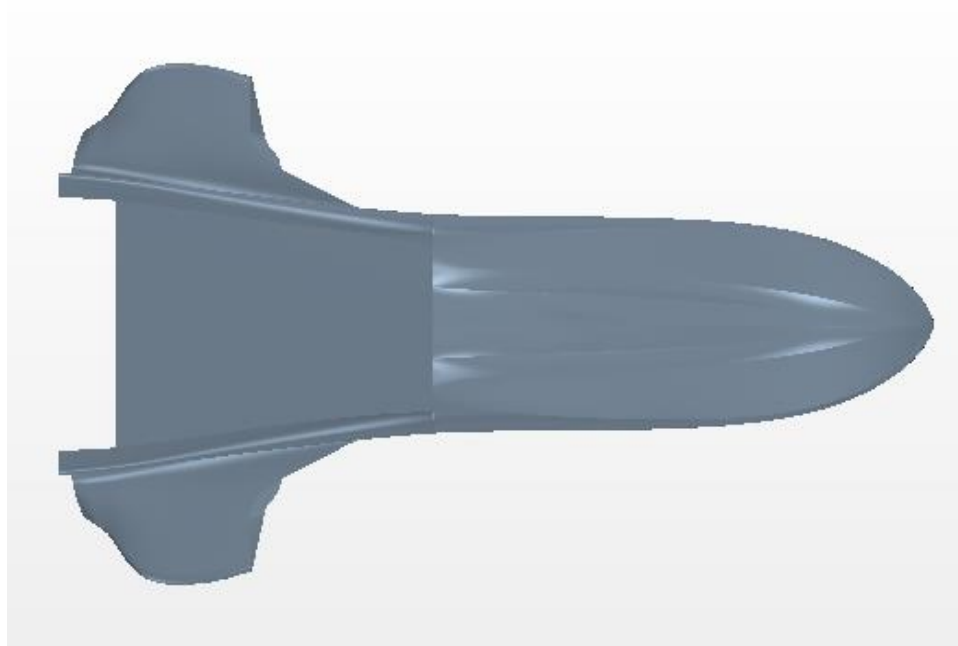
En esta tercera iteración, figuras 7.7 y 7.8, el cambio que se realizó fue el alargamiento de la nariz y el suavizado de las curvas de los ductos laterales. Al recibir este diseño lo primero que se notó es

que posiblemente la regla que se refiere a la curvatura mínima de la nariz no se esté cumpliendo. En esta carrocería se aprecia en las simulaciones que los ductos laterales necesitan ser alterados de nuevo. Esto de cualquier manera tendría que efectuarse ya que el sistema de enfriamiento no está definido a estas alturas de la temporada. Se considera también necesario reducir el ángulo de ataque que presenta la nariz para que se cumpla con el reglamento.

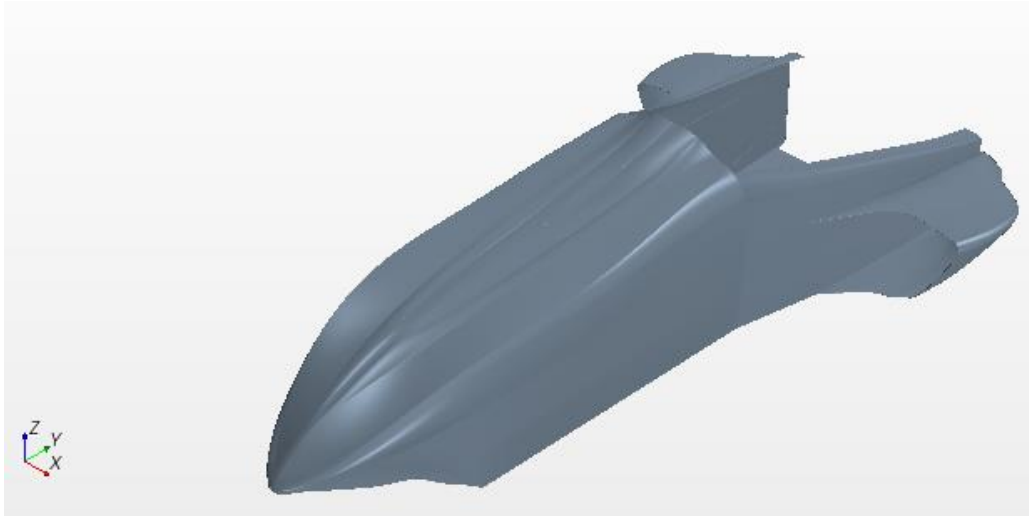
Para el cuarto diseño de la carrocería los problemas de dibujo que se tenían empezaron a desaparecer. A medida que se practica el dibujar una carrocería debería de hacerse con mayor calidad. Uno se da cuenta de eso en la etapa de reparación de la superficie. Si existen menos errores entonces la calidad está incrementándose y eso se traduce en menos tiempo invertido en la limpieza de mallas y se acelera el proceso de diseño.

En el cuarto diseño incluye en piso que es paralelo al piso y una nariz no tan larga como el tercer diseño. La curva de la nariz sigue siendo criticada debido a que genera dos zonas de alta presión. Una en la punta de la nariz y la otra en la parte inferior de la nariz. Además este cuarto diseño se dibujó con precisión conforme a la regla de la pulgada y media de curvatura. Sin embargo se recomendó introducir cierta tolerancia para poder soportar errores de manufactura y aun así cumplir con la regla.

Otro cambio drástico en el cuarto diseño se encuentra en los ductos laterales, figuras 7.9 y 7.10. Los ductos laterales se abrieron más empezando a tomar dimensiones parecidas a los ductos laterales de la temporada pasada.



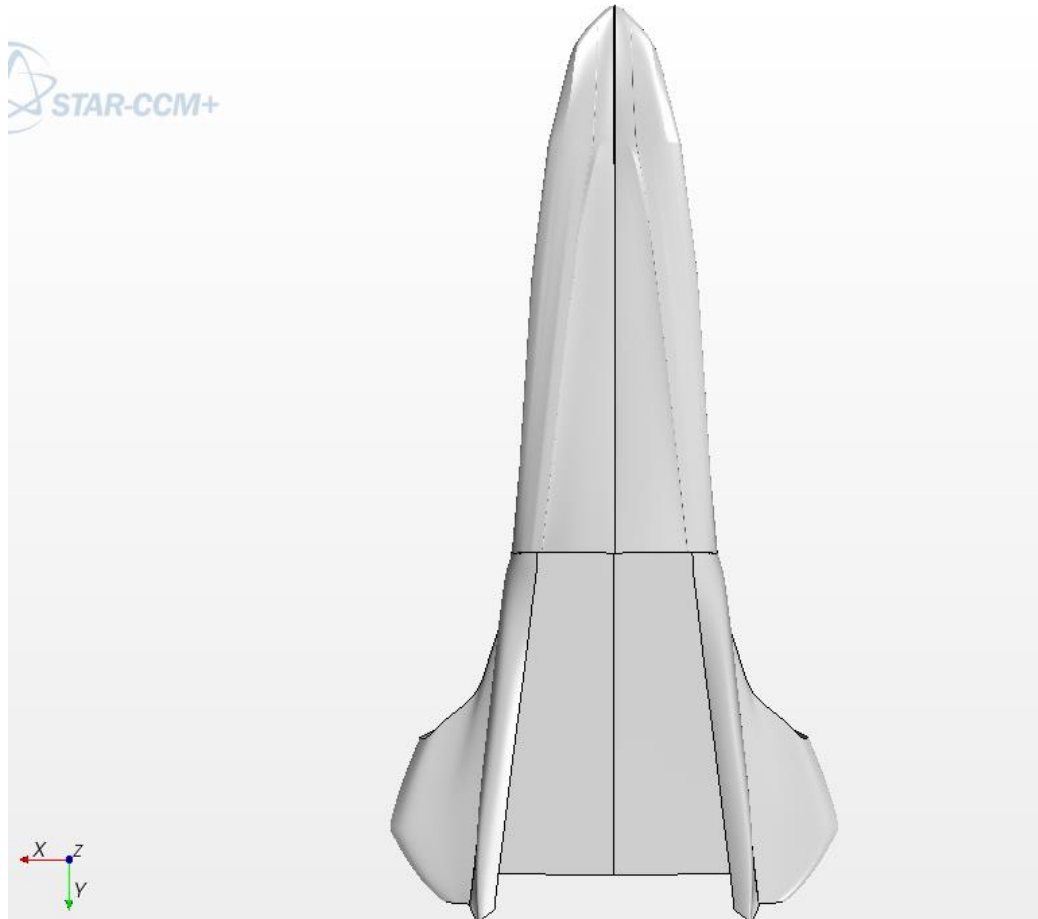
**Figura 7.9** Vista superior del cuarto diseño de la carrocería 2014.



**Figura 7.10** Cuarto diseño de la carrocería 2014.

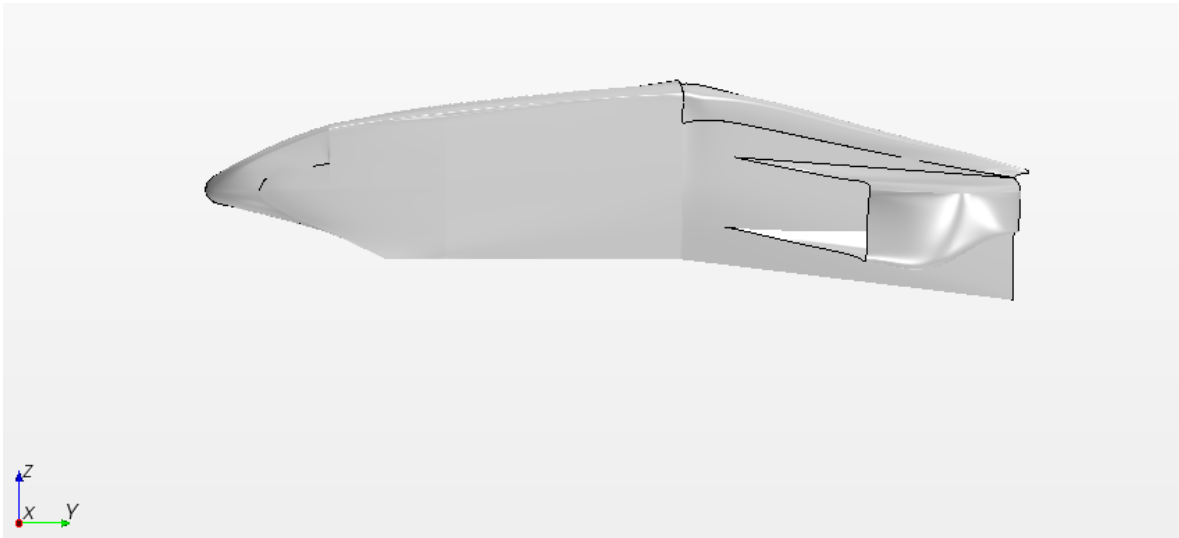
Existen momentos en los que las carrocerías no arrojan resultados satisfactorios y se necesitan realizar cambios drásticos. Como se mostrará en las figuras (29 a 74) donde se muestran los campos de presión y de velocidad, se puede ver que las simulaciones se realizan sin todos los elementos del coche por lo que la carrocería en sí debe arrojar mejorar resultados.

Para el séptimo diseño de carrocería, figura 7.11, se cambió la nariz y se empezó a probar un modelo nuevo de ductos laterales que como se aprecia estos no tienen el tamaño final, lo que se quiere analizar es el efecto de la geometría. Además, se aprecia una nariz sin tantas líneas y una mejor continuidad en ella.



**Figura 7.11** Vista superior del séptimo diseño de carrocería de la temporada 2014.

En la figura 7.12 se ve como existe una curva en la parte delantera de la nariz que es realmente el punto desde donde se empezó a dibujar para que cumpla con la regla. Se intenta recuperar el diseño de una nariz larga como se intentó en diseños anteriores y se cambia por completo la geometría de los “side pods”.



**Figura 7.12** Vista lateral del séptimo diseño de carrocería de la temporada 2014 del equipo UNAM motorsports.

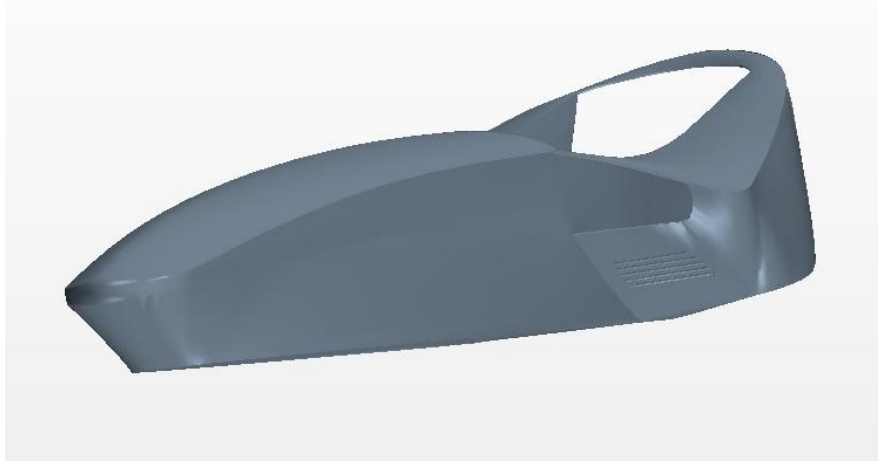
Después de analizar el séptimo diseño el sistema de enfriamiento proporcionó los datos de las medidas del intercambiador de calor. Esto quiere decir que se puede empezar a probar un diseño de ductos laterales con las medidas finales.

El motivo por el cual los ductos laterales se dibujaron elevados en el séptimo diseño es porque se sabe que un par de pulgadas puede hacer la diferencia entre temperaturas y para que el intercambiador de calor pueda realizar un mejor trabajo entonces se sugiere en algunos libros [2] que los ductos laterales no permitan la entrada del aire caliente pegado al suelo. Lo que es más, si tomamos en cuenta que la competencia se desarrolla en Lincoln, Nebraska en Junio y que las temperaturas alcanzan 40 grados centígrados, entonces un diseño que aplique esto podría ser benéfico para el motor.

A partir de este momento se debe trabajar de manera más estrecha con el sistema de enfriamiento para llegar a un diseño de ductos satisfactorio para ambos sistemas.

Del otro lado del sistema de aerodinámica se trabajó en un diseño que quería analizar las branquias que algunos equipos de formula utilizan. Estas llamadas branquias deben proporcionar una ventaja para utilizarse. Para empezar a entender cómo funcionan las branquias se dibujó un modelo con branquias en los ductos laterales.

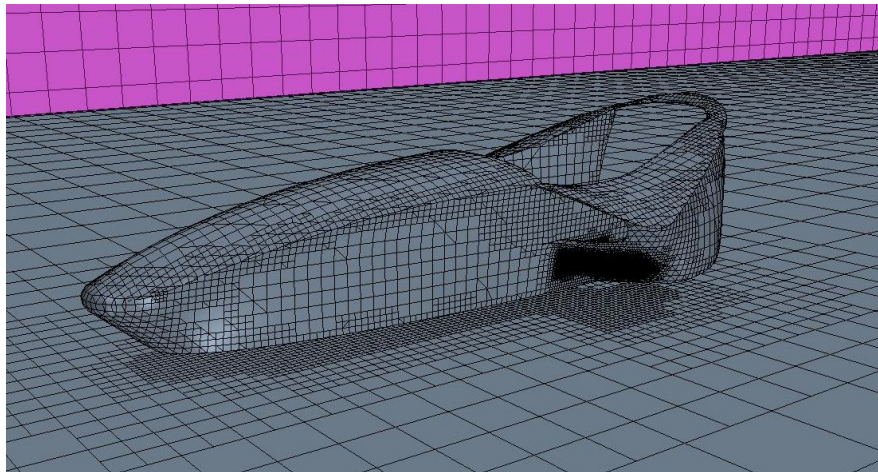
El CAD fue analizado sin los elementos del coche para centrar la simulación en las branquias. Para la teoría de ductos laterales que cubren al intercambiador de calor, estos deben crear una zona de baja presión a la salida del ducto para que el aire se incorpore al flujo detrás del coche y le proporcione energía con su cantidad de movimiento. Se quiere ver que producen las branquias en la parte delantera de los ductos laterales.



**Figura 7.13** Diseño de una carrocería alternativa con ductos laterales con branquias delanteras.

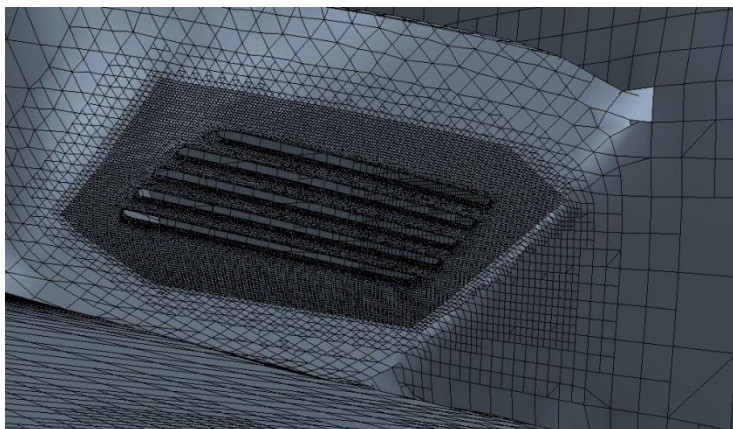
En esta carrocería alternativa, figura 7.13 existen errores de continuidad en los ductos laterales. En la figura 7.13 se aprecia en el ducto izquierdo una línea que parece separar dos superficies, esto tiene que arreglarse.

Para la simulación se utilizaron volúmenes de control en la zona de las branquias. Esto para asegurar un mallado adecuado en esa zona.



**Figura 7.14** Escena de la carrocería mallada con el volumen de control en las branquias.

En la figura 7.14 se observa una zona oscura en la parte de las branquias. Esto se debe al mallado. Se realizó de esta manera para asegurar que esa zona tuviera suficiente resolución y el mallado no afecte el resultado de la simulación al alterar la geometría. Los volúmenes de control se utilizan en zonas donde se requiere un mallado más fino, figura 7.15. Se utilizan volúmenes para no tener que mallar con esa medida base todo el coche. Eso resultaría en tiempo perdido de computadora, sin mencionar que la computadora tendría que tener la capacidad para resolver esa simulación.

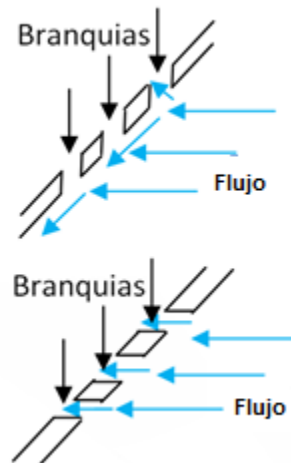


**Figura 7.15** Mallado fino debido al volumen de control aplicado en las branquias de los ductos laterales.

Antes de explicar lo que sucede con las branquias se debe entender que el objetivo de este diseño de ductos es tener una entrada de aire de cierto tamaño A y ese tamaño aumentaría a medida que se recorre el ducto corriente abajo hasta llegar a la mitad de los ductos donde el área transversal es de tamaño B. B es de mayor magnitud que A produciendo en teoría una expansión y disminución de la velocidad del aire. Al disminuir la velocidad aumenta la presión. Esta presión en combinación con la presión de salida de los ductos laterales ayudaría al flujo de aire. A la salida del ducto se vuelve a disminuir B hasta un tamaño parecido a A. Al disminuir el área transversal la corriente de aire incrementa su velocidad y disminuye su presión ocasionando una zona de baja presión que es ideal para los ductos laterales especialmente cuando son utilizados para enfriar el agua del intercambiador de calor del motor.

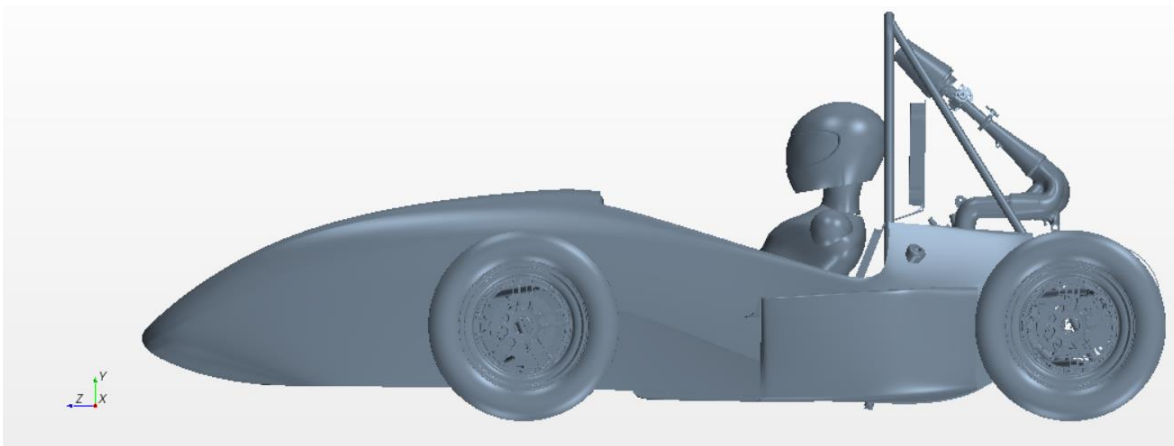
La idea de las branquias surge cuando en teoría se piensa que la curva en la parte delantera de los ductos laterales puede ocasionar una zona de estancamiento del flujo evitando que el aire se expanda y disminuya su velocidad como en teoría se tiene como objetivo de este diseño de ductos. La solución podría radicar en inyectar energía de alguna forma. Al introducir cantidad de movimiento con el uso de las branquias podríamos ayudar a que no se forme una zona de estancamiento y la corriente no se despegue de la curva interna del ducto manteniendo su capa límite.

