



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

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

**“ANÁLISIS COMPARATIVO DE CARGAS AERODINÁMICAS DEL
VEHÍCULO FÓRMULA STUDENT CON EL USO DE DIGITALIZACIÓN
3D”**



AUTOR: Wilson Geovanny Egas Meneses

DIRECTOR: Ing. Erik Paúl Hernández Rueda MSc.

Ibarra-Ecuador

2025

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA**

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	DE	1004294763	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Y	Egas Meneses Wilson Geovanny	
DIRECCIÓN:	Av. Miguel Ángel de la Fuente y Panamericana, Atuntaqui - Ecuador		
EMAIL:	wgegasm@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	06-2535353	TELF. MOVIL	0991636231

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	ANÁLISIS COMPARATIVO DE CARGAS AERODINÁMICAS DEL VEHÍCULO FÓRMULA STUDENT CON EL USO DE DIGITALIZACIÓN 3D.
AUTOR:	Egas Meneses Wilson Geovanny
FECHA:	2025/04/15
SOLO PARA TRABAJOS DE TITULACIÓN	
CARRERA/PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> GRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERÍA AUTOMOTRIZ
DIRECTOR:	Ing. Erik Paúl Hernández Rueda MSc.

AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, Wilson Geovanny Egas Meneses, con cédula de identidad Nro. 1004294763, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de integración curricular descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

Ibarra, a los 22 días del mes de abril de 2025

EL AUTOR:

Firma.....

Nombre: Wilson Geovanny Egas Meneses

CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 22 días del mes de abril de 2025

EL AUTOR:



Firma.....

Nombre: Wilson Geovanny Egas Meneses

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 15 de abril de 2025

Ing. Erik Paúl Hernández Rueda MSc.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f) 
Ing. Erik Paúl Hernández Rueda MSc.
C.C.: 1002978060

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “Análisis comparativo de cargas aerodinámicas del vehículo fórmula Student con el uso de digitalización 3D” elaborado por Egas Meneses Wilson Geovanny, previo a la obtención del título del Ingeniero Automotriz, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

(f): .....
Ing. Erik Paúl Hernández Rueda MSc.
C.C.: 1002978060

(f): .....
Ing. Jorge Luis Melo Obando MSc.
C.C.: 1718346529

DEDICATORIA

El presente estudio es dedicado a mi familia quienes siempre me apoyaron y aconsejaron en las decisiones que he tomado en mi vida, su presencia y las palabras de aliento siempre serán el impulso para culminar diferentes etapas desafiantes, el sacrificio y espera durante este largo proceso académico marcado por innumerables horas de dedicación y esfuerzo culminan gracias a la comprensión y apoyo inquebrantable que me permitió perseverar.

Para las futuras generaciones espero que esta investigación sirva como punto de partida para nuevas exploraciones y contribuciones investigativas, desarrollando soluciones innovadoras que beneficien a la sociedad.

Wilson Geovanny Egas Meneses

AGRADECIMIENTO

A mi madre y padre, Norma Meneses y Oswaldo Egas les agradezco por ser mi constante fuente de inspiración y fortaleza, sus incontables sacrificios y apoyo incondicional han sido el impulso fundamental para cada uno de mis pasos en esta vida, los días y noches en vela dedicados al estudio de esta investigación fueron soportados gracias a su ejemplo de perseveración y constante motivación.

Mi hermano, Luis Egas apoyo importante, compañero y amigo incondicional, agradezco nuestras conversaciones, los ánimos positivos en momentos complicados y las alegrías genuinas que hemos tenido, es importante para mí saber que contar contigo ha hecho este viaje mucho más llevadero.

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi tutor de tesis, MSc Paúl Hernández, por su guía académica, su paciencia y dedicación durante todo este proceso de investigación, su acertada dirección fue fundamental para el desarrollo y culminación de este trabajo. Asimismo, agradezco a mi asesor de tesis, MSc Jorge Melo, por su aporte y apoyo constante.

Wilson Geovanny Egas Meneses

RESUMEN

EL presente estudio fundamentado en la necesidad de optimizar el rendimiento aerodinámico en vehículos fórmula *Student* presenta un análisis comparativo de cargas aerodinámicas mediante digitalización 3D, a través de los modelos digitales resultantes se identificaron áreas de mejora, el proceso de digitalización 3D permitió un análisis preciso y detallado facilitando la implementación de modificaciones geométricas e incorporación de dispositivos aerodinámicos seguido del análisis y comparación de datos, los hallazgos obtenidos ofrecen un aporte significativo para el diseño aerodinámico de vehículos de competición contribuyendo al rendimiento y optimización de vehículos fórmula *Student*, se presenta el cómo ajustes geométricos influyen de manera significativa en la aerodinámica, el coeficiente de sustentación al final de la investigación incrementó de $-0,16$ a $-1,05$ favoreciendo notablemente a la sustentación negativa en un 707%, no obstante, incorporar dispositivos aerodinámicos aumenta el área frontal del vehículo lo que resulta en un incremento de la resistencia aerodinámica. Este aumento desfavorable limita la velocidad, incrementa el consumo de combustible y compromete la estabilidad del vehículo. Por lo tanto, se subraya la importancia de encontrar un balance entre el coeficiente de arrastre y el coeficiente de sustentación, para ello, mediante el cálculo de la eficiencia aerodinámica se diseñan perfiles alares que no excedan el ángulo de ataque permitiendo elevar notablemente la carga aerodinámica sin generar un aumento significativo de la resistencia aerodinámica.

Palabras clave: Aerodinámica, sustentación negativa, eficiencia aerodinámica, digitalización 3D, CAD/CAE, CFD.

ABSTRACT

This study based on the need to optimize the aerodynamic performance of Formula Student vehicles presents a comparative analysis of aerodynamic loads through 3D scanning, through the resulting digital models areas for improvement were identified, the 3D scanning process allowed an accurate and detailed analysis facilitating the implementation of geometric modifications and incorporation of aerodynamic devices followed by data analysis and comparison, The findings obtained offer a significant contribution to the aerodynamic design of competition vehicles contributing to the performance and optimization of Formula Student vehicles, it is presented how geometric adjustments significantly influence aerodynamics, the lift coefficient at the end of the research increased from -0.16 to -1.05 favoring significantly the negative lift by 707%, however, incorporating aerodynamic devices increases the frontal area of the vehicle resulting in an increase in aerodynamic drag. This unfavorable increase limits speed, increases fuel consumption and compromises vehicle stability. Therefore, the importance of finding a balance between the drag coefficient and the lift coefficient is emphasized. For this purpose, by calculating the aerodynamic efficiency, airfoils are designed that do not exceed the angle of attack allowing a significant increase in the aerodynamic load without generating a significant increase in the aerodynamic drag.

Keywords: Aerodynamics, negative lift, aerodynamic efficiency, 3D scanning, CAD/CAE, CFD.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I	20
1 INTRODUCCIÓN	20
1.1 Problema de Investigación.....	20
1.2 Objetivos.....	21
1.3 Formulación del Problema de Investigación.....	22
1.4 Justificación	22
CAPÍTULO II.....	24
2 MARCO TEÓRICO.....	24
2.1 Antecedentes	24
2.2 Introducción a la Aerodinámica de Vehículos Fórmula	25
2.3 Ecuaciones y Principios Aerodinámicos.....	27
2.3.1 Resistencia Aerodinámica.....	27
2.3.2 Carga Aerodinámica	28
2.3.3 Coeficientes Aerodinámicos	28
2.3.4 Eficiencia Aerodinámica.....	29
2.3.5 Número de Mach.....	29
2.3.6 Número de Reynolds.....	30
2.3.7 Flujo Incompresible	31
2.3.8 Flujo Compresible.....	31
2.3.9 Ecuación de Continuidad	31
2.3.10 Teorema de Bernoulli	32
2.3.11 3ra Ley de Newton en la Aerodinámica	33
2.3.12 Ecuaciones de Navier-Stokes.....	33