Podría parecer que los resultados no fueron favorables para estas branquias. Las razones podrían ser varias. Una puede ser que las branquias no tienen el área transversal necesaria para que el aire pueda introducirse de mejor forma dentro del ducto. Otra razón puede ser que la curva de los ductos no sea la adecuada. Podría ser demasiado brusca para permitir al aire entrar. Además es importante hacer notar que la carrocería tiene espesor. Este espesor es aplicado de forma paralela a las superficies. En la figura 7.16, Arriba, se aprecia como la configuración de las branquias no se encuentran alineadas con la dirección del flujo. Sin embargo, hay que esperar a analizar los datos numéricos y los campos de presión y de velocidad para decir si sí funcionan o no.



**Figura 7.16** Arriba: representación del corte de las branquias en el diseño de la carrocería con branquias. Abajo: representación de las branquias con un corte adecuado alineado con la dirección del flujo de aire.

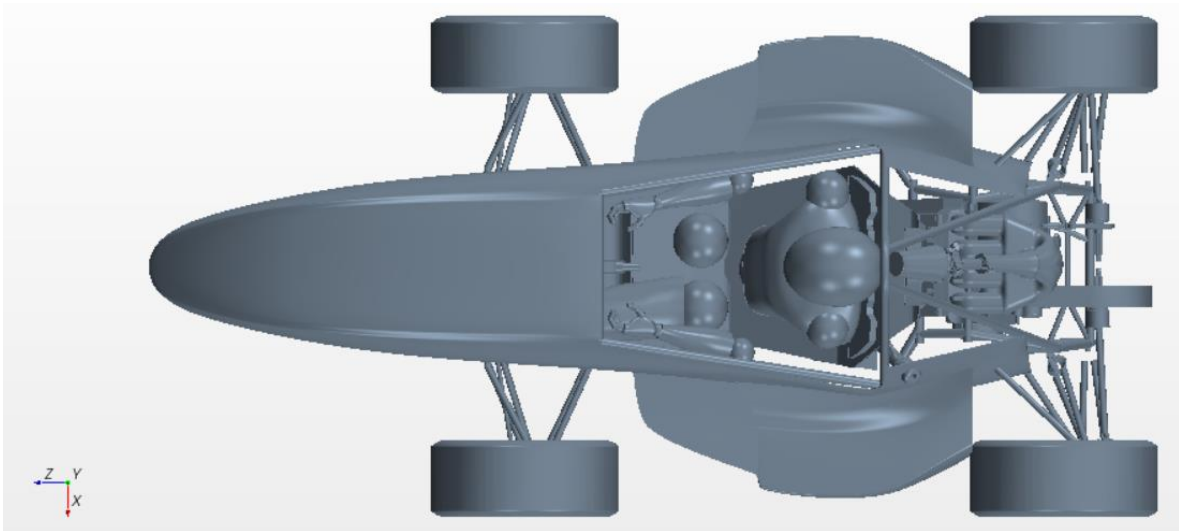
Al acercarse las fechas límite para tener el diseño terminado, los diseños se aprecian de mejor calidad y las carrocerías presentan menos errores y más continuidad en sus curvas. Sin embargo, algunos errores de reglamento se presentan por falta de atención. Es por eso que se recomienda revisar cada diseño conforme al reglamento. Desde la creación del concepto el reglamento debe ser claro y se debe trabajar con él para cualquier nuevo diseño.



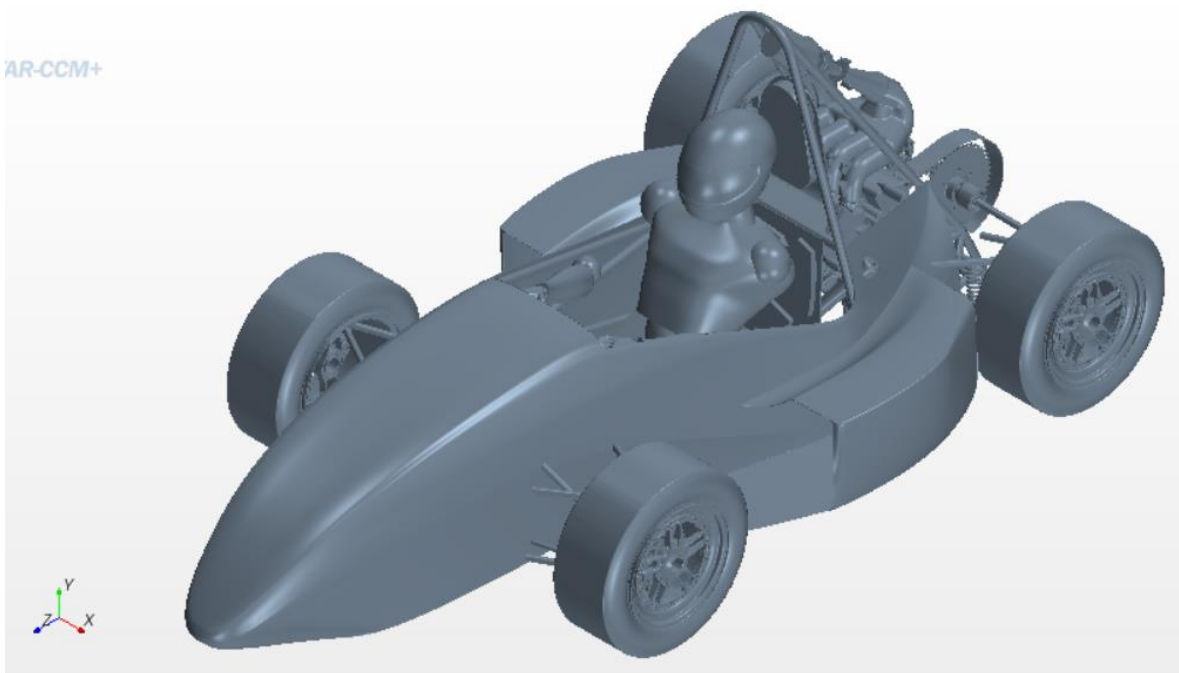
**Figura 7.17** Vista lateral del doceavo diseño de carrocería para la temporada 2014.

Para la doceava iteración de carrocería el coche presenta una nariz que se pretende esté lo más abajo posible, figura 7.17. Esto ya que al tener una nariz baja disminuye el coeficiente de arrastre. Al tener una nariz baja se está disminuyendo el ángulo de ataque de la carrocería. La desventaja de bajar la nariz es que se alarga y como se dijo en temporadas pasadas, una nariz larga puede significar dificultades para el piloto. La simulación de este diseño se realiza ya con las configuración final de chasis e incluyendo al sistema de enfriamiento.





**Figura 7.18** Vista superior del doceavo diseño de carrocería para la temporada 2014.

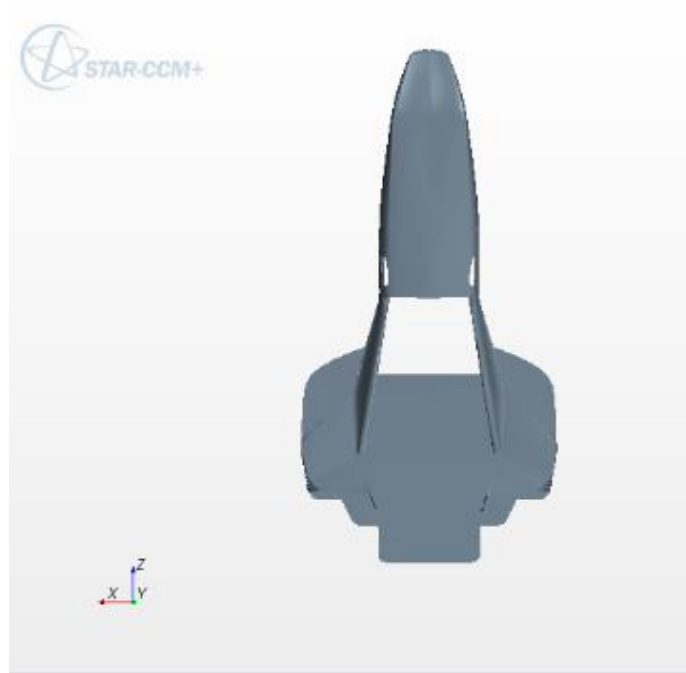


**Figura 7.19** Isométrico del doceavo diseño de carrocería para la temporada 2014.

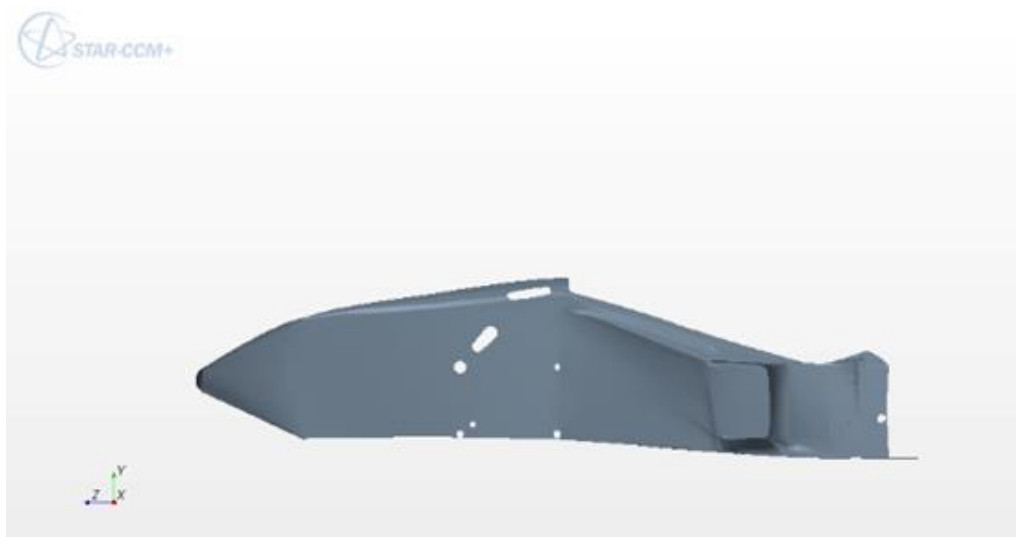
Se puede ver en las figuras 7.18 y 7.19 como los ductos laterales tiene una curva característica en la parte superior así como también se ve que estos están rompiendo la regla de la distancia que se debe dejar libre con respecto a las llantas. En la vista superior se aprecia un alargamiento del piso de los ductos. El propósito de este es la disminución del arrastre pues se ha visto que un piso plano ayuda a disminuir arrastre y no solamente a crear sustentación negativa cuando combinado con el difusor.

La nariz consta de una curva suave y continua, es decir de manufactura fácil. La curva de los ductos laterales podría generar problemas de manufactura. Habría que revisar si esta curva si mejora los resultados y de no ser así se debe cambiar el diseño de estos.

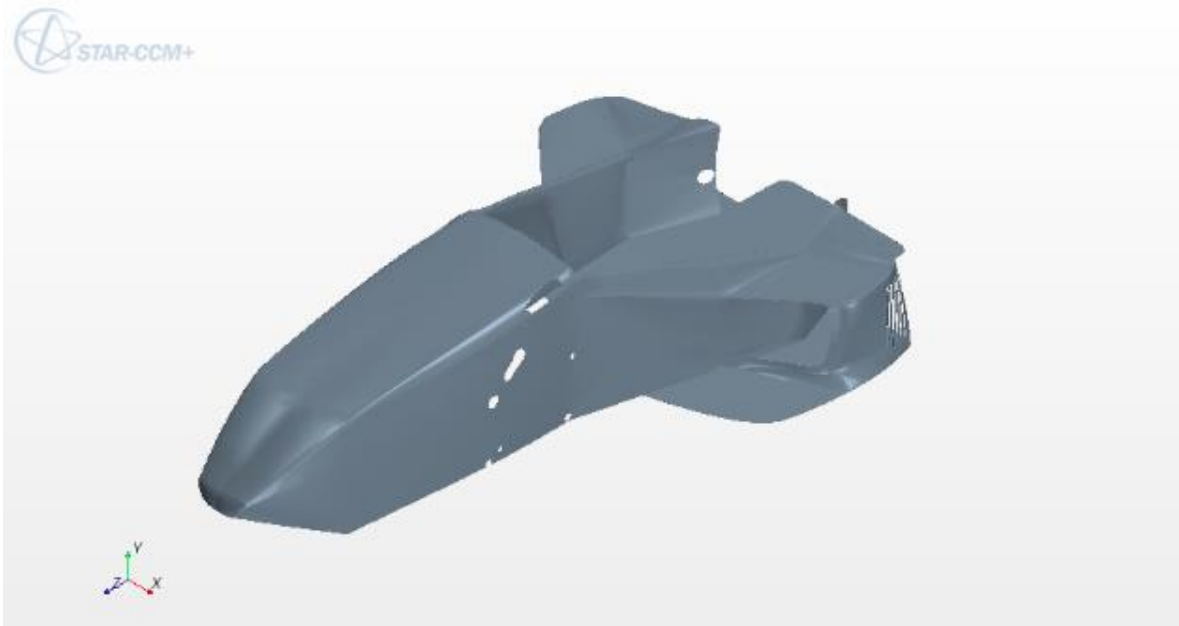
El diseño número trece pertenece a otro equipo de personas. Se puede ver la diferencia en sus diseños. La nariz a pesar de tener una curva parecida, estas son distintas. La nariz del treceavo diseño no es continua. Se ve una línea a la mitad.



**Figura 7.20** Vista superior del diseño número 13 de la carrocería de la temporada 2014



**Figura 7.21** Vista lateral del treceavo diseño de la carrocería de la temporada 2014.



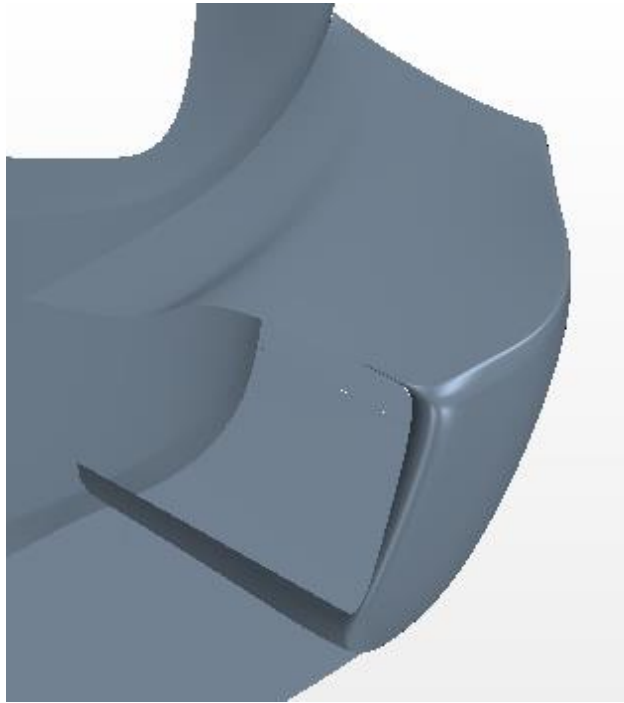
**Figura 7.22** Isométrico del diseño número trece de la temporada 2014 del equipo UNAM motorsports.

En la figura 7.20 y 7.21 se observa como el piso plano se encuentra alargado por detrás del final de los ductos de este diseño. El tamaño de los ductos es considerablemente más pequeño que el diseño número 12 y 14. Aquí se muestra una superficie frontal en los ductos laterales que pretende ayudar al flujo interno de los mismos.

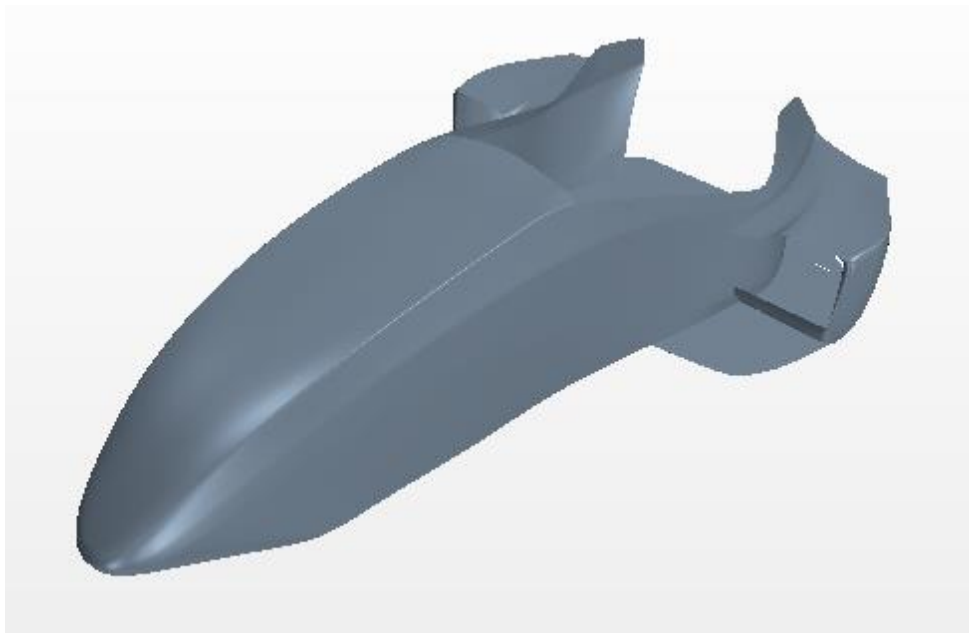
La carrocería ya presenta los cortes necesarios para suspensión como se aprecia en la figura 7.22. Esto es importante para el ensamble de la carrocería y las sujeciones que se tienen pensadas ir las agregando al CAD general del coche.

Este treceavo diseño tiene branquias en la parte posterior de los ductos laterales. Se vio previamente que las branquias delanteras no funcionaron con la configuración que se dibujaron en la parte delantera. Ahora se tiene pensado que las branquias traseras pueden ayudar a aumentar la velocidad detrás del radiador. El equipo pensó que al tener contacto el aire dentro de los ductos con el aire fuera de estos, el mismo aire de fuera corre a una velocidad mayor que la de adentro y al entrar en contacto, esa interacción ayudará incrementar la energía del flujo al salir de los ductos. Se corroboró o desmintió en las simulaciones presentadas más adelante en el trabajo.

En el catorceavo diseño se corrigió la regla que no se cumplía con respecto a los ductos laterales y las llantas traseras. Además, se agregó una superficie a la entrada de los ductos laterales con lo cual se pretende que el comportamiento dentro de los ductos sea mejor. Esto es, que la velocidad disminuya justo delante del intercambiador y a la salida la velocidad aumente. Sabemos que la superficie que se aprecia en la figura 7.23 incrementará el arrastre y aun así se analizará para ver qué tan contraproducente o positivo resulta este diseño de ductos laterales.



**Figura 7.23** Ductos laterales del catorceavo diseño de la carrocería para la temporada 2014.



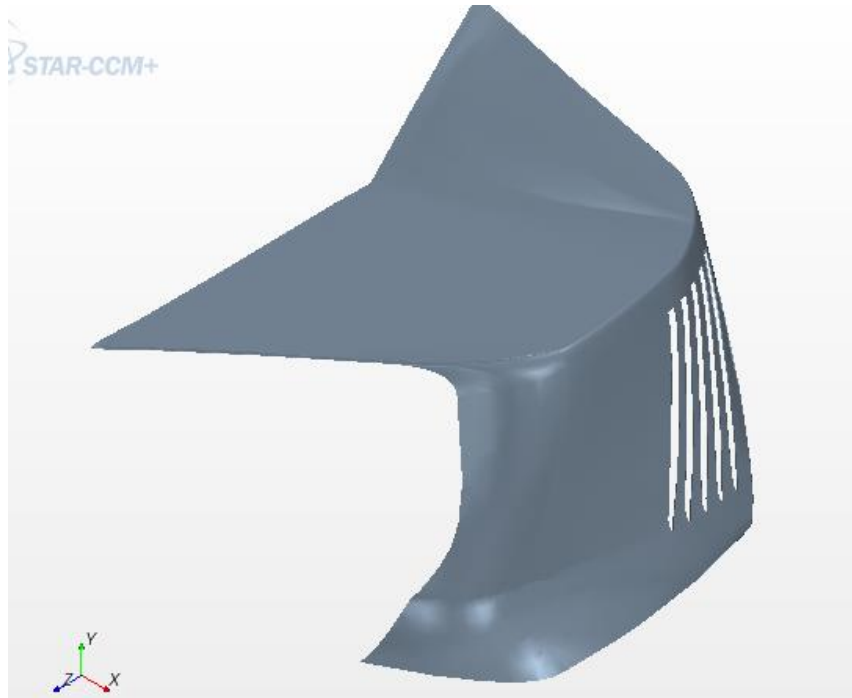
**Figura 7.24** Isométrico del diseño número catorce de la carrocería para la temporada 2014 del equipo UNAM motorsports.