2.3.13	Teoría de la Capa Límite.....	34
2.3.13.1	Capas límites laminares.	35
2.3.13.2	Capas límites turbulentas.	35
2.4	Efectos Aerodinámicos	36
2.4.1	Efecto Venturi.....	36
2.4.2	Efecto Suelo	37
2.5	Digitalización 3D	37
2.5.1	Escáner 3D	38
2.5.1.1	Tipos.	38
2.5.1.2	Principio de funcionamiento.	39
2.5.1.3	Aplicaciones.....	40
2.5.2	Modelado Digital	41
2.5.3	Computer Fluid Dynamics	41
2.5.3.1	Preproceso.....	42
2.5.3.2	Proceso.....	49
2.6	Impresión 3D	51
2.6.1	Tipos de Impresión 3D.....	51
2.6.1.1	Modelado por deposición fundida.	52
2.6.1.2	Sinterización selectiva por láser.....	53
2.6.1.3	Estereolitografía.....	53
CAPÍTULO III.....		55
3	MATERIALES Y MÉTODOS	55
3.1	MATERIALES	55
3.1.1	Vehículo Fórmula Student	55
3.1.1.1	Dimensiones.....	55

3.1.1.2	Especificaciones.....	56
3.1.2	MIRACO PRO 3D Scanner.....	56
3.1.2.1	Especificaciones.....	57
3.1.3	Software REVO SCAN 5.....	58
3.1.4	Software CAD/CAE.....	59
3.1.5	Impresora 3D - ELEGOO SATURN 2.....	59
3.1.5.1	Especificaciones.....	60
3.2	MÉTODOS.....	62
3.2.1	Creación del Modelo Digital del Vehículo.....	63
3.2.1.1	Alerón delantero.....	66
3.2.1.2	Nariz del vehículo.....	67
3.2.1.3	Carrocería y chasis.....	69
3.2.1.4	Asiento del conductor.....	71
3.2.1.5	Fusión de modelos.....	75
3.2.1.6	Reconstrucción parcial de la zona posterior del chasis.....	77
3.2.2	Reconstrucción e Integración de Elementos en los Modelos 3D.....	78
3.2.2.1	Modelo Real.....	78
3.2.2.2	Modelo Digital Base.....	79
3.2.3	Configuraciones Geométricas del Modelo Digital Base.....	80
3.2.3.1	Variaciones Geométricas.....	80
3.2.4	Configuraciones Aerodinámicas del Modelo Digital Ajustado.....	82
3.2.5	Configuraciones de Entorno Aerodinámico para los modelos 3D.....	85
3.2.5.1	Creación del dominio computacional.....	85
3.2.5.2	Condiciones de Contorno.....	87
3.2.5.3	Malla CFD.....	88

CAPÍTULO IV.....	89
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	89
4.1 Simulación y Comparación de Cargas Aerodinámicas en los Modelos 3D	89
4.1.1 Modelo Real y Modelo Digital Base	90
4.1.1.1 Velocidad-Turbulencia.	91
4.1.1.2 Presión-Fuerza.	94
4.1.1.3 Eficiencia Aerodinámica.....	97
4.1.2 Modelo Digital Base y Modelo Digital Ajustado	97
4.1.2.1 Velocidad-Turbulencia.	98
4.1.2.2 Presión-Fuerza.	99
4.1.2.3 Eficiencia Aerodinámica.....	101
4.1.3 Modelo Digital Ajustado y Modelo Digital Modificado	101
4.1.3.1 Velocidad-Turbulencia.	103
4.1.3.2 Presión-Fuerza.	104
4.1.3.3 Eficiencia Aerodinámica.....	105
4.2 Evaluación de la Influencia de Diferentes Parámetros del Modelo CFD	106
4.2.1 Cálculo de Reynolds	108
4.3 Recolección y Comparación de Resultados del CFD con Datos Referenciales Publicados.....	108
4.3.1 Validación de Incertidumbre de los Resultados Obtenidos	110
CAPÍTULO V.....	111
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	111
5.1 CONCLUSIONES	111
5.2 RECOMENDACIONES.....	112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Valores de calidad de la malla según el criterio de oblicuidad.</i>	48
Tabla 2. <i>Parámetros de simulación.</i>	51
Tabla 3. <i>Geometría ext. fórmula Student, tomando en cuenta solo chasis, carrocería y alerón.</i> ..	56
Tabla 4. <i>Características del vehículo fórmula Student.</i>	56
Tabla 5. <i>Datos técnicos del escáner MIRACO PRO 3D.</i>	58
Tabla 6. <i>Datos técnicos de la impresora 3D de Resina ELEGOO SATURN 2.</i>	61
Tabla 7. <i>Parámetros de configuración para la edición de la nube de puntos del alerón delantero.</i>	67
Tabla 8. <i>Parámetros de configuración para la edición de la nube de puntos de la nariz del vehículo fórmula Student.</i>	69
Tabla 9. <i>Parámetros de la configuración de la nube de puntos de la carrocería del vehículo fórmula Student.</i>	71
Tabla 10. <i>Parámetros de configuración de la nube de puntos de la zona frontal y posterior del asiento del vehículo fórmula Student.</i>	72
Tabla 11. <i>Parámetros y configuración de la nube de puntos de la fusión de todos los modelos que componen al vehículo fórmula Student.</i>	76
Tabla 12. <i>Tamaño del dominio computacional.</i>	85
Tabla 13. <i>Dimensiones de los modelos y dominios computacionales.</i>	86
Tabla 14. <i>Condiciones de contorno para los modelos 3D.</i>	87
Tabla 15. <i>Áreas frontales y alares de los modelos 3D.</i>	89
Tabla 16. <i>Resultados CFD del modelo real y digital base.</i>	90
Tabla 17. <i>Aplicación de fórmulas en el CFD.</i>	91
Tabla 18. <i>Velocidad y trayectoria, vista lateral modelo real y digital base.</i>	92
Tabla 19. <i>Velocidad y trayectoria, plano de sección modelo real y digital base.</i>	93
Tabla 20. <i>Presión, vista lateral modelo real y digital base.</i>	94
Tabla 21. <i>Presión, plano de sección modelo real y digital base.</i>	95
Tabla 22. <i>Eficiencia aerodinámica del modelo real y digital base.</i>	97
Tabla 23. <i>Resultados CFD del modelo digital ajustado.</i>	98

Tabla 24. <i>Velocidad y trayectoria, modelo digital ajustado.</i>	99
Tabla 25. <i>Presión máxima, modelo digital ajustado.</i>	100
Tabla 26. <i>Eficiencia aerodinámica del modelo digital ajustado.</i>	101
Tabla 27. <i>Resultados CFD del modelo digital modificado.</i>	102
Tabla 28. <i>Velocidad y trayectoria, modelo digital modificado.</i>	103
Tabla 29. <i>Presión máxima, modelo digital modificado.</i>	105
Tabla 30. <i>Eficiencia aerodinámica, modelo digital modificado.</i>	105
Tabla 31. <i>Datos CFD de interés, modelo digital modificado.</i>	106
Tabla 32. <i>Datos de interés referenciales publicados.</i>	108
Tabla 33. <i>Resultados calculados de los vehículos referenciados.</i>	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Porsche Spyder 550 con alerón</i>	26
Figura 2. <i>Componentes de la fuerza aerodinámica total</i>	27
Figura 3. <i>Desprendimiento de la capa límite</i>	34
Figura 4. <i>Flujo laminar y turbulento en la capa límite</i>	35
Figura 5. <i>Esquema del Efecto Venturi</i>	36
Figura 6. <i>Similitud del Efecto Suelo con el Efecto Venturi</i>	37
Figura 7. <i>Malla estructurada</i>	44
Figura 8. <i>Malla no estructurada</i>	45
Figura 9. <i>Elemento 2D de Relación de Aspecto</i>	46
Figura 10. <i>Elemento 3D de Relación de Aspecto</i>	46
Figura 11. <i>Oblicuidad 2D</i>	47
Figura 12. <i>Oblicuidad 3D</i>	48
Figura 13. <i>Vectores de Calidad Ortogonal</i>	49
Figura 14. <i>TOP tecnologías de impresión 3D</i>	52
Figura 15. <i>Impresión 3D FDM/FFF</i>	52
Figura 16. <i>Impresión 3D SLS</i>	53
Figura 17. <i>Impresión 3D SL/SLA</i>	54
Figura 18. <i>Vehículo fórmula Student</i>	55
Figura 19. <i>MIRACO PRO 3D scanner</i>	57
Figura 20. <i>ELEGOO SATURN 2 8K</i>	60
Figura 21. <i>Proceso Metodológico</i>	62
Figura 22. <i>Configuración de escaneo</i>	63
Figura 23. <i>Exposición de luz de un objeto a escanear</i>	64
Figura 24. <i>Tipo de captura de objeto</i>	65
Figura 25. <i>Barra indicadora de distancia</i>	65
Figura 26. <i>Alerón delantero cubierto con talco industrial</i>	66
Figura 27. <i>Nube de puntos del alerón delantero</i>	66
Figura 28. <i>Nariz del vehículo cubierta con talco industrial</i>	68
Figura 29. <i>Nube de puntos de la nariz del vehículo</i>	68