La nariz de la carrocería número catorce, figura 7.24, se tomó del doceavo diseño. Se puede ver también que esta carrocería tiene dos superficies laterales a la altura de la espalda de donde

debería estar el piloto. Estas superficies se quieren para disminuir el arrastre al evitar que el aire entre a la zona de motor.

Algo notable en este diseño es que los ductos laterales son de un tamaño parecido a los de la temporada pasada. Si se quiere disminuir peso se debe probar con ductos más cortos. No necesariamente por cortos estos no ayudaran a disminuir el arrastre. Como se ha mantenido en este trabajo se cree que los ductos laterales son piezas claves para la disminución de arrastre.

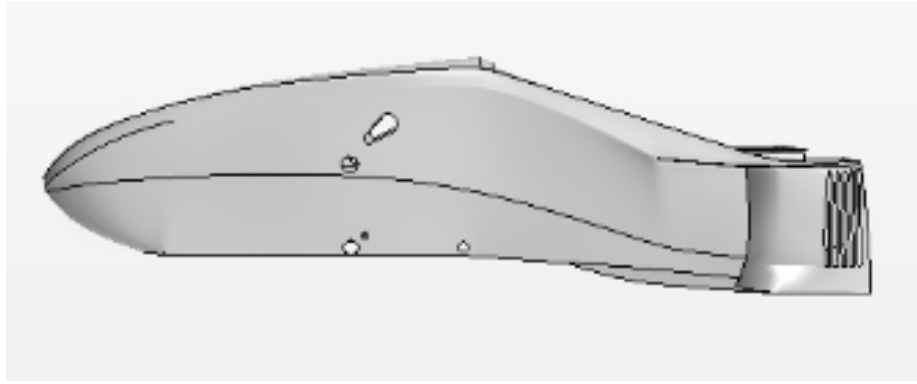
En el siguiente diseño se retoma el concepto del treceavo diseño y se le realizó una modificación a los ductos. Se removió la superficie delantera para ver el efecto de no tenerla, figura 7.25.



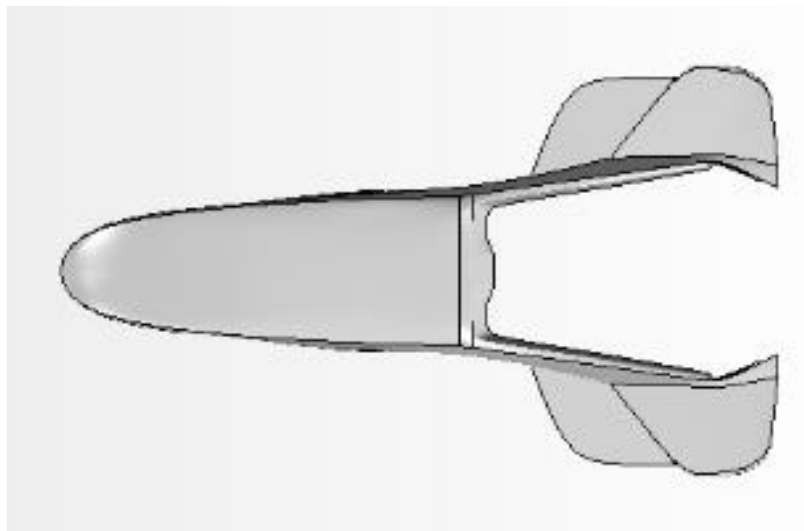
**Figura 7.25** Ductos laterales con branquias. (Ductos laterales definitivos para la temporada 2014)

Después de analizar a ambos equipos, el equipo se dio cuenta de que ambos conceptos tienen cosas positivas que pueden funcionar. Al final se toma la decisión de unir ambos equipos y desarrollar una carrocería que sea una combinación de conceptos. Se utilizarán los ductos laterales cortos con branquias y la nariz continua del otro concepto. Al trabajarse se determinó que la nariz puede ser más redonda y más corta. Los resultados se esperan mejorar que cualquiera de las simulaciones anteriores.

A estas alturas de la temporada la fecha límite permitirá realizar una o dos simulaciones de diseños de carrocería más. Esto presiona al equipo a obtener buenos resultados en esta última simulación. De no ser así se tendrá que escoger un diseño pasado que satisfaga los objetivos y represente una manufactura sencilla.



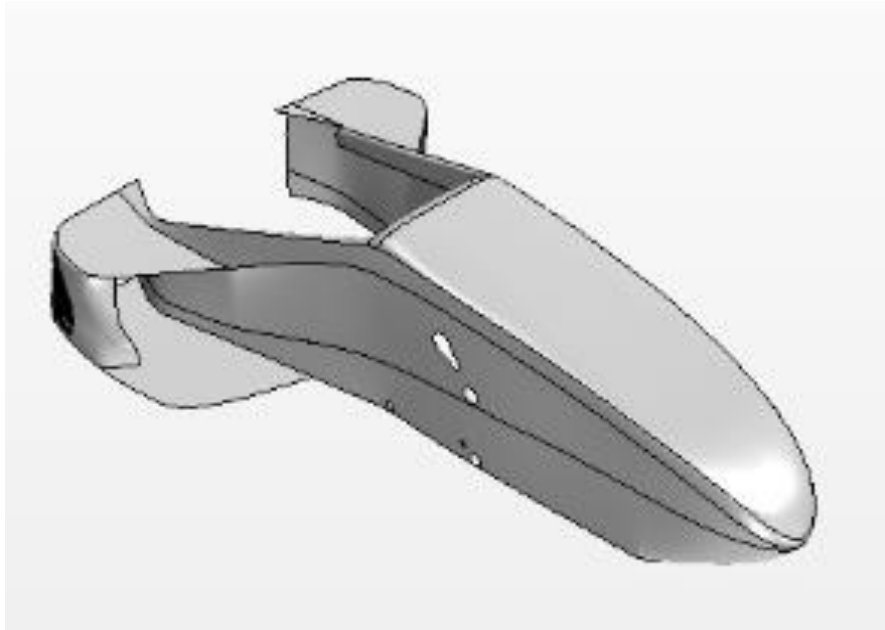
**Figura 7.26** Vista lateral del último diseño de la carrocería de la temporada 2014. (Diseño Final)



**Figura 7.27** Vista superior del último diseño de la carrocería de la temporada 2014.

Este último diseño, de las figuras 7.26 y 7.27, representa la unión de ambos conceptos. Sin embargo, se puede ver como la nariz tiene una curva distinta a modelos anteriores. Esto es debido a que antes de seguir con las simulaciones de CFD, se recibió una notificación por parte del sistema de atenuador de impactos en el que este cambiaba de modelo por lo que las dimensiones cambiaron. Al tener esta información, el equipo rediseñó la nariz teniendo como resultado la curva que se ve en la figura 7.26.

El modelo cuenta con las perforaciones de suspensión, con ductos laterales pequeños con branquias y con un piso alargado que ayuda con el arrastre sin producir fuerza de sustentación negativa.

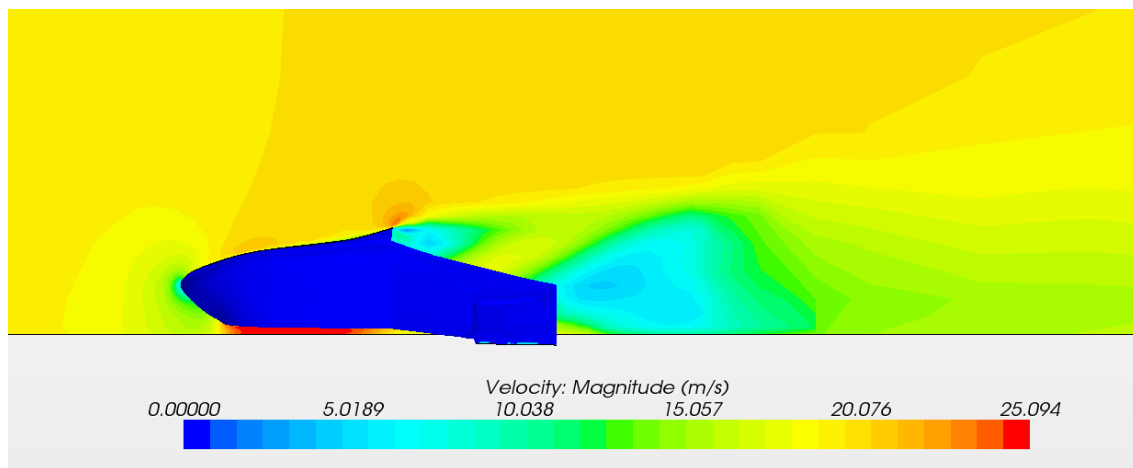


**Figura 7.28** Diseño Final de la carrocería 2014.

El diseño final, figura 7.28, resultó el mejor diseño de la temporada aun cumpliendo con el reglamento y teniendo curvas relativamente fáciles de manufacturar. Los resultados obtenidos son satisfactorios y se logra mantener el coeficiente de arrastre.

#### 7.4 Campos de Velocidades

En esta sección se mostrarán los campos de velocidades de las carrocerías presentadas previamente. Se discutirán ciertos fenómenos que se puedan apreciar en las figuras y se realizarán ciertas aclaraciones al respecto. Todos los análisis fueron realizados a 20 m/s.

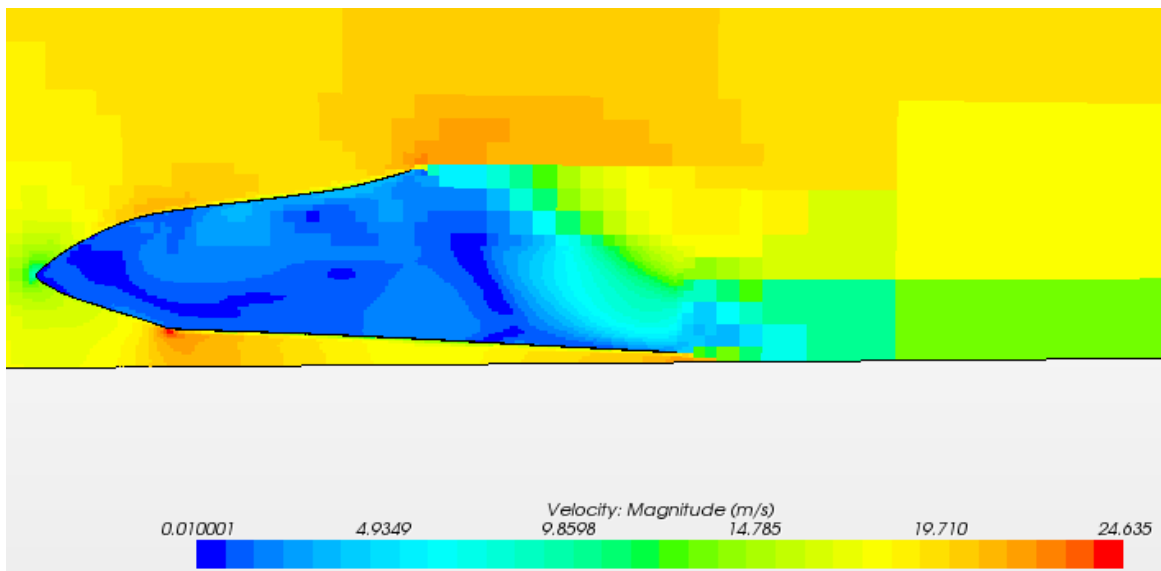


**Figura 7.29** Vista lateral del plano de velocidades del segundo diseño de carrocería.

La velocidad elegida en los análisis es de 20 m/s ya que ésta es una velocidad máxima en condiciones óptimas dentro de la competencia. Suponiendo que el coche durante la competencia se encuentra por el rango entre 10 y 15 m/s, entonces el arrastre generado se encuentra alrededor de los 50 N ignorando las fluctuaciones de carga ocasionadas por las vibraciones. Esto es una carga mínima cuando se pone en perspectiva con respecto a la fuerza necesaria para mover el coche.

Este primer campo de velocidades, figura 7.29, sirve para identificar algunos fenómenos recurrentes en las simulaciones. El primero que se aprecia es la zona de baja velocidad detrás de la carrocería. Esta es la estela formada debido al desprendimiento de la capa límite. Esta zona es causa de arrastre. El segundo fenómeno que se aprecia es la zona de estancamiento de la velocidad en la parte delantera. Tal como se mostró en la figura 3.2 el estancamiento de velocidad se presenta en la parte delantera del coche. Por otro lado, esto no sucede en la parte trasera del coche debido a la creación de la estela.

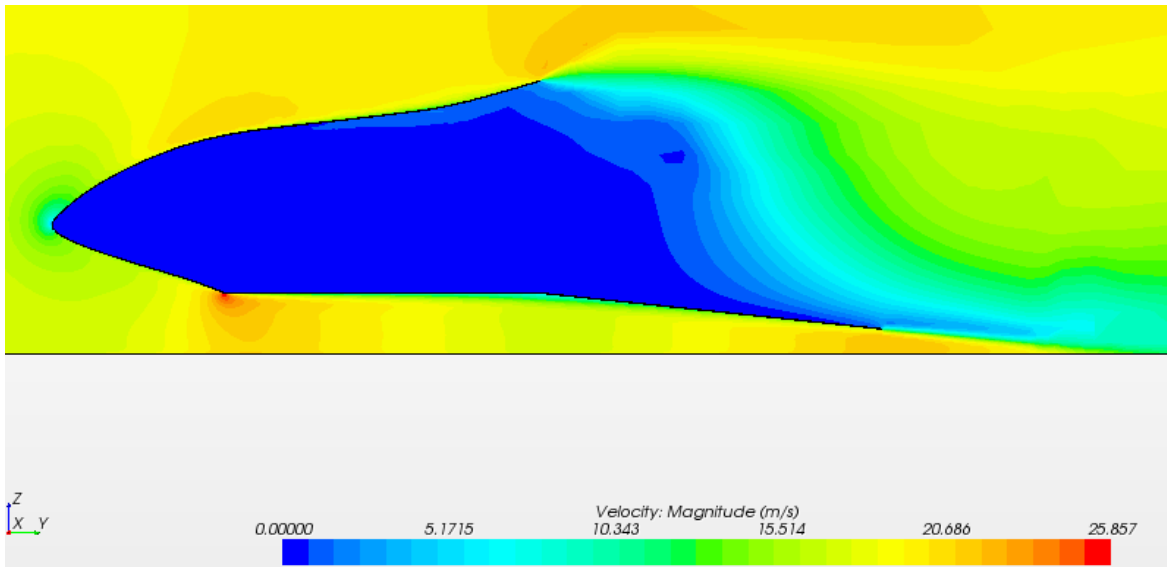
Debajo de la carrocería se aprecia el tercer fenómeno. El incremento de la velocidad del flujo debajo del coche cuando este se encuentra a una distancia corta con respecto del suelo. Estas primeras simulaciones son para probar las carrocerías y por esto la distancia con respecto del suelo no es definitiva.



**Figura 7.30** Vista lateral del tercer diseño de la carrocería del equipo UNAM motorsports para la temporada 2014.

En la figura 7.30 donde se muestra el tercer diseño se puede ver como el ángulo del piso del coche con respecto del suelo cambió. Esto no produce un efecto deseable ya que la velocidad no se incrementa de la misma forma que en el segundo diseño. Este incremento de velocidad produce una diferencia de presión causa de la fuerza de sustentación negativa por lo que es benéfico para la dinámica del coche. O por lo menos para contrarrestar la creación de sustentación positiva.



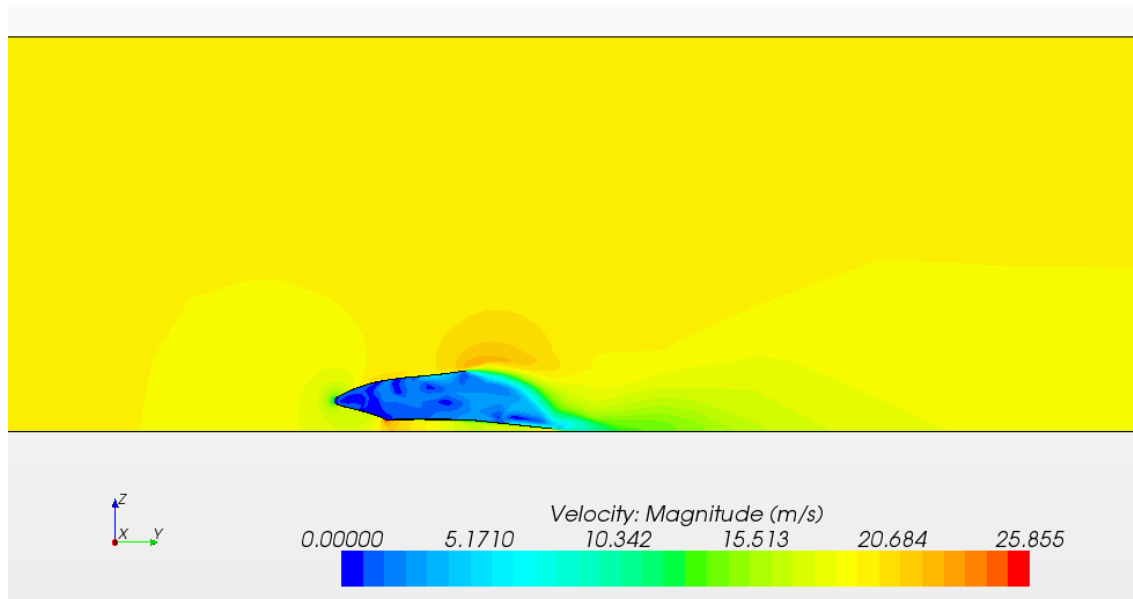


**Figura 7.31** Vista lateral del plano de velocidades de la carrocería número cuatro.

Para el cuarto diseño se redujo la nariz y se cambió el ángulo del piso del coche con respecto del suelo. Estos cambios redujeron el coeficiente de arrastre de 0.743 a 0.682. Para dibujar estas carrocerías se está utilizando el chasis de la temporada pasada pues se debe empezar con algo.

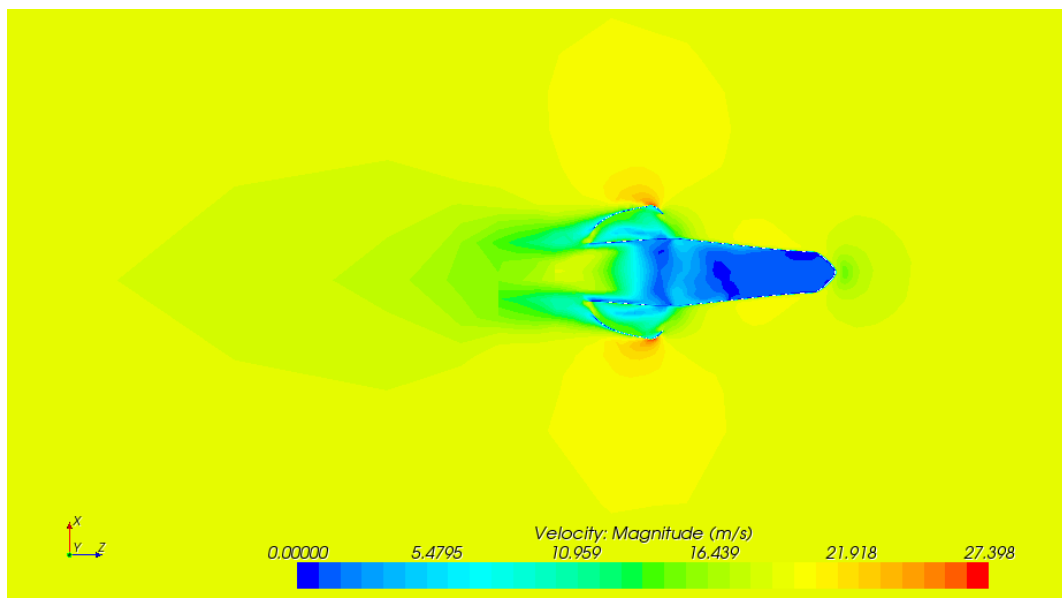
Seguimos observando la zona de estancamiento en la parte delantera del coche, así como una zona de alta velocidad en la parte inferior de la nariz. Esta curva crea una condición favorable de presiones hasta el punto en que la velocidad de nuevo disminuye (área media debajo de la carrocería). Para poder crear el efecto suelo es mejor tener una condición favorable debajo de la carrocería que se mantenga a lo largo de todo el piso del coche.

En la figura 7.31 se observa un código de colores que nos muestra cómo es que la velocidad pasa de 0 a aproximadamente 20 m/s. En la figura 7.29 se observa cómo se crean dos estelas, una grande en la parte trasera de la carrocería y otra pequeña al empezar la cabina del piloto. Se disminuyó la curvatura de esa parte frontal y con eso se eliminó la estela pequeña y se disminuyó el arrastre en un 22%. Solo con un cambio de geometría se consiguió un cambio del coeficiente de arrastre de casi un cuarto de su magnitud.