Figura 30. Carrocería y chasis del vehículo fórmula Student cubierto con talco industrial.	70
Figura 31. Nube de puntos de la carrocería del vehículo fórmula Student.	70
Figura 32. Asiento cubierto de talco industrial en determinadas zonas brillantes.	72
Figura 33. Nube de puntos de la zona frontal del asiento.	73
Figura 34. Zona posterior del asiento del vehículo.	73
Figura 35. Nube de puntos de la zona posterior del asiento.	74
Figura 36. Fusión de la zona frontal y posterior del asiento.	75
Figura 37. Nube de puntos de la fusión de los modelos que componen al vehículo.	76
Figura 38. Reconstrucción de la zona posterior del chasis del vehículo.	77
Figura 39. Modelo real realizado con mediciones manuales.	78
Figura 40. Requisitos geométricos del volante y estructura posterior.	79
Figura 41. Configuración geométrica del modelo real.	79
Figura 42. Complementación de componentes en el modelo digital base.	80
Figura 43. Variación geométrica del modelo digital ajustado.	81
Figura 44. Distancias y áreas establecidas para el diseño del vehículo.	81
Figura 45. Modelo digital ajustado.	82
Figura 46. Áreas restringidas para dispositivos o componentes del vehículo.	83
Figura 47. Ángulo de ataque para alerones de competencia.	84
Figura 48. Modelo digital modificado.	84
Figura 49. Dominio computacional del modelo real.	86
Figura 50. Dominio computacional del modelo digital base.	87
Figura 51. Refinamiento del mallado computacional modelo base.	88
Figura 52. Punto máximo de presión del modelo real.	96
Figura 53. Punto máximo de presión del modelo digital base.	96
Figura 54. Punto máximo de presión, modelo digital ajustado.	100
Figura 55. Comparativa de Eficiencia Aerodinámica.	106
Figura 56. Flujo de aire sobre el modelo digital modificado.	107
Figura 57. Flujo de aire en el difusor del modelo digital modificado.	107
Figura 58. Carga aerodinámica de los vehículos referenciados.	109
Figura 59. Resistencia Aerodinámica de los vehículos referenciados.	109

ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación (1). Resistencia Aerodinámica.</i>	<i>28</i>
<i>Ecuación (2). Carga Aerodinámica.</i>	<i>28</i>
<i>Ecuación (3). Coeficiente de Arrastre.</i>	<i>29</i>
<i>Ecuación (4). Coeficiente de Sustentación.</i>	<i>29</i>
<i>Ecuación (5). Eficiencia Aerodinámica.</i>	<i>29</i>
<i>Ecuación (6). Número de Mach.</i>	<i>30</i>
<i>Ecuación (7). Número de Reynolds.</i>	<i>30</i>
<i>Ecuación (8). Continuidad.</i>	<i>32</i>
<i>Ecuación (9). Bernoulli.</i>	<i>32</i>
<i>Ecuación (10). Principio de Acción y Reacción.</i>	<i>33</i>
<i>Ecuación (11). Conservación de la masa.</i>	<i>33</i>
<i>Ecuación (12). Conservación de la cantidad de movimiento.</i>	<i>34</i>

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Problema de Investigación

En el ámbito automotriz el desarrollo y diseño de vehículos es importante para la optimización de todos los sistemas que componen el mismo, la aerodinámica en el automóvil no es la excepción, por lo cual, es crucial mejorar el rendimiento y eficiencia aerodinámica del automotor. Son varias las cargas aerodinámicas que se presentan en un vehículo cuando este se encuentra en movimiento, por ello, se debe estudiar las fuerzas ejercidas por el entorno al que está circulando el vehículo, al ser aire el fluido que se debe analizar, se debe tener en cuenta una comparación detallada de la distribución de las diferentes presiones aerodinámicas a las que se encuentra sometido el automotor, también, la identificación de las zonas con mayor y menor presión aerodinámica enfocándose en la geometría del vehículo [1].