**Figura 7.33** Plano de velocidades en vista lateral del séptimo diseño de carrocería de la temporada 2014.

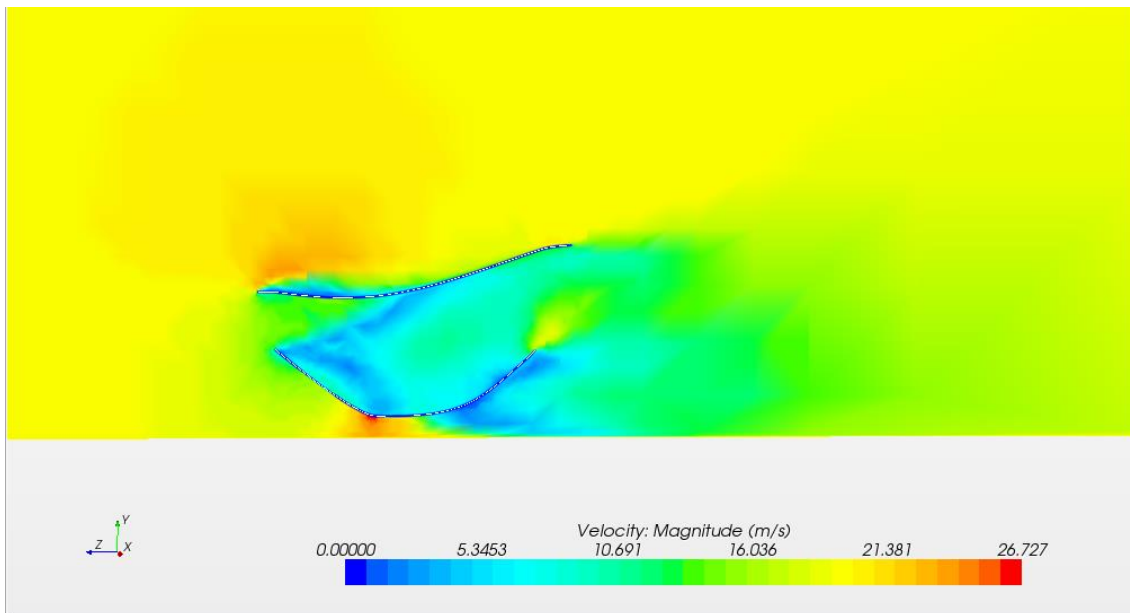
El séptimo diseño, figura 7.33, con los ductos laterales en una posición elevada es un diseño sencillo y unos ductos falsos ya que dentro no cabe el sistema de enfriamiento. Esta carrocería presentó el coeficiente de arrastre más bajo de la temporada. Su coeficiente de arrastre es de 0.6093 y su coeficiente de sustentación es de 0.3888. Parece que los ductos laterales elevados producen sustentación porque 0.388 es el coeficiente de sustentación más elevado hasta ese momento de los diseños. La carrocería con menor arrastre presentó un elevado coeficiente de sustentación.



**Figura 7.34** Vista superior del plano de velocidades de la carrocería alternativa con branquias.

La figura 7.34 muestra como la velocidad del flujo se ve afectada por la carrocería en un plano paralelo al suelo. Se puede ver la estela por detrás representada por la zona de velocidades bajas (verde-amarillo). Se observa cómo se forma estela por cada ducto lateral. El diseño de los ductos laterales muestra una curva que le permite al flujo tener una velocidad relativamente alta (con respecto a las velocidades dentro de los ductos) en los extremos exteriores de los ductos laterales. Mientras que se aprecia como se despega la capa límite en la zona que va al interior de estos (las zonas cercanas al piloto). Para mejorar eso se podría trabajar en una curva más suave en esa parte interna de los ductos. Recordando el diseño de esos ductos puede que la causa de esa separación sea la geometría de la entrada de los ductos.

Nótese como se producen alteraciones en la velocidad a ambos lados de la carrocería. En este caso se produce una condición favorable de coeficiente de presiones al aumentar la velocidad en esos puntos manteniendo la capa límite hasta en punto donde se rompe y se empiezan a crear las estelas de color verde y azul en la figura 7.34.



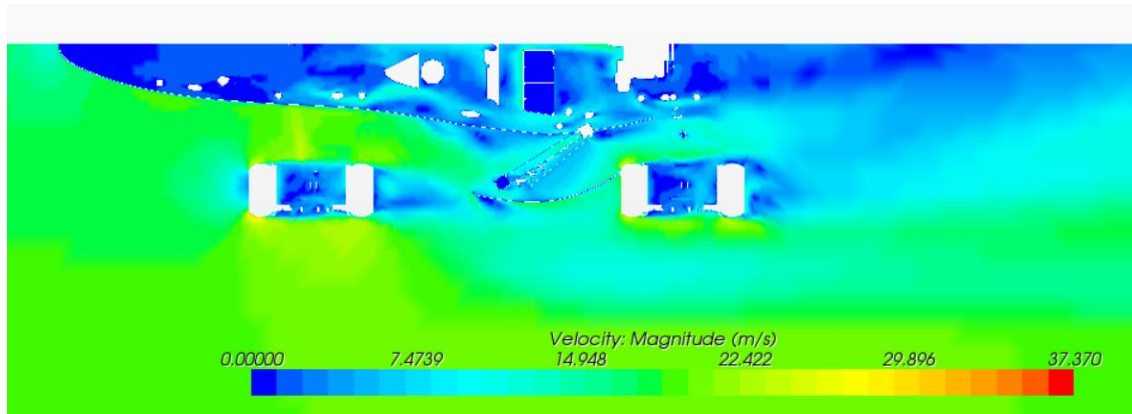
**Figura 7.35** Vista del plano lateral del campo de velocidades dentro del ducto lateral de la primera carrocería con branquias de la temporada 2014.

Lo primero que salta a la vista de la figura 7.35 es que la capa límite se despega aproximadamente a la mitad del ducto (superficie inferior) produciendo arrastre. La curva de entrada funciona aparentemente bien al crear una condición favorable e incluso fomentando efecto suelo por debajo del ducto. Sin embargo, la curva trasera del ducto es muy agresiva. Si se compara esa curva con la teoría de difusores el ángulo de salida es muy alto ya que generalmente un difusor cuenta con ángulos de salida entre 6 y 15 grados. El ángulo de salida de este diseño de ductos es definitivamente mayor a 15 grados.

Se observa también como las branquias no ayudan al flujo dentro del ducto y aparece una zona de estancamiento en la parte delantera del ducto (lado izquierdo). El borde de entrada de aire al

ducto produce inmediatamente la separación de la capa límite. Es bueno disminuir la velocidad pero no es bueno producir zonas de estancamiento.

La curva de salida agresiva no es favorable para el arrastre ni para el efecto sueño y a pesar de eso se observa como la velocidad aumenta al salir del ducto alcanzando valores aproximados a 18 m/s.



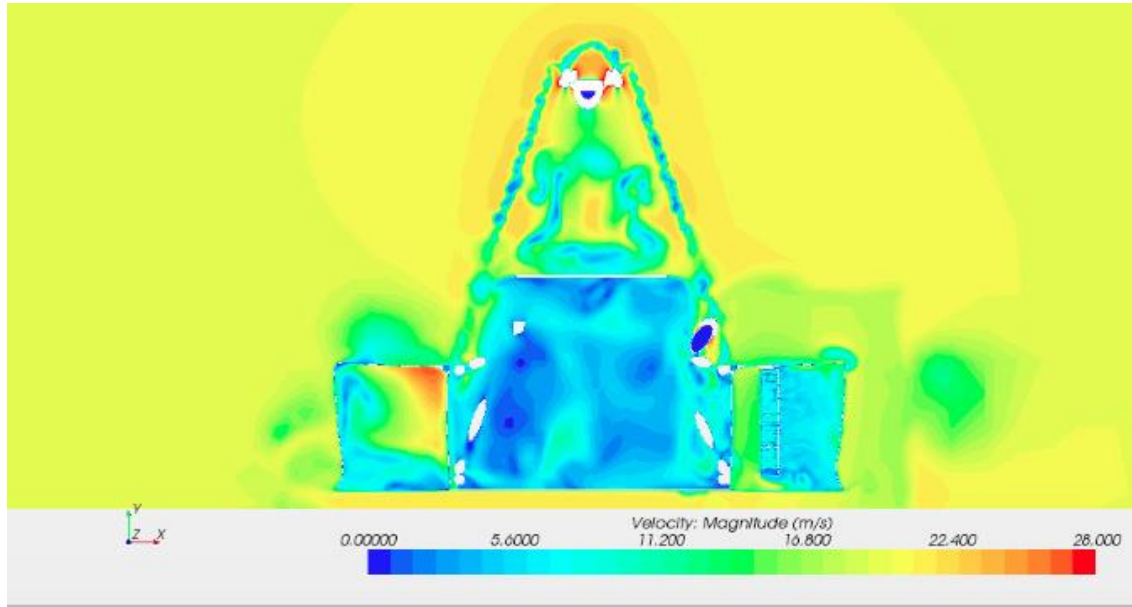
**Figura 7.36** Vista superior del campo de velocidades con el doceavo diseño de carrocería.

Entre una carrocería con branquias y la carrocería número 12 ocurrieron algunos cambios notables. En lo que estos cambios ocurrieron lo más importante fue que la calidad de dibujo incrementó su nivel. En este doceavo diseño ya se están creando carrocerías de manufactura posible y real para los recursos del equipo.

En la figura 7.36 se observa el campo de velocidades. Se observa la estela detrás del coche y se aprecia la diferencia entra la estela de un coche con todos sus componentes a la estela de las carrocerías. Algo que llama mucho la atención en la turbulencia creada por las llantas delanteras. El diseño número doce rompe las reglas puesto que no deja espacio entre la llanta y la carrocería.

El flujo que pasa entre la llanta delantera y la carrocería parece tener buen flujo directo hacia el intercambiador. En cuanto al ángulo al que se encuentra el intercambiador este no lo decide el sistema de aerodinámica, sino el sistema de enfriamiento por lo que los comentarios con respecto al flujo que puede entrar con ese ángulo no serán reportados en este trabajo.

La simulación del radiador como se mencionó en capítulos anteriores se realiza con una salida de presión en la parte delantera simulando así la entrada de aire. Para la parte posterior del intercambiador se simula con una cara de flujo de masa en la cual la masa que se simula salga por segundo es la masa que se calcula que sale por la salida de presión.



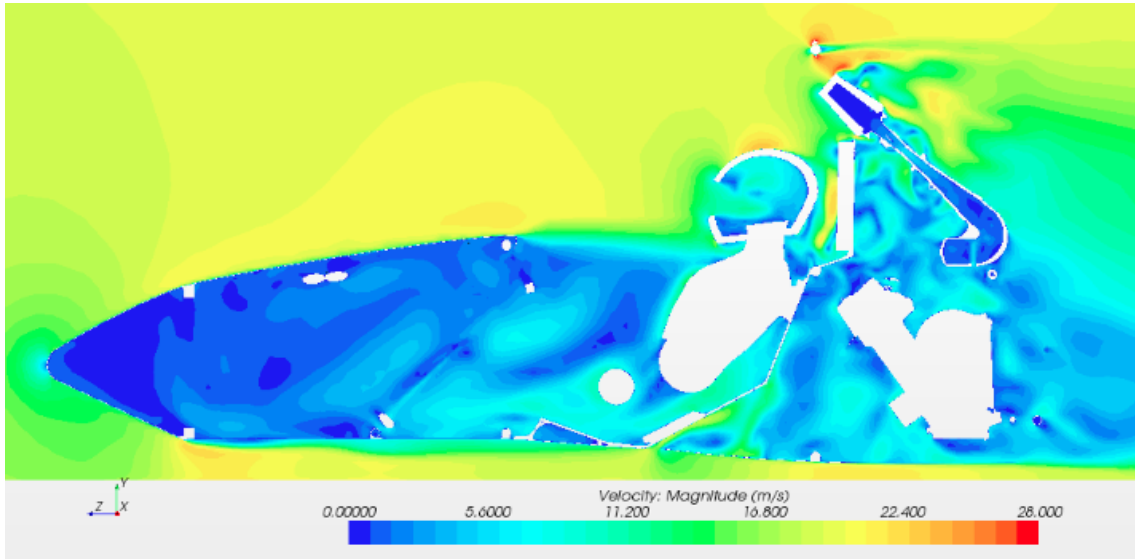
**Figura 7.37** Vista frontal del campo de velocidades con el treceavo diseño de carrocería de la temporada 2014.

En la figura 7.37 se aprecia como el flujo dentro de los ductos laterales presenta distintas velocidades dependiendo de la posición x-y en la que analicemos. Por ejemplo, la zona de baja velocidad puede deberse a la turbulencia ocasionada por las llantas delanteras. En cambio, el aire que pasa entre las llantas delanteras y la carrocería lateral mantiene una velocidad aproximada de 20 m/s.

Ahora bien, este treceavo diseño tiene una característica que es crucial para entender la zona de estancamiento en la parte inferior dentro de los ductos laterales. Los ductos tienen una superficie en la parte frontal como se aprecia en la figura 7.21 y 7.22. Esta superficie crea estancamiento de la misma manera que la carrocería número 14 puesto que los ductos de esa carrocería también tienen esa superficie a la entrada de los ductos.

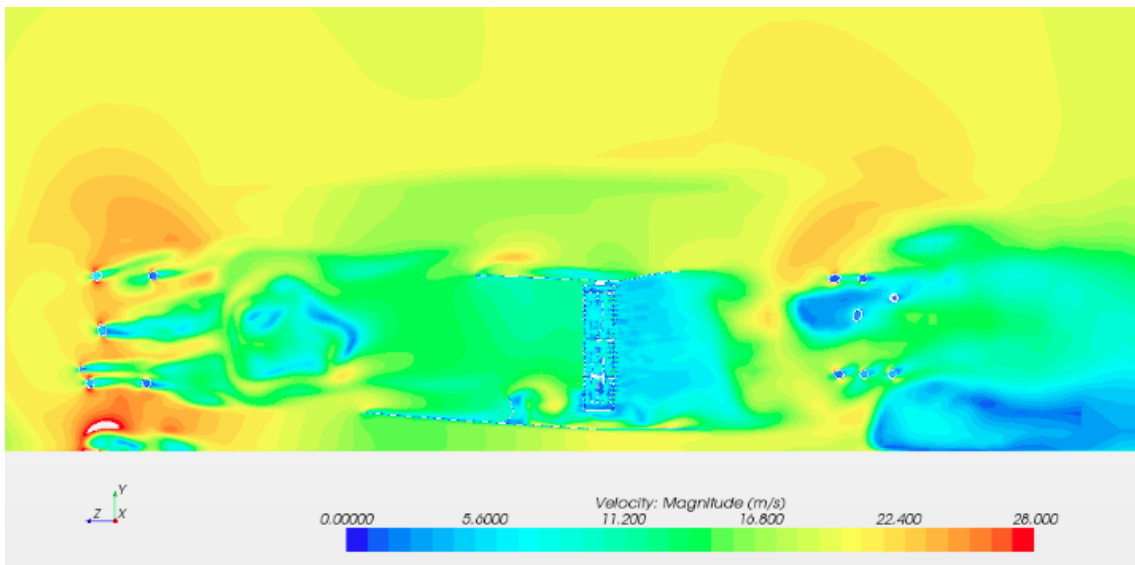
Este plano en particular se encuentra situado justo entre el casco del piloto y la cabecera del asiento. Se aprecia la estela dejada por el tubo anti-vuelcos principal de la carrocería. En la figura 7.38 se observa la parte superior de este tubo y se aprecia la estela que deja.

La distancia entre el piso del coche y el sueño ya es la real a la cual se diseñó el coche. Esto es clave ya que a diferentes alturas el efecto aerodinámico es distinto. A menor distancia mayor incremento de velocidad debajo del coche y a mayor distancia menor es el incremento de velocidad debajo del coche. A mayor velocidad debajo del coche, mejores son las condiciones para la creación de sustentación negativa.



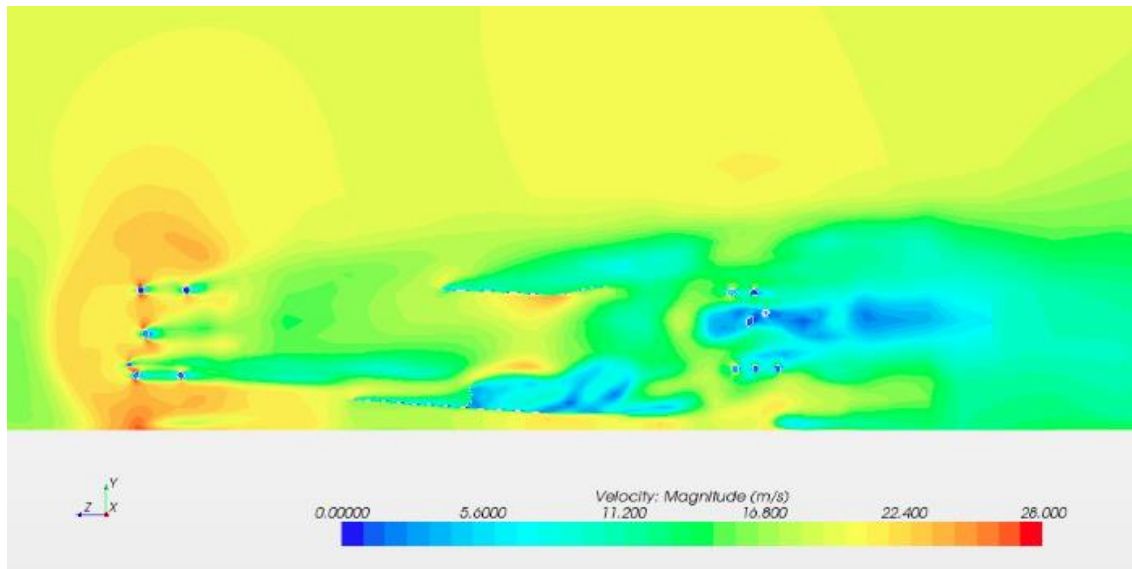
**Figura 7.38** Vista lateral del campo de velocidades con el treceavo diseño de carrocería de la temporada 2014.

Existe una separación en el piso del coche en la zona de piloto y el piso extendido debajo de los ductos laterales y debajo del motor. Esta separación ocasiona que el aire se introduzca entre el asiento y el motor. Esto causa que se pierda la condición favorable debajo del coche. Esto es bueno incluirlo en la simulación ya que en la realidad esta separación existe y por lo tanto mientras más se parezca el CAD a la versión final del coche, los resultados tienden a parecerse más a la realidad.



**Figura 7.39** Vista lateral del campo de velocidades con la carrocería número trece de la temporada 2014.

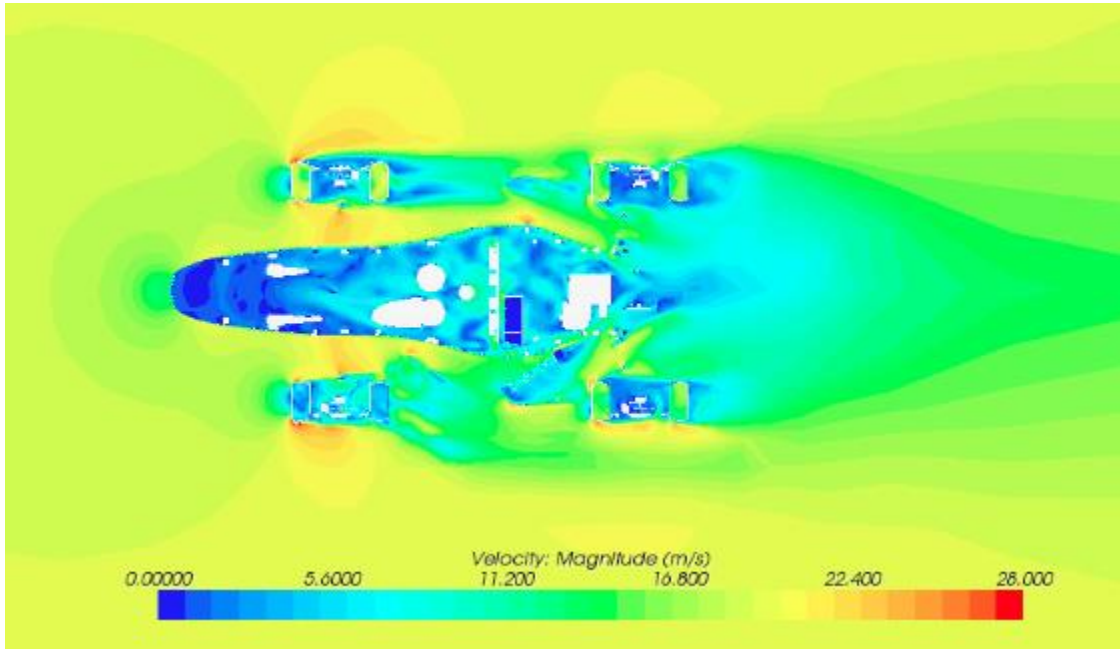
La figura 7.39 muestra el campo de velocidades donde se aprecian las perturbaciones creadas por los brazos de suspensión y por las llantas. En este plano lateral se aprecia de nuevo el efecto que tiene la superficie frontal a la entrada de los ductos laterales. Definitivamente no está funcionando como se esperaba. Otro elemento a observar es el espacio que existe entre el intercambiador de calor y el ducto lateral, especialmente debajo del intercambiador. Este espacio de nuevo es una réplica de lo que sucede en la realidad ya que el ducto no se encuentra completamente sellado. Si bien es cierto que se intenta sellar, esta tarea no es sencilla y debido a modificaciones durante la competencia este sello se compromete dejando un espacio a través del cual el aire puede fluir en vez de a través del intercambiador.



**Figura 7.40** Vista lateral del campo de velocidades a la altura del ducto lateral derecho.

La comparación entre ductos es vital para entender la perturbación que representa un cuerpo como el intercambiador de calor del lado izquierdo de la carrocería. En la figura 7.40 vemos un flujo que corre a mayor velocidad a excepción de la parte azul en el centro inferior del ducto ocasionado por la superficie a la entrada del ducto.

Una característica en el flujo que ambos lados comparten es la velocidad que se presentan a la salida de los ductos. Esta velocidad es buena para incorporarse al flujo detrás del coche. Es positiva para disminuir el arrastre.

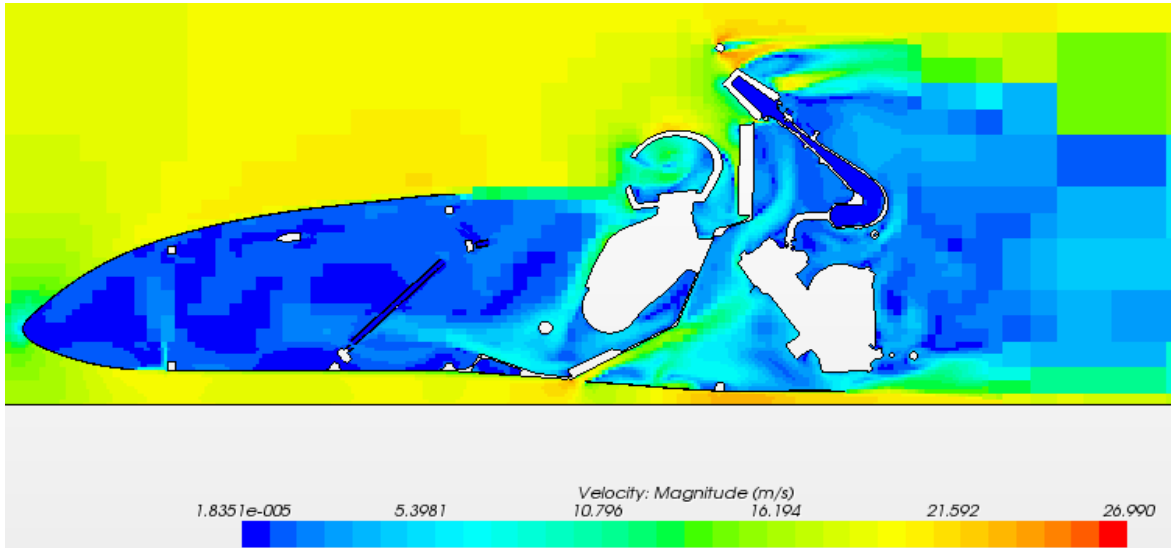


**Figura 7.41** Vista superior del plano de velocidades con el treceavo diseño de la carrocería.

Observando la figura 7.41, el plano superior del campo de velocidades podemos ver como los ductos laterales cumplen con el objetivo de dirigir el flujo hacia detrás del coche sin enviarlo hacia las llantas traseras, ayudando a disminuir el arrastre.

En el ducto derecho, el cual está libre, se observa una zona de alta velocidad pegada del lado interno del ducto. Esta zona ayuda al aire a mantenerse pegado siguiendo la geometría establecida por la carrocería. La diferencia entre el lado con radiador y el lado libre es notoria desde la parte de las llantas delanteras. El flujo que empieza a perder velocidad debido a la presencia del intercambiador de calor afecta el flujo que se encuentra a la altura de la llanta delantera provocando que se produzcan turbulencias que se separan más de la carrocería principal en comparación con la del lado derecho.

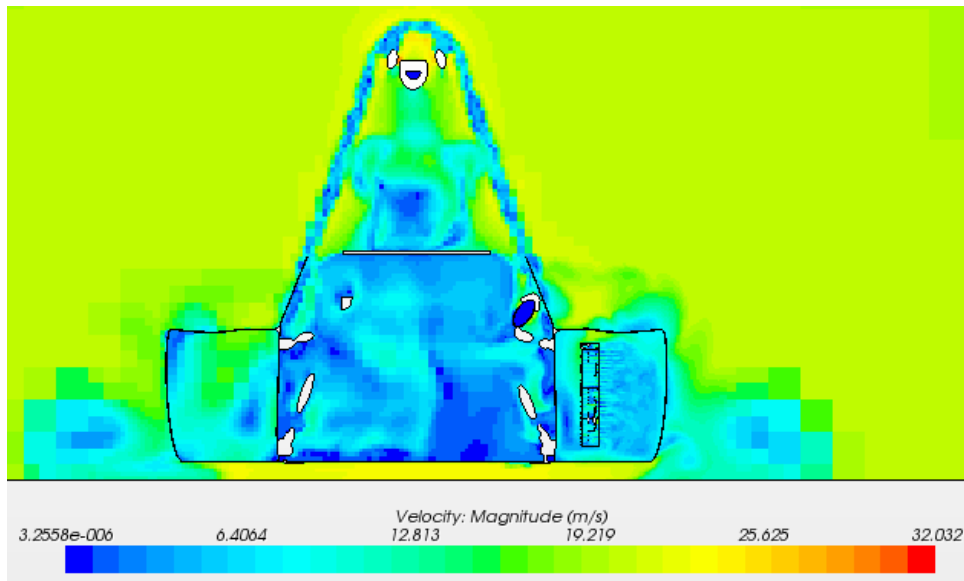




**Figura 7.42** Vista lateral del campo de velocidades con el diseño número catorce de carrocería 2014.

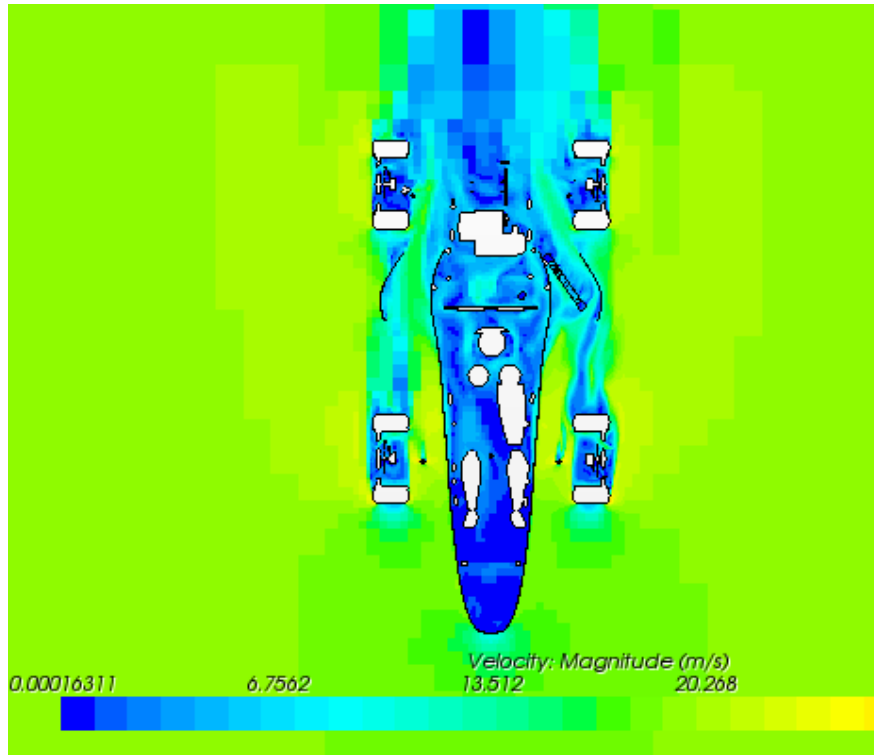
Se empezará a analizar la parte frontal del campo de velocidades. En la figura 7.38 se observa una zona de baja velocidad pegada a la carrocería inferior. Esta velocidad produce una zona de presión que resulta ser no favorable y puede llevar a la separación del flujo. Por otro lado, en la figura 7.42 la velocidad debajo del coche no presenta la misma situación. Esto supone una mejor geometría en la nariz del coche. Es claro que la nariz de este catorceavo modelo es más suave que la del modelo número trece.

Se sigue presentando la pérdida de la condición favorable debajo del coche debido al espacio que existe entre piezas del coche inferior.



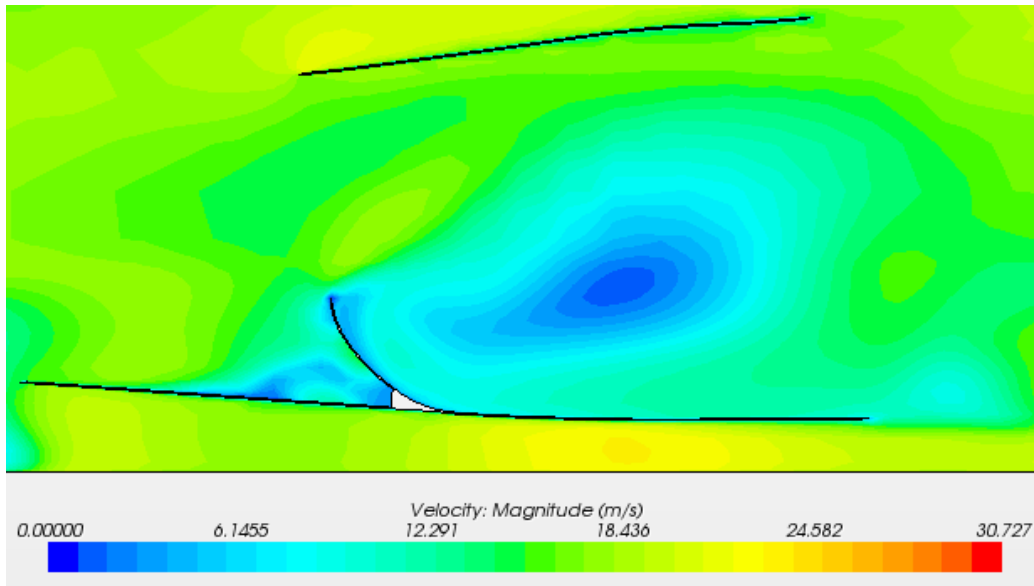
**Figura 7.43** Vista frontal del campo de velocidades del catorceavo diseño de la carrocería 2014.

Las velocidades dentro de los ductos laterales son menores a las del diseño número trece. En la figura 7.43 se aprecia también la estela dejada por el tubo anti-vuelcos principal así como una diferencia entre la turbulencia creada a los lados de los ductos laterales. La turbulencia creada del lado izquierdo del piloto se encuentra desplazada más hacia afuera que la del lado derecho del piloto. Como se mencionó antes esto puede deberse a la presencia del intercambiador de calor.



**Figura 7.44** Vista superior del campo de velocidades con la carrocería número 14 de la temporada 2014.

Con el diseño de ductos laterales del catorceavo diseño, figura 7.44, se aprecia un gran espacio entre el intercambiador de calor y la pared interna de estos. El flujo tiene a correr por ese espacio en vez de pasar a través del intercambiador. Este espacio es lo que se cree es la causa de que el flujo no parezca tan alterado en este diseño como en el anterior. Sin embargo, con este espacio y este diseño número catorce el flujo másico es un 3% menor al del diseño número trece. A estas alturas de la temporada se debe poner especial atención a los ductos laterales. Si los datos del sistema de enfriamiento casi no varían entre ellos entonces se deben tomar otros factores en cuenta para la toma de decisión con respecto a que diseño de ductos es el mejor.



**Figura 7.45** Vista lateral del campo de velocidades en el ducto derecho del diseño número catorce de la temporada 2014.

Al analizar más de cerca el flujo dentro de los ductos, figura 7.45, podemos apreciar que ahora son más cortos y el flujo dentro de ellos presenta una zona de baja velocidad. Lo cual no es óptimo para la disminución de arrastre, especialmente porque se trata del ducto que no contiene al sistema de enfriamiento.

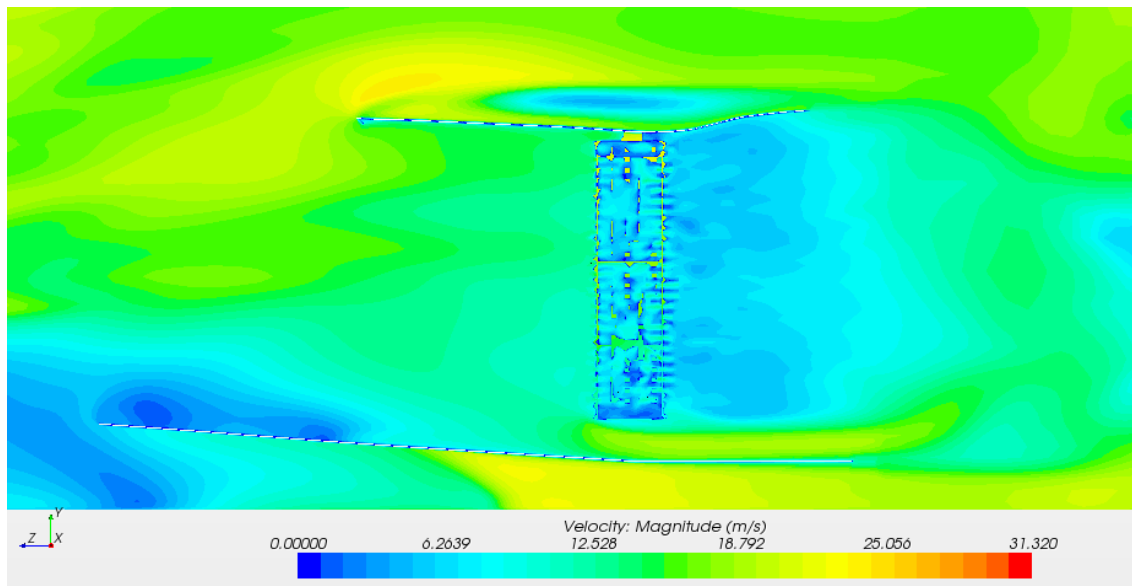


**Figura 7.46** Vista lateral del plano de velocidades del ducto izquierdo de la carrocería número catorce.

Del otro lado también vemos como se crea una zona de estancamiento corriente abajo justo después de la superficie frontal del ducto. Lo conveniente de este nuevo diseño de ductos es que

la regla ya se cumple sin ningún problema dejando espacio suficiente entre la llanta y el ducto. La figura 7.46 muestra como el aire que se introduce debajo del piso del ducto aumenta su velocidad después de salir de la zona de turbulencia detrás de la llanta delantera.

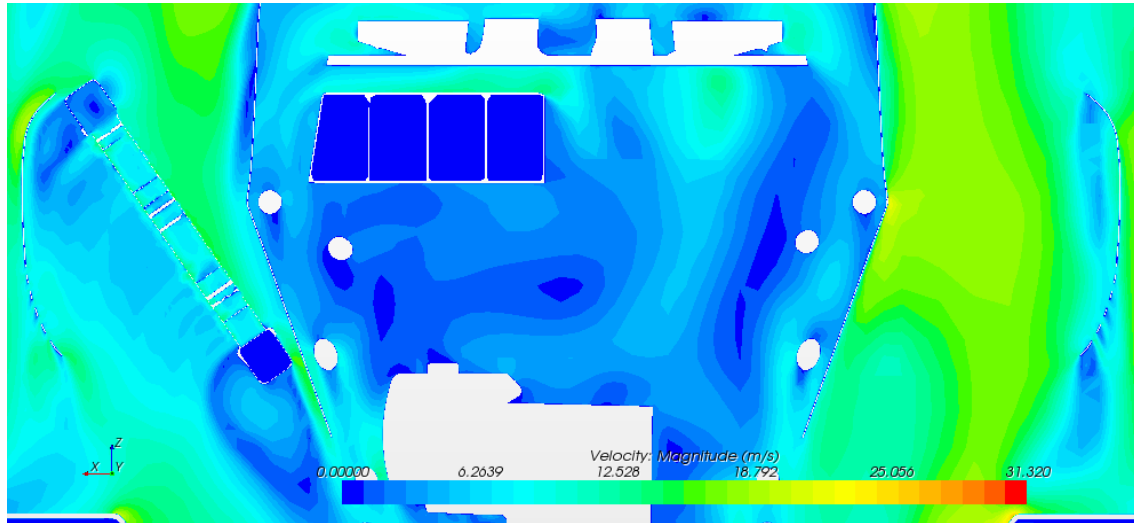
Al no tener buenos resultados con los ductos el equipo cree que la razón principal de esto es la superficie que se encuentra en la parte delantera. Se escogieron los ductos del diseño número 13 para mejorar al eliminar esa superficie esperando mejores resultados. Como se mencionó en la parte de presentación de modelos la combinación final consistió en los ductos del diseño trece y la carrocería central del diseño catorce. Pero antes había que analizar sí la eliminación de la superficie sí mejora los resultados en cuanto al flujo dentro y alrededor de los ductos laterales.



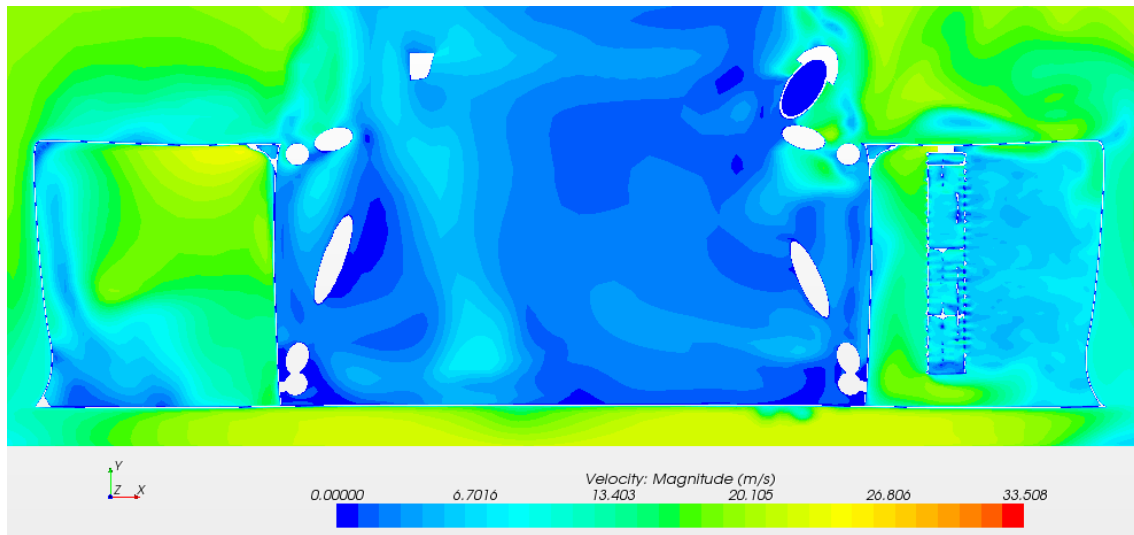
**Figura 7.47** Vista lateral del campo de velocidades del ducto izquierdo sin superficie delantera.

La diferencia entre la figura 7.47 y la figura 7.39 radica en que no existe esa superficie a la entrada de los ductos. El rango de velocidades es distinto. Las velocidades en la figura 7.39 son mayores a las velocidades de la figura 7.47. Al ser mayor la velocidad debería tener un flujo másico menor que este diseño en donde la velocidad es menor. De hecho, el flujo másico sin la superficie delantera es superior en un 12% con respecto al flujo másico del diseño número trece y un 13.3% mejor que el diseño número catorce.

Algo que surge al analizar el campo de velocidad es que los espacios entre el intercambiador y el ducto ayudan a mejorar el flujo a través de estos ya que ese espacio funciona como una branquia transmitiendo energía del flujo delantero corriente abajo. Éste flujo de velocidad alta puede que ayude al flujo a incorporarse de mejor manera con el flujo a la salida del ducto lateral.