La aerodinámica es el estudio del aire en movimiento sobre un objeto determinado, en este caso un vehículo fórmula *Student*, principalmente se originan 3 tipos de fuerzas que dificultan el movimiento, la fuerza de sustentación es la fuerza vertical que actúa en el vehículo adhiriéndolo al suelo, fuerza de arrastre que dificulta el movimiento del vehículo y, la fuerza lateral [2].

Los problemas aerodinámicos en un vehículo son complejos, por ello, la utilización de métodos analíticos no es factible debido a que su efectividad es baja, se requiere otros métodos que arrojen resultados aproximados de resolución. Los métodos aerodinámicos avanzan tanto en la parte experimental como en la parte de simulación numérica [3].

La mecánica computacional ha evolucionado con el tiempo, con la utilización de nuevas tecnologías y la continua mejora de los algoritmos de cálculos con la finalidad de obtener procesos eficientes y confiables [4].

En las diferentes áreas de conocimiento es indispensable el uso de tecnologías avanzadas para resultados precisos, por ello, la importancia de análisis e impresiones 3D. Esto favorece y facilita los estudios que se desea realizar, la impresión 3D como herramienta educativa es una tendencia latente lo que conlleva nuevos aprendizajes [5].

1.2 Objetivos

Objetivo General

Elaborar un análisis comparativo de distintas cargas aerodinámicas en un vehículo fórmula *Student* con el uso de digitalización 3D y un software CFD enfocado en el mejoramiento del rendimiento aerodinámico del vehículo.

Objetivos Específicos

- Caracterizar la distribución de presiones aerodinámicas en el vehículo real y en el modelo digital.
- Evaluar la influencia de la geometría del vehículo en las cargas aerodinámicas.
- Analizar el efecto de la configuración aerodinámica del vehículo en las cargas aerodinámicas.
- Validar los resultados del CFD con técnicas de validación computacional.

1.3 Formulación del Problema de Investigación

En el presente trabajo de titulación como primera instancia se pretende obtener una comparación detallada de la distribución de cargas aerodinámicas en el vehículo real y el modelo digital con la utilización de un escáner 3D y un software CFD para analizar la influencia geométrica real del vehículo en la distribución de presiones aerodinámicas.

En segunda instancia se comprenderá cómo unas pequeñas modificaciones geométricas del modelo digital afectarán la distribución de cargas aerodinámicas, como objetivo se debe comparar las cargas aerodinámicas del modelo digital original con el modelo digital modificado.

En tercera instancia se determinará diferentes configuraciones aerodinámicas. Con la simulación de las cargas aerodinámicas en cada configuración mediante la utilización de un software CFD se escogerá la mejor configuración aerodinámica que genera las mejores cargas aerodinámicas para el vehículo en función de las condiciones de frontera.

En última instancia se pretende validar los resultados del software CFD por medio de la utilización de técnicas de error y validación de incertidumbre, con el objetivo de aplicar métodos estadísticos para cuantificar la incertidumbre y error de los resultados obtenidos.

Se realizará impresiones 3D del modelo digital modificado a una escala reducida, para una comparación visual y tangible de las diferencias geométricas obtenidas en el análisis.

1.4 Justificación

La tecnología evoluciona progresivamente, por lo cual la industria automotriz se ha enfocado en el desarrollo de tecnologías que hagan más eficiente el funcionamiento del automóvil. La presente investigación aportará una serie de beneficios en el diseño y construcción de vehículos

que su principal objetivo sean: la eficiencia aerodinámica, mejora del rendimiento del vehículo, comparación de diseños con diferentes pruebas CFD, y la exploración de ideas innovadoras con el propósito de fortalecer y mejorar las condiciones aerodinámicas del vehículo, con hincapié en las necesidades específicas de la industria automotriz.

En la ingeniería el análisis vehicular por medio de software CFD permite optimizar diversos parámetros del vehículo que, por muy pequeños cambios que se realicen afecten al rendimiento de este. El análisis de cargas aerodinámicas en un vehículo por medio de la utilización de un software CFD ayudará a identificar y solucionar una cantidad amplia de problemas relacionados con el diseño del vehículo, problemas tales como: inestabilidad del vehículo, exceso consumo de combustible, ruidos aerodinámicos, entre otros.