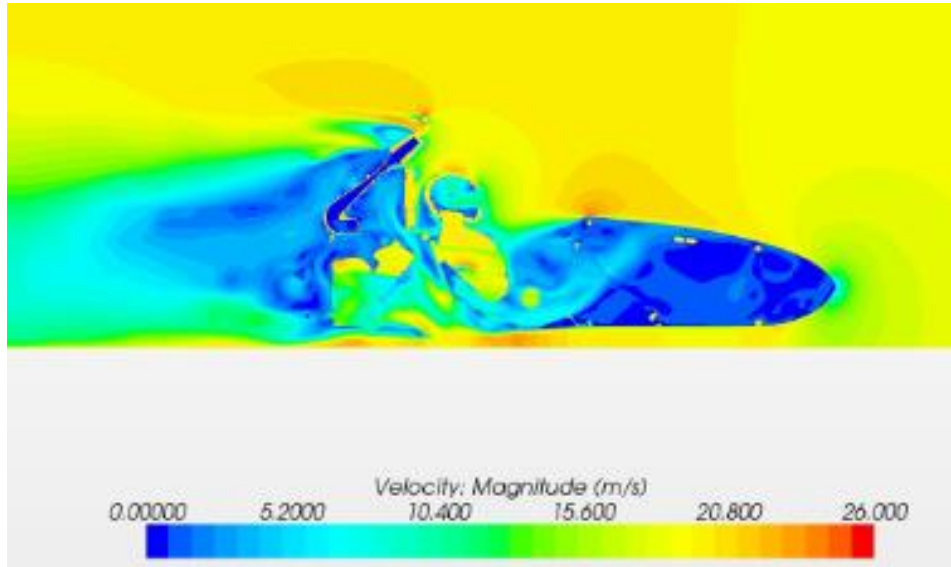


**Figura 7.48** Vista superior el campo de velocidades con los ductos laterales del treceavo diseño sin superficie delantera.



**Figura 7.49** Vista frontal del campo de velocidades con los ductos laterales del treceavo diseño sin superficie delantera.

Los rangos de velocidades son menores con este diseño de ductos, figuras 7.48 y 7.49, a diferencia de en el treceavo diseño. Puede que la razón de eso sea que en el diseño número trece se formaban zonas de estancamiento por donde el aire no fluye lo cual físicamente funciona como una restricción disminuyendo el área transversal para el flujo de aire y por consecuencia obligándolo a aumentar su velocidad. Para determinar cuál es mejor de acuerdo a nuestros objetivos se compararán los coeficientes de arrastre.



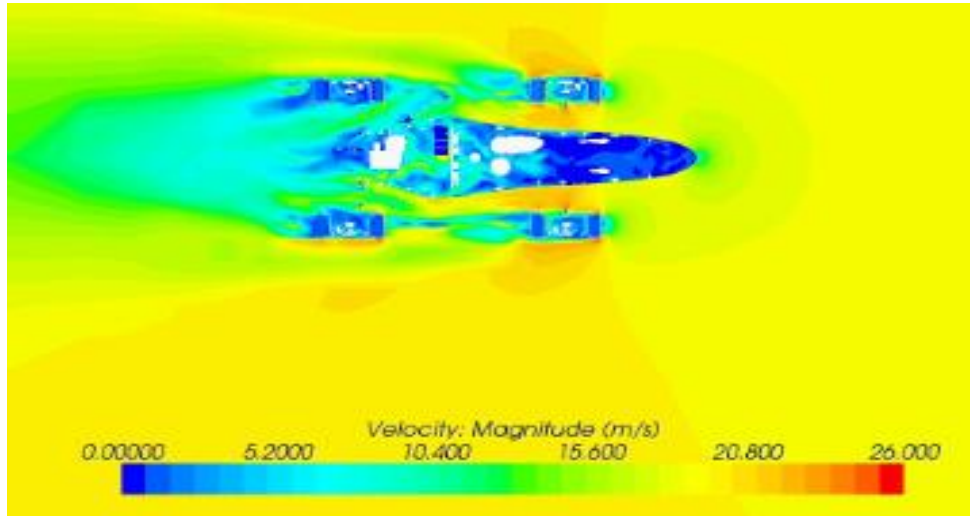
**Figura 7.50** Vista lateral del campo de velocidades con el diseño final de carrocería de la temporada 2014 del equipo UNAM motorsports.

Para el diseño final de la carrocería, figura 7.50, se tiene una combinación de estilos entre dos equipos que trabajaban por separado con un solo objetivo. Para éste momento el coche se tiene dibujado completamente en CAD por lo que la altura, el intercambiador de calor, la suspensión, posición de motor, etc se encuentran posicionados en su posición final real según el CAD. Se mencionó que la nariz tuvo algunos cambios, resultado del trabajo en conjunto con el sistema de atenuador de impactos.

Hasta ahora se analizaron los ductos final con la carrocería central del diseño número trece. Ahora se incorporan al diseño final y se espera un comportamiento favorable del flujo para disminuir el arrastre.

Nótese algo muy importante para este análisis. El piso de los ductos no atraviesa la parte media del coche. Este se encuentra separado ahora individualmente para cada ducto lateral. La razón de esto es debido a la manufactura y sujeción del mismo. Las reglas dictan que la cabina del piloto debe ser sellada para evitar la entrada de cualquier agente externo sólido proveniente del exterior del coche. Por lo que no tener piso detrás del asiento no rompe las reglas. Solamente habría que revisar si algún componente requiere de alguna protección de posibles piedras o elementos que pudieran introducirse.

Es por esto que en la figura 7.51 se observa un patrón distinto en el rango de velocidades que el flujo adopta en la zona detrás del asiento del piloto. También se aprecia como los agujeros finales para suspensión alteran el flujo dentro de la cabina del piloto.

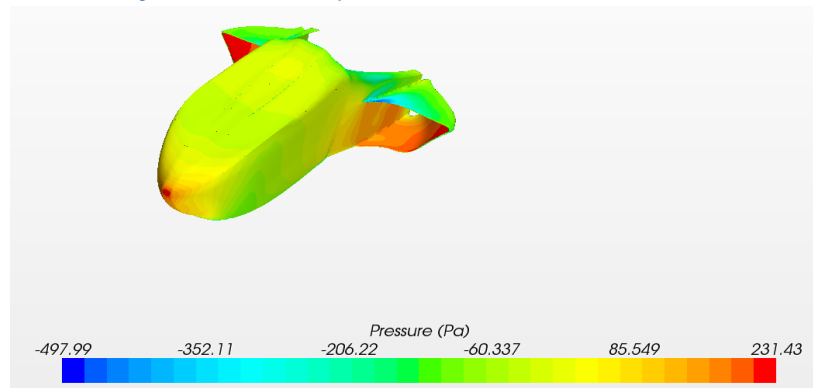


**Figura 7.51** Vista superior del campo de velocidades con el diseño final de la carrocería 2014.

La figura 7.51 muestra cómo se genera una condición favorable en el ducto derecho provocando que el coeficiente de arrastre alcance el valor de 0.77 el cual corresponde al valor de la temporada pasada el cual cumple con los objetivos de temporada de mantener o disminuir el arrastre.

El flujo del lado izquierdo se ve bien de igual manera. Ya sea debido a las branquias o al diseño en general de los ductos el arrastré disminuyó así como el tamaño de los ductos. Es importante hacer notar la diferencia ya que se está creando el mismo coeficiente con menos material, lo que se traduce en menor peso para el coche y posiblemente menor tiempo de manufactura.

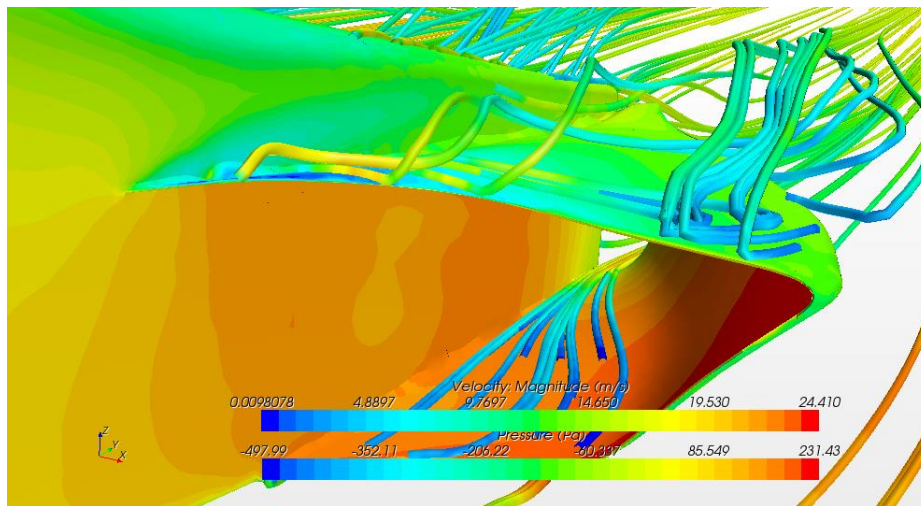
### 7.5 Campos de Presión y Líneas de Flujo



**Figura 7.52** Campo de presiones sobre el segundo diseño de carrocería de la temporada 2014.

No es que se trate únicamente de identificar zonas de alta presión. Una vez que se identifiquen zonas de alta presión se recomienda utilizar en la teoría para explicar el por qué de ese comportamiento. Una vez establecidas algunas posibles causas, ahora se analiza si el efecto es positivo o negativo. En la figura 7.52 se observan tres áreas de alta presión, la nariz, y dentro de los ductos laterales. Si se analiza con más detalle ese diseño, se aprecia que las salidas de los ductos laterales constan de áreas transversales pequeñas en comparación con la entrada. La

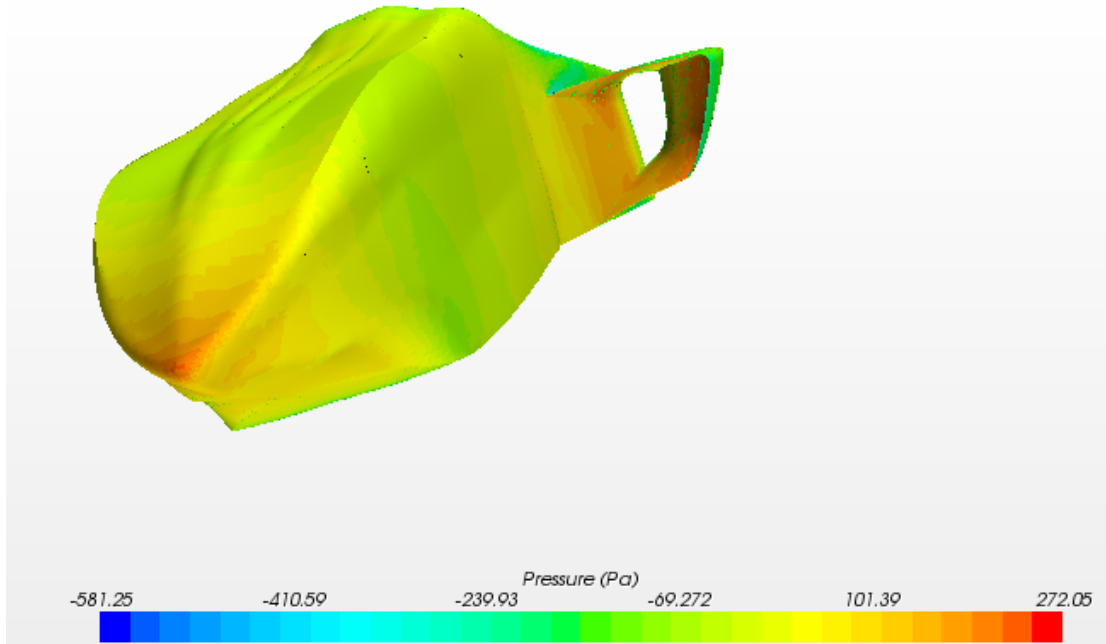
presión alta no significa necesariamente que sea algo contraproducente. Al ver la presión dentro del ducto podemos saber que la velocidad en las zonas de alta presión es baja. La velocidad disminuyó a la entrada del ducto. Eso es positivo para el radiador. Sin embargo, existen otros indicadores de si ese efecto es positivo o negativo para el flujo externo de un coche tipo formula. El coeficiente de arrastre de esta carrocería es de 0.9597. Ese valor es mayor que el valor de la carrocería de la temporada pasada. Se consideran estos factores y se toman decisiones. Al principio de la temporada se pueden confundir tareas con respecto a identificar que elementos pueden mejorar en una carrocería. Se recomienda basarse en distintos factores como las causas, los datos duros (coeficientes adimensionales), el coeficiente de presión (condición favorable o desfavorable), el componente donde se presenta la situación, manufactura, las afectaciones que habrían si se decidiera cambiar esa parte en específico (distancia al chasis, forma de sujetar, choques con otros componentes).



**Figura 7.53** Líneas de flujo sobre el ducto lateral del segundo diseño de carrocería de la temporada.

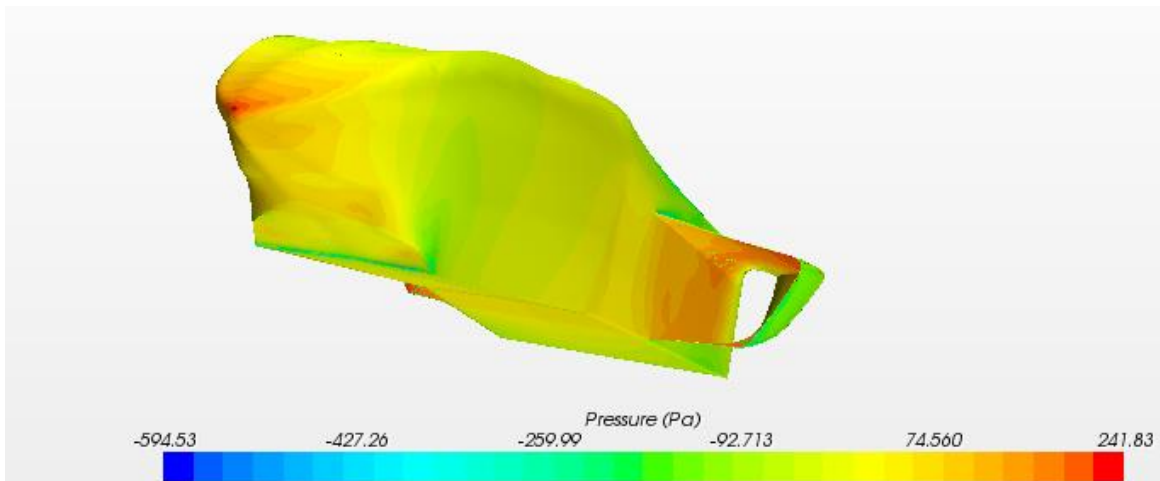
La ventaja de utilizar un software que te proporciona datos numéricos, es que también proporciona elementos visuales que ayudan al entendimiento de lo que sucede con el flujo. Claro que las líneas de flujo de la figura 7.53 dependen de la turbulencia elegida, así como de las condiciones en las cuales se corre la simulación. Dejando eso de lado, lo que las líneas de flujo muestran en la figura 7.53 es que efectivamente el aire disminuye su velocidad. Las líneas de flujo se crearon con su origen a partir del mismo ducto. Y se aprecia como el aire disminuye velocidad e incluso sale desde adentro del ducto hacia arriba. El efecto del grosor de las líneas de flujo hace parecer que el aire empieza desde arriba del ducto pero en realidad el origen de estas líneas es la parte interna del ducto. Con esto, y en combinación con datos numéricos se procede a mejorar este diseño.





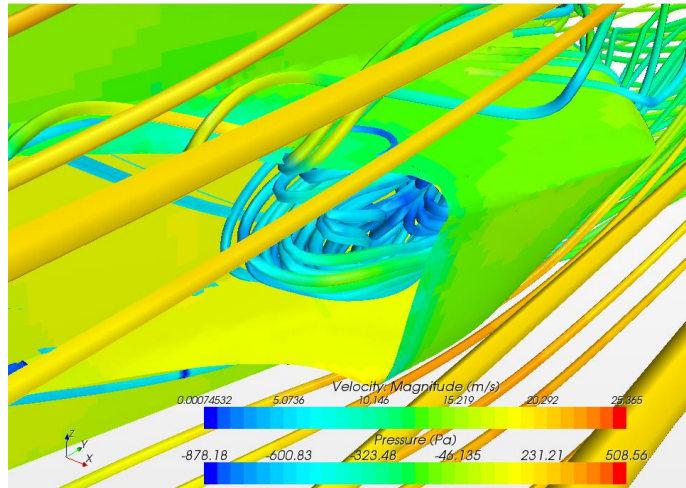
**Figura 7.54** Campo de presiones sobre el tercer diseño de la temporada 2014.

Al incrementar el área transversal en la parte trasera de los ductos y el cambio en la nariz del tercer diseño, figura 7.54, el arrastre disminuyó un 23%. Una vez más se comprueba la importancia de los ductos laterales. Con un coeficiente de arrastre de 0.743 este modelo presenta considerables mejoras con respecto al pasado. Esto en conjunto con lo que se ha comentado de este modelo previamente se continúa iterando.



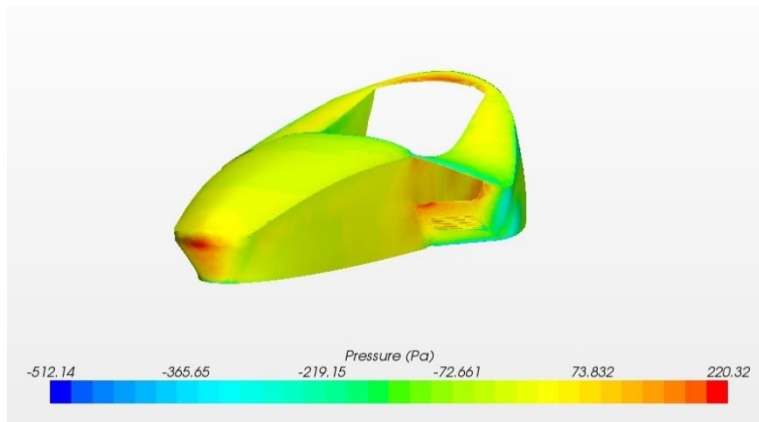
**Figura 7.55** Campo de presiones sobre el cuarto diseño de la carrocería de la temporada 2014.

Los primeros cuatro diseños sirvieron para empezar a desarrollar habilidades de análisis y es importante mencionar que también se desarrolló la integración del equipo. En la figura 7.55 se observa la presión baja que es ocasionada por el incremento de la velocidad en esa parte inferior de la nariz.



**Figura 7.56** Campo de presiones y líneas de flujo sobre el séptimo diseño del ducto lateral 2014.

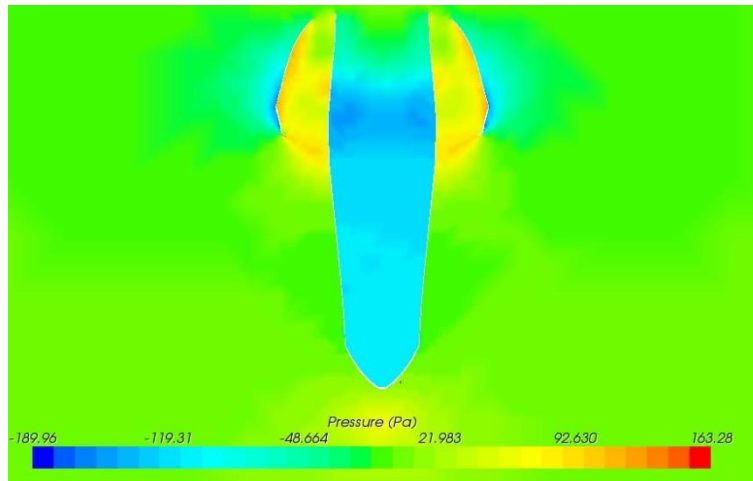
La figura 7.56 muestra una zona de estancamiento dentro del ducto lateral. Esto puede parecer malo y aun así el coeficiente de arrastre de este séptimo diseño es de 0.6093. Como estos modelos se están analizando aislados, los resultados no pueden ser definitivos. Lo que es más, como se trata de cuerpos aislados, se esperaría un resultado mucho mejor al rango del coeficiente de arrastre del diseño final de la temporada 2013. Si los análisis fueran con todos los elementos necesarios del coche, en esos casos los coeficientes de arrastre parecidos a 0.7 serían aceptables. Al tratarse esta etapa de diseño como una etapa de entendimiento y mejora de análisis, una etapa de practicar el diagrama de flujo de la primera parte de este capítulo, entonces se esperan resultados muy por debajo de 0.7.



**Figura 7.57** Campo de presiones sobre la primera carrocería con branquias de la temporada 2014.

Se aprecia una geometría completamente distinta a las primeras en la figura 7.57. Los ductos laterales son algo completamente diferente a los primeros diseños. En esta carrocería como se menciona previamente se quieren probar las branquias. Se piensa por el campo de velocidades que las branquias parecen no cumplir con su objetivo. El objetivo es no tener una zona de

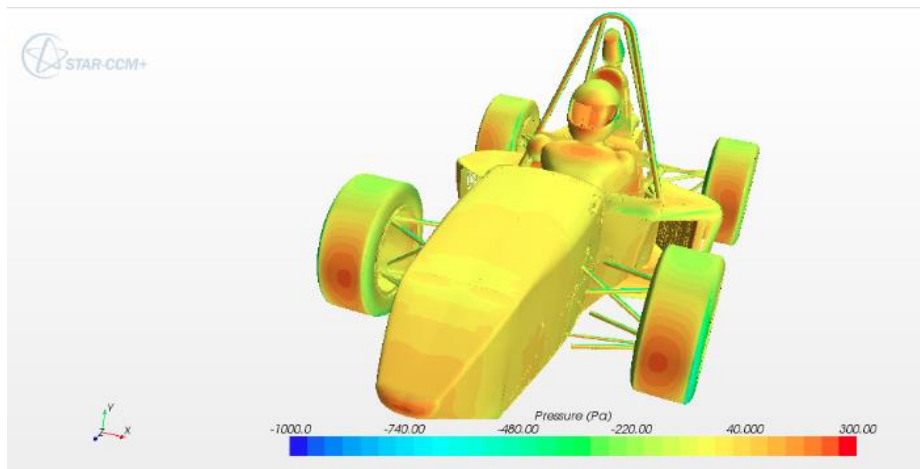
estancamiento y en el plano de velocidades se observan zonas en donde la velocidad es cercana a cero. Ahora bien, para continuar con la evaluación de los ductos se observa el campo de presiones.



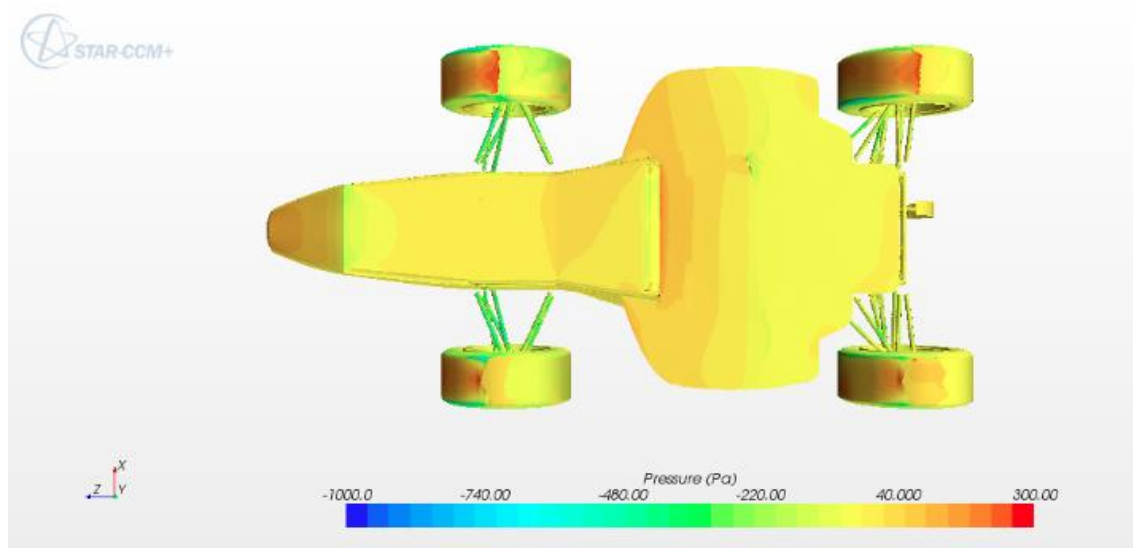
**Figura 7.58** Vista superior del campo de presiones con la carrocería con branquias.

Se observa en la figura 7.58 que efectivamente la presión a la entrada es mayor que a la salida de los ductos. Por lo tanto el diseño de ductos parece ser exitoso. Además, el coeficiente de arrastre de esta carrocería es de 0.047. Es casi 13 veces menor al diseño número siete.

La ventaja de este diseño es que con este cuerpo ya se habla de un coeficiente de arrastre lejano a 0.7 lo cual nos dice que esta carrocería ayudaría al coche a disminuir su coeficiente de arrastre total. Sin embargo, con este diseño el sistema de enfriamiento no cabe dentro de los ductos, el chasis que se entregó después de analizar esta carrocería no es compatible con ésta geometría. Por esa razón los siguientes diseños no retoman esta geometría.

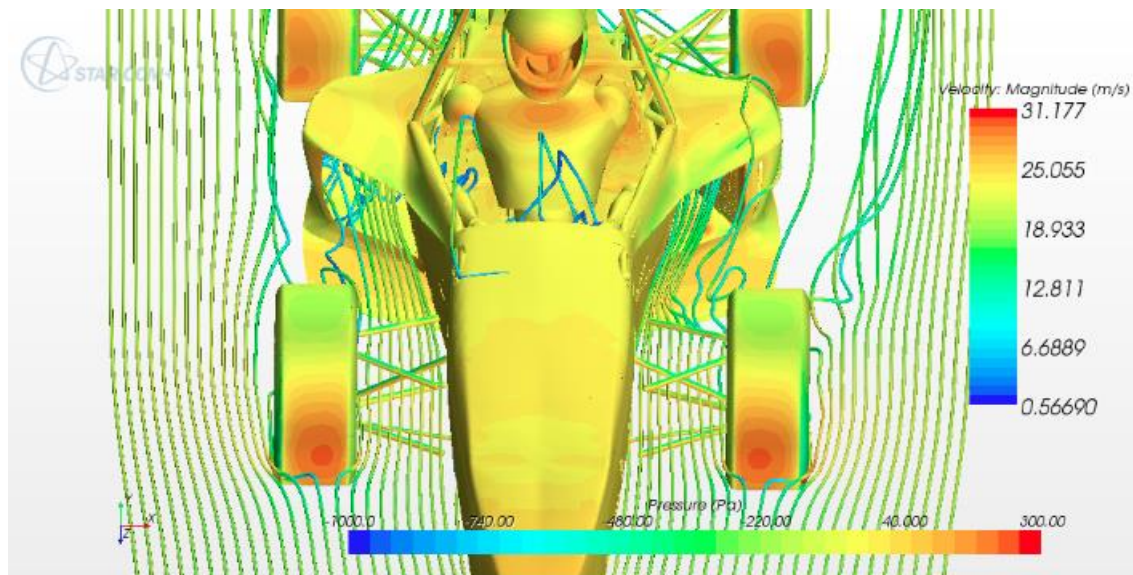


**Figura 7.59** Campo de presiones sobre el coche con el treceavo diseño de carrocería para la temporada 2014.



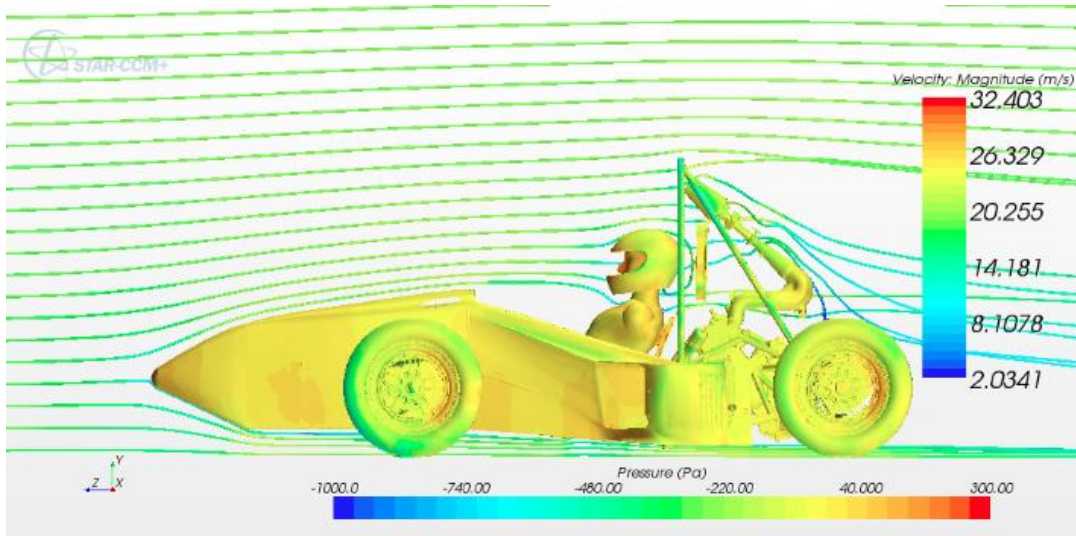
**Figura 7.60** Vista inferior del campo de presiones con el diseño número 13 de carrocería.

La vista del campo de presiones del diseño número trece, figuras 7.59 y 7.60, efectivamente muestra como el piso no genera fuerza de sustentación negativa.



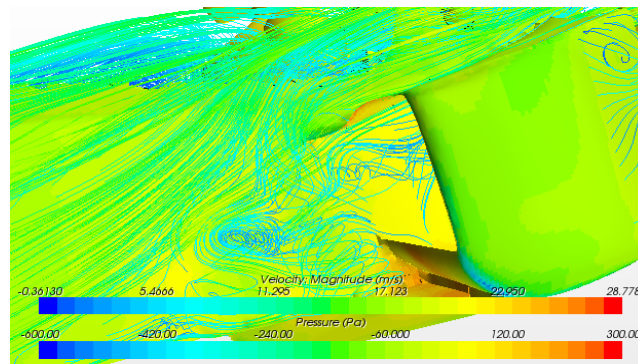
**Figura 7.61** Campo de presiones y líneas de flujo con el coche y la carrocería número trece.

Con un coeficiente de arrastre de 0.84 el equipo cree que la razón de la magnitud del coeficiente se debe a la superficie delantera de los ductos. Quizás no sea esa superficie la única razón, sino la combinación de la superficie frontal y el piso que se tiene debajo de los ductos. En el diseño de la carrocería de las branquias la superficie plana no existía y el coeficiente de arrastre fue bajo.



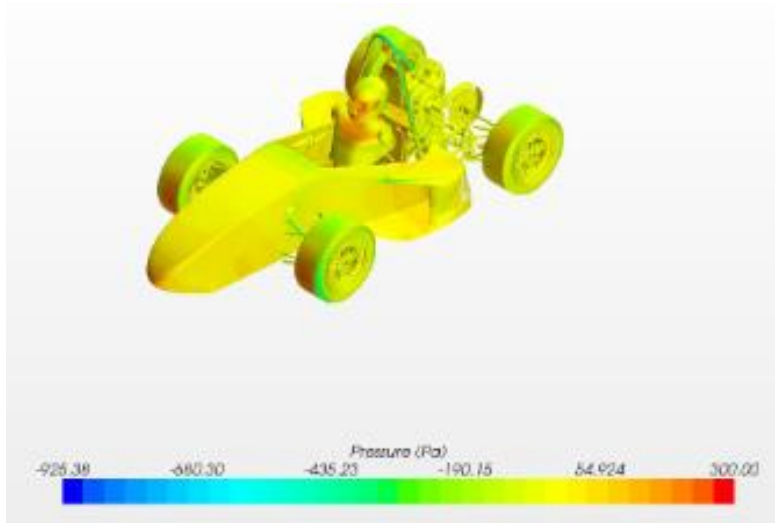
**Figura 7.62** Vista lateral del campo de presiones y líneas de flujo sobre el coche con el treceavo diseño de carrocería 2014.

La combinación entre ductos laterales con superficie frontal y un piso plano se da en más de un diseño. En la figura 7.63 se observan líneas de flujo con el diseño número catorce. En la figura se observa como el flujo tiene un comportamiento discontinuo a la entrada del ducto. En los planos superiores de velocidad se ven las afectaciones por este comportamiento que puede ser el incremento de la distancia lateral del flujo turbulento lo que ocasiona arrastre.



**Figura 7.63** Campo de presiones y líneas de flujo con el catorceavo diseño de carrocería 2014.





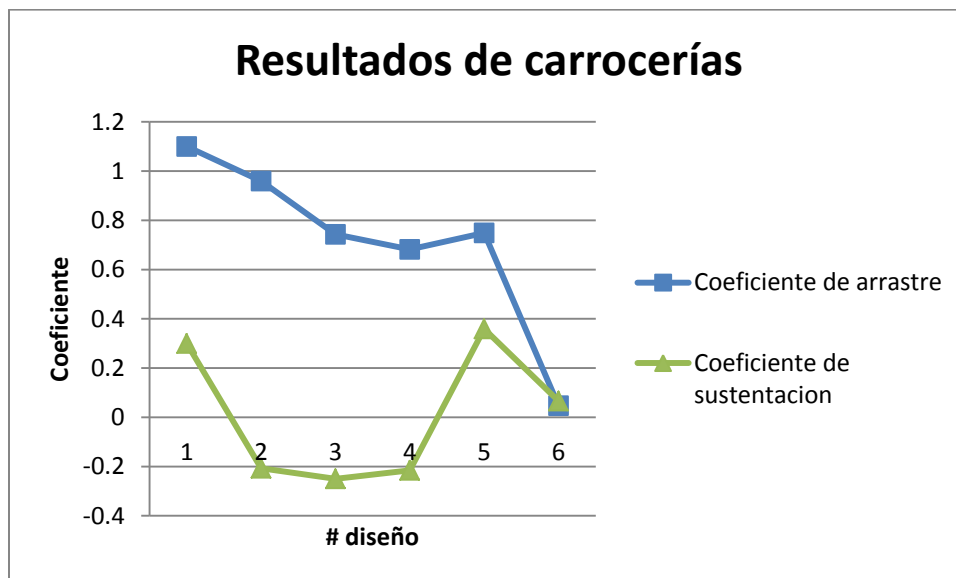
**Figura 7.64** Campo de presiones sobre el coche con el diseño final de carrocería 2014.

La figura 7.64 muestra el campo de presiones sobre la carrocería. Esta muestra un patrón conocido visto anteriormente presión alta en las llantas delanteras, en el piloto y en la nariz.

Esta carrocería tiene un coeficiente de arrastre de 0.779 y un coeficiente de sustentación de 0.09. Esta carrocería presenta los mejores resultados de la temporada cumpliendo con todas las normas y con curvas suaves y posibles para una manufactura sencilla.

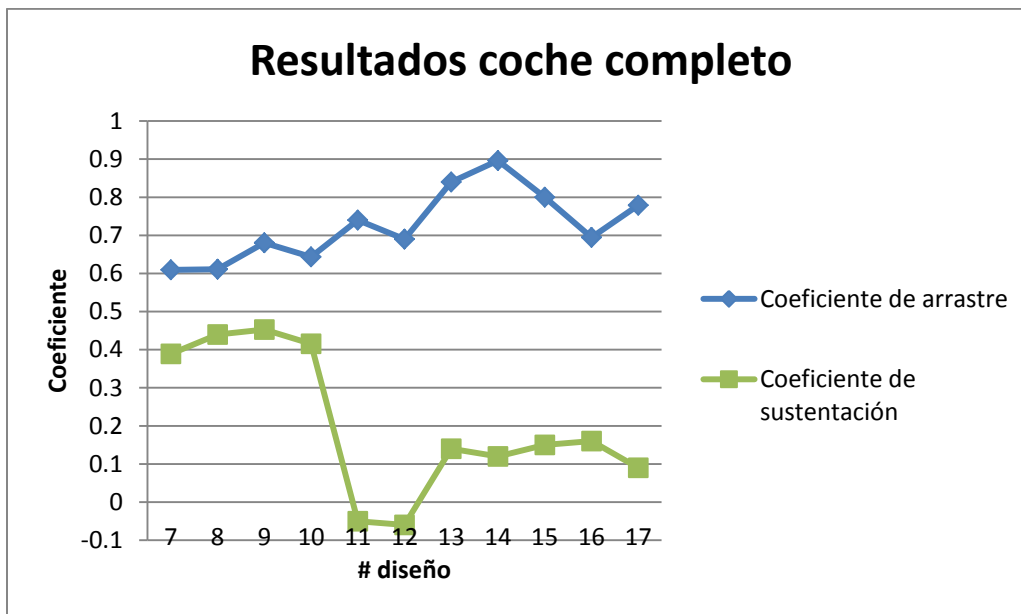
### 7.6 Resumen temporada 2014

En esta sección se presentan datos de coeficientes resumidos en gráficas para el mejor entendimiento de lo que fue la temporada 2014.



**Figura 7.65** Coeficientes de carrocerías de la temporada 2014 [ $Re=1.6 \times 10^6$ ].

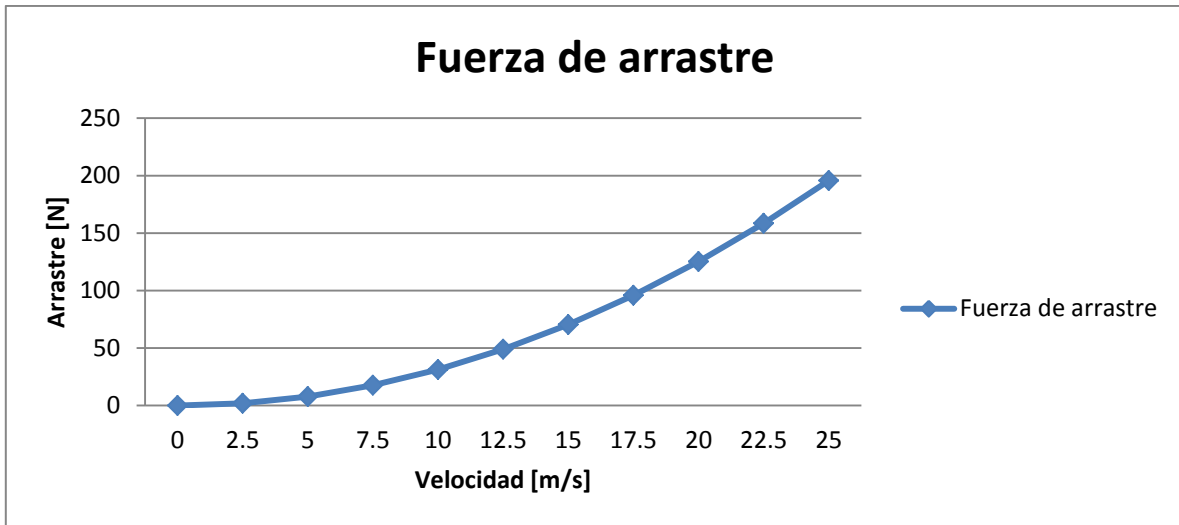
La figura 7.65 muestra la evolución de los coeficientes de arrastre de las distintas carrocerías. Lo más notable es el desplome del coeficiente de arrastre con la carrocería número 6. El sexto diseño en la gráfica es el primer diseño de una carrocería con branquias. Ese estilo que se presentó con esa carrocería cumplió con el objetivo de tener geometrías con un bajo coeficiente de arrastre. En la figura existe una tendencia a que el coeficiente de arrastre disminuya desde el primer diseño. Esto a diferencia de la figura 7.66 donde existe primeramente una tendencia a incrementar el coeficiente de arrastre para después empezar a disminuir.



**Figura 7.66** Coeficientes de arrastre y sustentación del coche completo con distintos modelos de carrocerías diseños de la temporada 2014 [ $Re=1.6 \times 10^6$ ].

La figura 7.66 muestra un comportamiento interesante. Hasta el diseño número 14 se observa una tendencia a incrementar el coeficiente de arrastre. Esto se da porque el diseño final se encuentra sujeto a factores y decisiones de otros sistemas. En el momento en que menos información se tiene (primeros diseños) se puede pensar que los resultados obtenidos son satisfactorios. Sin embargo, es necesario tener la mayor cantidad de información para evitar pérdidas de dinero y cambios que terminen afectando el desempeño del sistema. Es decir, en los primeros análisis con el coche completo no se tenía un diseño final del sistema de enfriamiento y debido a esto los ductos laterales podían ser más pequeños logrando un menor arrastre. Además, desde el diseño número 14 se cambia el patrón y el coeficiente de arrastre empieza a disminuir.

Se logra una disminución del coeficiente debido a que desde ese diseño se realizan cambios específicos sin que nada cambie además de la carrocería. Los sistemas de enfriamiento, escape, chasis y suspensión ya son definitivos. Esto permite mejorar de manera significativa los resultados. Con el diseño número 16 se vuelve a recalcar la importancia de una buena comunicación. En el diseño dieciséis no entraba en atenuador de impactos por lo que la nariz se rediseñó terminando finalmente con el diseño número diecisiete.



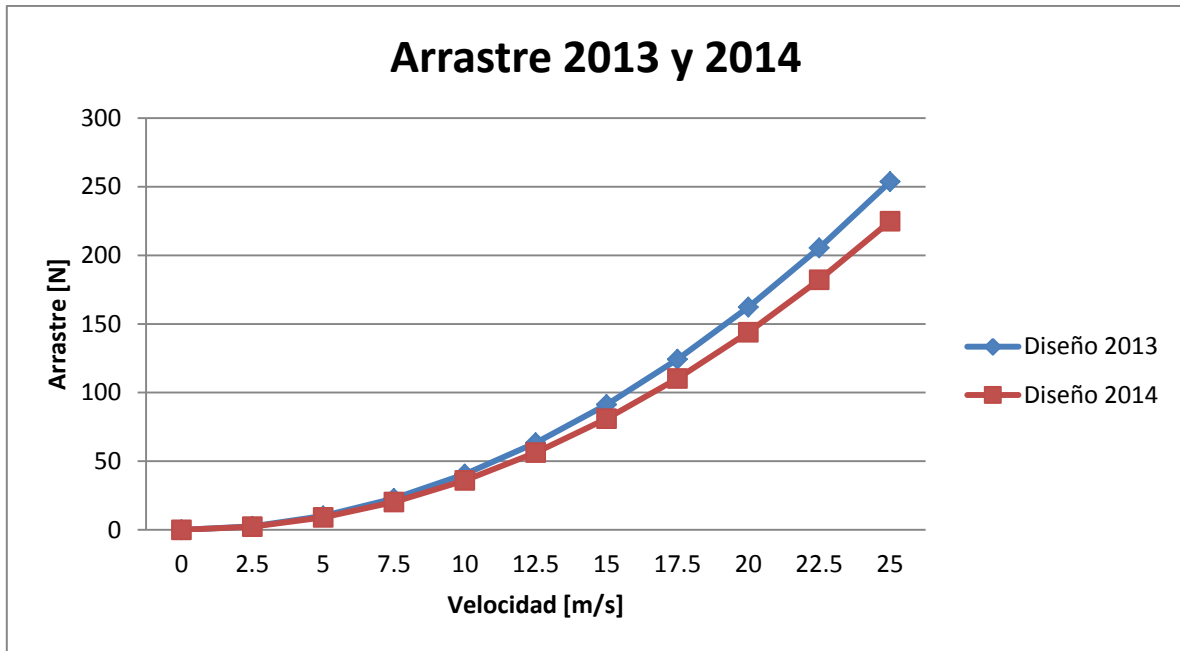
**Figura 7.67** Gráfica de la fuerza de arrastre a distintas velocidades para el diseño final del coche 2014 [Se calculó con la ecuación (2.2)].

La gráfica de la figura 7.67 muestra la fuerza de arrastre para el diseño final de la carrocería 2014. Al igual que en el capítulo seis la importancia del arrastre depende del comportamiento general del coche. Lo interesante de esta gráfica es que si se comparan los coeficientes de arrastre del diseño 2014 y del diseño 2013 se observa como el coeficiente del 2013 es un 0.2% menor que el del 2014. Tener el mismo coeficiente de arrastre no significa tener la misma fuerza de arrastre a las mismas velocidades.

Se explicó el arrastre en capítulos anteriores y la fórmula matemática que define el arrastre tiene varios factores. Entre ellos el área frontal es importante ya que si dos coches con el mismo coeficiente y las mismas condiciones atmosféricas estuvieran corriendo a la misma velocidad. El área frontal sería el elemento definitivo para ver cuál produce menos fuerza de arrastre.

No porque dos coches tienen el mismo coeficiente de arrastre tendrán la misma fuerza de arrastre. En ese caso el área frontal es el factor que importa más. En la figura 7.68 se observa como a pesar de que dos diseños de distintas temporadas tienen casi el mismo coeficiente de arrastre, estos generan diferentes fuerzas de arrastre a las mismas velocidades.





**Figura 7.68** Comparación de las fuerzas de arrastre entre el diseño del coche de las temporadas 2013 y 2014.

Diseño #	Coefficiente de arrastre total	Coefficiente de sustentación
17	0.779	0.09

Densidad del aire [kg/m <sup>3</sup> ]	1.2
Velocidad de referencia [m/s]	20
Área de referencia[m <sup>2</sup> ]	0.77
Fuerza de arrastre (20 m/s) [N]	139

**Física de la simulación:**

- Densidad constante
- Estado permanente
- Flujo turbulento
- Turbulencia k-Omega



**Figura 7.69** CAD final del coche de la temporada 2014.

Para la manufactura se utilizaron moldes maquinados con fresa CNC. Estos fueron pegados para armar los moldes y después se aplicó un proceso de infusión. Los materiales son fibra de vidrio y fibra de aramida.

Para mejorar el proceso se tomaron medidas de masa para la combinación de componente A y B para la resina y su catalizador. Se realizó esto para tener un control ya que en la temporada anterior no se tuvo un control o medición sobre la cantidad de catalizador o de resina utilizada, figura 7.70.

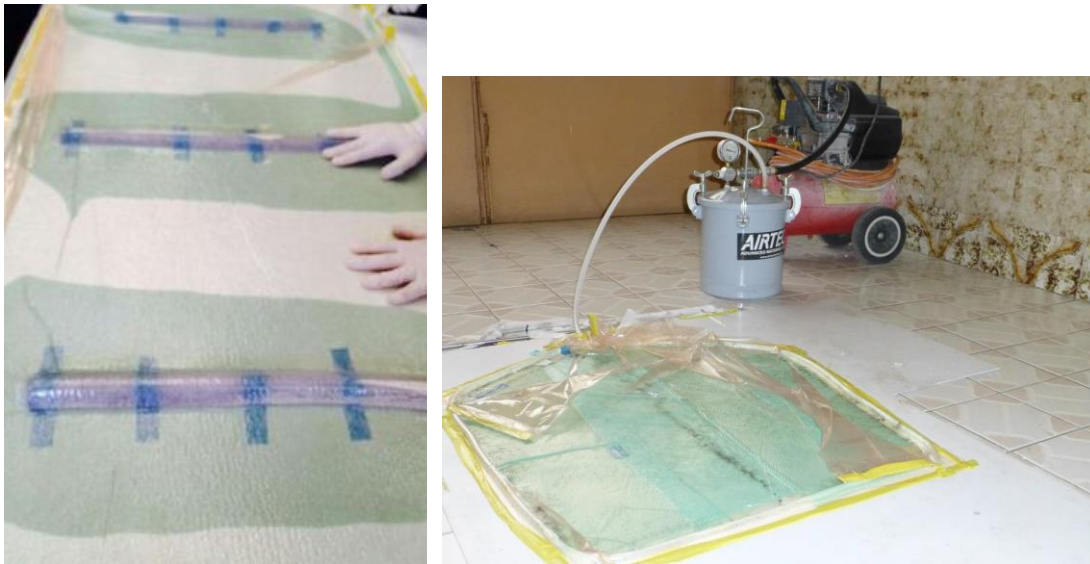


**Figura 7.70** Equipo 2014 tomando medidas de resina para manufactura con fibra de aramida.



**Figura 7.71** Corte laser de la fibra de aramida para la temporada 2014.

Como se observa en la figura 7.71 el corte laser se utilizó para tener mayor precisión en cuanto a las capas de fibra que se utilizan y además, se utiliza un patrón de zigzag para evitar que se deshilache la fibra (lo cual si funcionó). El proceso de infusión permitió disminuir el peso de la carrocería en un 41%, figura 7.72.



**Figura 7.72** Proceso de infusión sobre un plano para el piso de la carrocería (izquierda) y para el piso de los ductos laterales (derecha) de la carrocería 2014.

Pieza	cantidad	Peso [g]
<b>Nariz</b>	1	2150
<b>Lateral izquierda</b>	1	1417
<b>Lateral derecha</b>	1	1423
<b>Side pod izquierdo</b>	1	692
<b>Side pod derecho</b>	1	695



**Figura 7.73** Coche número 51 participante de la competencia 2014 durante una presentación con patrocinadores.



**Figura 7.74** Coche durante la competencia en Lincoln Nebraska 2014.

Peso Total Final (después de pintura) [kg]
--

<b>6.377</b>
--------------

“Peleando no se consigue jamás lo suficiente, pero cediendo se consigue más de lo que se espera”

—Proverbio Antiguo

## Capítulo 8 Conclusiones y Recomendaciones

Este capítulo presentará conclusiones del trabajo con algunos ejemplos del porqué de la conclusión, así como recomendaciones para la persona interesada en diseñar una carrocería para un coche tipo formula. Se presenta también un repaso de lo que es el trabajo y como seguir desarrollándolo.

El trabajo fue analizado y desarrollado en dos temporadas anuales consecutivas. Se dio una idea del trabajo previo como equipo que se tenía en cuanto al sistema de carrocería y aerodinámica que van de la mano, y con base en esa información se procedió al diseño de las carrocerías 2013 y 2014.

El entendimiento de los conceptos de la mecánica de fluidos dependerá no solo de la persona que lea este trabajo sino que dependerá de que tanto profundice en los temas de interés. Los primeros capítulos de este trabajo son recopilaciones de las referencias mencionadas por lo que en todo momento se puede ahondar más en cada tema.

Lo fundamental de un trabajo como el presente es que la teoría es importante para poder desarrollar un diseño de cualquier tipo. La teoría mencionada es solo la superficie de lo que realmente implica el análisis de flujo externo de un coche tipo formula. Sin embargo, con las bases de este trabajo se puede empezar a interpretar un análisis de cualquier flujo externo de cualquier cuerpo.

Se obtuvieron coeficientes adimensionales con la ayuda de programas de fluidos computacionales. Con estos se analizó el desempeño de la aerodinámica de un coche de competición. Los coeficientes de arrastre obtenidos de alrededor de 0.7 fueron un resultado que se encuentra dentro del rango de resultados para un coche que no quiere generar arrastre. En la gráfica de la figura 7.68 se observa el valor en Newtons que el arrastre genera a distintas velocidades. Como sistema es importante concluir que 100 Newtons no influyen de manera significativa en el comportamiento del coche de los años 2013 y 2014.

El coche pesa alrededor de 214 kg y en un balance de fuerzas muy simple para mover un cuerpo de ese peso se requiere una fuerza igual al peso multiplicado por el coeficiente de fricción entre el cuerpo y el suelo. Suponiendo un coeficiente de 0.8 (coeficiente de fricción alto debido a que para llantas lisas el coeficiente debe ser elevado) entonces, la fuerza necesaria mínima para empezar a mover el cuerpo sería de 1680 N. Esto quiere decir que 100 N significaría incrementar esta fuerza ya que la fuerza de arrastre se opone al movimiento del coche. Por lo tanto los 100 N significan un incremento del 6% en cuanto a fuerza mínima para rodar.

Esto es positivo para el coche ya que como objetivo se fijó disminuir el arrastre creado. Por esto, tener una carga de esa magnitud a velocidades como 20 m/s es lo que se quiere. Se cumplió con el objetivo de obtener un arrastre mínimo en ambas temporadas siendo la del 2014 mejor que la del 2013. Claro que estos coeficientes fueron realizados con programas de fluidos computacionales y



es por ello que es importante entender que el verificar si tu simulación es válida será el siguiente paso para las personas interesadas.

En ambas temporadas la importancia de los ductos laterales se recalcó a través de la evolución de los diseños. De la temporada 2014 se rescata la disminución de arrastre y no necesariamente a costa del incremento del área y tamaño de los ductos. Un paquete aerodinámico más grande no significa un mejor paquete aerodinámico.

De las observaciones más importantes en cuanto a interpretación de resultados de las simulaciones es que se debe tener idea de la teoría para poder corregir o proponer mejores diseños. En la figura 6.10 se observa la zona de alta presión debido al plano perpendicular al flujo de aire. Esto se puede encontrar en la teoría. Un plano perpendicular al flujo es causa de arrastre. Sin embargo, no todo se encuentra en la literatura. No obstante, la cantidad de información que se puede encontrar es amplia y servirá para encontrar casi cualquier situación.

Es complicado encontrar la causa de fenómenos físicos, especialmente cuando no se tienen fundamentos teóricos. No obstante, haciendo un correcto uso del programa computacional se tendrá una mejor idea y se podrán tomar decisiones no solo para mejorar el diseño en números dentro del programa sino fuera de este, en el modelo real. Mediante pruebas físicas se debe validar cualquier simulación. Y de no ser así, ya sea por recursos de tiempo o dinero, se debe saber interpretar una simulación y se debe saber que se tendrá cierto margen de error en cuanto a la realidad.

Se comprobó cómo una correcta simulación es importante para tener resultados cercanos a la realidad. Claro que para realmente corroborar esto es necesario validar físicamente, mientras tanto se comparan resultados de coeficientes con resultados de otros equipos. El incluir o no el intercambiador de calor puede hacer variar los resultados como se vio en la temporada 2013 en dos diseños (el 10 y el 11). Estos resultados son inválidos para la competencia. De la misma manera una prueba física sin todos los componentes no tendría validez para la competencia.

El realizar análisis de carrocerías sin que el coche esté completo sirve para mejorar el entendimiento del flujo externo de los cuerpos, sirve para tener práctica utilizando un programa, sirve para intentar cambios de geometría atrevidos. La etapa en la que se analiza un coche incompleto es importante en la etapa de diseño para probar diferentes conceptos. Esto no quiere decir que en la etapa de análisis con el coche completo ya no se prueben cosas atrevidas. Sin embargo, los cambios deben tener objetivos claros y específicos. Por ejemplo, se debe cambiar una línea para evitar el desprendimiento de la capa límite o se debe modificar cierta curva para evitar el estancamiento dentro del ducto.

Se comprobó que aunque en los campos de presión y velocidades se muestren fenómenos que podrían parecer negativos, no es sino hasta que se tienen números que se puede calificar si ese fenómeno es positivo o negativo. Es importante el analizar porqué algunas simulaciones resultan con mejores coeficientes. Se tiene que cuidar que el área frontal sea tomada en cuenta adecuadamente y que el coeficiente de arrastre sea el coeficiente total.

Se corroboró cierta relación entre el arrastre y la estela detrás del coche. Al disminuir la zona de baja energía detrás del coche el coeficiente de arrastre disminuye. En temporada 2013 se menciona como los ductos laterales dirigen el aire hacia atrás del coche de una forma la cual disminuye el coeficiente de arrastre. El flujo de los ductos laterales le permite al flujo mantener energía en la parte trasera del coche disminuyendo el arrastre. Y se vuelve a hacer hincapié en que el tamaño no necesariamente tiene que ser mayor para obtener mejores resultados.

Existen opciones dentro de los programas de fluidos que no se conocen y pueden ser útiles. Por ejemplo, existe una opción dentro del programa utilizado para mostrar gráficamente los coeficientes de presiones. De haber sabido esto previamente, esto podría haber sido de ayuda para la interpretación de los resultados. Sin embargo, como se conoce la teoría, ésta puede ser utilizada para determinar ciertos coeficientes de presión. Lo que significa que no se necesitan programas avanzados para mejorar un diseño.

Lo ideal es combinar simulaciones con la validación del diseño en pruebas físicas. Toda pieza de ingeniería debe ser validada ya que como se menciona en el capítulo 6 y 7, la manufactura puede cambiar algunos aspectos del diseño original haciendo que los resultados sean diferentes a los planeados.

Se observaron vórtices en algunas simulaciones los cuales mejoraron los resultados de la carrocería. No se estableció como objetivo el diseñar pensando en generar vórtices, lo cual se piensa que con respecto a eso existe un área de oportunidad que puede ser implementada en la siguiente temporada. La única observación es que si en una simulación se presenta un fenómeno físico, es recomendable pensar que sucede con ese fenómeno cuando esa parte de la carrocería se encuentra vibrando. Esto porque como se observa en las imágenes de los coches reales (6.41 y 7.73) la carrocería junto con los ductos laterales puede vibrar en cualquier momento. Solo de pensar que las vibraciones afectan todos los componentes del coche sería ingenuo creer que la carrocería o sus componentes no lo harán. De ahí la importancia de las sujeciones. Este trabajo no abarca el tema de las sujeciones y no por eso no reconoce que la importancia de las sujeciones de la carrocería al chasis es alta. Especialmente porque si se diseña un elemento aerodinámico que produce carga de sustentación, las sujeciones tienen que transferir la carga adecuadamente a las llantas.

En cuanto al mallado no se tuvieron problemas para correr simulaciones. Se recomienda realizar un análisis del número de celdas el cual se realizó para la temporada 2014 y no para la temporada 2013. Este análisis puede ahorrar tiempo de análisis y esto brinda la posibilidad de acelerar el proceso de análisis y rediseño.

El comparar configuraciones como lo que se hizo con el múltiple de escape hacia adelante o hacia atrás brinda mayor seguridad a la hora de justificar un diseño ante los jueces. Se recomienda realizar comparaciones como filosofía de diseño.

Como objetivo, el generar carga de sustentación negativa no se cumplió. Esto debido a varios factores. Uno de los factores es que no se desarrollaron las sujeciones adecuadas para la



transferencia de carga. Otro factor que parece no ser de importancia y aun así sí lo fue, es el factor humano. En la temporada 2014 el equipo del sistema estaba integrado por personas nuevas lo que significó que esa era su primera temporada. Al ser una primera temporada los nuevos integrantes tienen que desarrollar su aprendizaje con respecto al sistema y al proyecto. De todos los integrantes solo existieron dos integrantes con cierta experiencia. Al tomar esto en cuenta se decidió invertir más tiempo en los nuevos integrantes que en el desarrollo de un paquete aerodinámico capaz de generar sustentación negativa. Se creyó de mayor importancia el invertir en las personas que en una pieza física. Esto no significa que por no desarrollar sustentación negativa, el equipo no obtuvo buenos resultados. El peso disminuyó y la fuerza de arrastre también. Se comprobó la importancia de los ductos laterales y se logró una integración del sistema de aerodinámica.

Se recomienda establecer objetivos de acuerdo a número de personas que se tenga el sistema y de acuerdo a la experiencia de las personas conformando el sistema. Se recomienda definir bien el tiempo de diseño y de manufactura tomando en cuenta mínimo un mes para las pruebas. Se debe establecer el concepto del coche completo antes de empezar a diseñar o a dibujar. Como se mencionó en el capítulo 7 el concepto debe incluir la mayor cantidad de detalles posible. Al tener estos detalles cubiertos el diseño se volverá más sencillo. La parte complicada se encuentra en terminar el concepto.

En cuanto a simulaciones se recomienda realizar análisis con distintos ángulos del coche con respecto a la corriente de aire. Esto debido a que el lugar donde la competencia se lleva a cabo es un espacio abierto donde las corrientes de aire pueden afectar el desempeño aerodinámico del coche. De igual manera si se pudiera realizar una comparación entre la carrocería en negativo como un modelo sustraído del túnel de viento y un modelo completo como el utilizado en este trabajo sería bueno para verificar cual es más rápido y verificar también los resultados obtenidos. La simulación debe correrse a distintas velocidades una vez teniendo el modelo final para comparar esos resultados con el modelo de la ecuación (2.2).

Se recomienda validar el diseño con pruebas físicas ya sea con una prueba de frenado o con pruebas dentro de un túnel de viento. Las pruebas físicas deben comenzar a ser parte del tiempo programado dentro de la planeación de la temporada. Deben ser tan importantes como el presupuesto del sistema.

Se vuelve a hacer hincapié en el desarrollo del equipo a la par del desarrollo del sistema. Al final la inversión en las personas brindará posibilidades para crear un mejor sistema.

“Las deficiencias de este trabajo serán las fortalezas del siguiente”

—Julio César Pérez Aguilar

## Referencias

- [1] John Anderson Jr., Fundamentals of aerodynamics, second edition, Mc Graw hill, USA
- [2] F. Milliken, L. Milliken, Race Car Vehicle Dynamics, Twelfth printing, SAE, USA
- [3] Joseph Katz, Race Car Aerodynamics, Designing for speed, Bently Publishers, USA
- [4] Race car aerodynamics, Royal institute of technology, Stockholm, Tatuus Racing
- [5] Talay, T. A., Introduction to the Aerodynamics of Flight, NASA SP-367, 1975
- [6] Karl Jensen, "Aerodynamic Undertray Design for Formula SAE", Thesis for Masters at Oregon State University, 2010
- [7] Joseph Katz, "Aerodynamics of Race Cars", Department of Aerospace Engineering, San Diego State University, San Diego, California
- [8] McBeath, S., "Competition Car Aerodynamics", Haynes Publishing, California, ISBN 978-1-84425-230-5, 2006.
- [9] Robert L. Mott, Applied Fluid Mechanics, 6th Edition, Prentice Hall Publishing Co.
- [10] Andersson Bengt, Andersson Ronnie, Hakansson Love, Mortenses Mikael, Sudiyo Rahman, van Wachem Berend, "Computational Fluid Dynamics", Cambridge, UK, Cambridge university press, 2012
- [11] User Guide STAR-CCM+ Versión 8.06.2013
- [12] CD-adapco, CFD Basics, Americas Agency Training Document, 2008
- [13] Kynan Maley, South East Asia Conference, Best Practices: Volume meshing, 2012
- [14] Hinze, J. O., "Turbulence", 1975, Nueva York, McGraw Hill.
- [15] Tennekes, H. y J. L. Lumley, "A first Course in Turbulence", 1972, Cambridge, MA:MIT Press
- [16] Wilcox, D.C., "Turbulence Modeling for CFD", 2000, La Cañada, California:DCW Industries
- [17] <http://www.unammotorsports.com/>
- [18] [http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2015-16\\_fsae\\_rules.pdf](http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2015-16_fsae_rules.pdf)
- [19] Reporte de temporada 2011, Unammotorsports

- [20] Enrique Scalabróni, Timoteo Briet y Roberto Pravata, "Análisis Técnico: Difusores, flexión de las piezas y otras formas de sumar carga aerodinámica", 2013
- [21] Unam motorsports, Design Event document for frame, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2013
- [22] Unam motorsports, Design Event document for aerodynamics, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2013
- [23] <http://www.fsae.com/forums/forumdisplay.php?45-Open-FSAE-Discussion>
- [24] <http://www.fsae.com/forums/archive/index.php/t-5591.html?s=2f4ac3793225a1cc9fb6f05198249449>
- [25] <http://www.fsae.com/forums/showthread.php?1948-WINGS&highlight=aero>
- [26] <http://blender.stackexchange.com/questions/7910/what-is-non-manifold-geometry>
- [27] <http://www.optimumg.com/company/lead-engineers/>
- [28] Unam motorsports, Design Report, UNAM, 2013
- [29] Theory of flight, Richard Von Mises, Dover publications, 1994
- [30] Rainald Löhner, Applied CFD Techniques, An introduction based on Finite Element Methods, WILEY, second edition
- [31] Steve J. Martin, Noah J. Goldstein and Robert B. Caildini, The small Big, Profile Books LTD, 2014