Son varios los beneficios técnicos y teóricos que puede aportar esta investigación en la ingeniería, ya que, el análisis CFD profundiza la comprensión de los diferentes flujos aerodinámicos que se presentan a diferentes condiciones de pista y estilo de conducción, otro beneficio importante es la agilización en el proceso de diseño y desarrollo aerodinámico de la carrocería del automotor, a diferencia de procesos tradicionales un tanto imprecisos y demorosos.

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Son varios los estudios realizados sobre el análisis aerodinámico tanto en vehículos convencionales como de competencia.

En la Universidad Politécnica de Juventino Rosas, Juan Capetillo realizó un estudio sobre el análisis aerodinámico en CFD de los alerones en automóviles convencionales, donde se realizó la comparación entre dos diseños de alerones en un vehículo con el objetivo de minimizar los coeficientes de sustentación y arrastre, y generar una estabilidad mayor en el automóvil al momento de curvar o conducir en una trayectoria longitudinal por medio de cambios de diseño en los modelos de los alerones del automotor [6].

Un estudio realizado por el Instituto Universitario Aeronáutico de Argentina sobre el escaneo 3D y estudio aerodinámico de un automóvil de competición, se concluyó que el proceso para llevar a cabo el modelamiento tridimensional de la superficie exterior de un automóvil arrojó resultados satisfactorios, en donde se puede evidenciar la aplicabilidad del modelo realizado. La calidad del mallado conjunto con las simulaciones realizadas daba resultados coherentes con el problema planteado, demostrando la eficacia y repetibilidad de la totalidad del método realizado [7].

El estudio realizado en el Instituto Universitario Aeronáutico de Argentina sobre el análisis de la aerodinámica de un automóvil de competición, se determinó el comportamiento aerodinámico de vehículos de carrera presentaba algunas irregularidades, se realizó determinados cálculos de las cargas de sustentación para tener en cuenta la modificación de la posición del vehículo respecto a la velocidad, esto se realizó con ayuda computacional [8].

La reconstrucción geométrica de una pieza mecánica: láser, escáner e impresión 3D, es un estudio realizado por la Universidad Nacional de La Plata, donde se detalla que, al realizar un modelo digital didáctico donde se observó: la utilidad de la técnica de relevamiento para representar las dificultades de la pieza construida, el procesamiento de datos permitió imprimir una pieza completa en donde la edición de la pieza posibilita obtener los volúmenes adecuados para poder integrar la morfología de la pieza en el espacio [9].

Un estudio de la evolución aerodinámica de los coches de fórmula 1, realizado por la Universidad Politécnica de Cataluña concluyó que, al analizar los resultados obtenidos en la comparación de dos alerones delanteros de diseño y fabricación procedentes de distintas épocas para comprender las diferencias notables que puede presentar el análisis aerodinámico mediante el uso de software CFD [10].

2.2 Introducción a la Aerodinámica de Vehículos Fórmula

Antes de la fórmula 1, varias carreras importantes influyeron de manera significativa en las competencias de automoción, las carreras Grand Prix, las cuales fueron originarias y organizadas en Francia en el año 1894, tenían como objetivo medir la resistencia tanto del vehículo como del piloto llegando a superar los 160 km/h en caminos abiertos [11].

A inicios del siglo XX, la Copa Bennett creada en Europa (1900) por James Gordon Bennett Jr., la Copa Vanderbilt creada en Estados Unidos por William Kissam Vanderbilt II (1904), impulsaron la popularidad del automovilismo a nivel internacional. Cada uno de los países organizaban y desarrollaban sus propias regulaciones, pero, compartían el objetivo de limitar el peso del automóvil, así también, limitar la potencia (los motores de entre 10 a 15 litros eran los más comunes y 4 cilindros como máximo), durante esta época, Michelin y la incorporación de

innovaciones como el uso de ruedas desmontables sin la obligación de retirar el neumático y la cámara del rin revolucionaron la industria. Sucedieron grandes premios de carreras individuales, con pocas normas y regulaciones y una gran libertad mecánica que llevó a distintas marcas a innovar [12].

La fórmula 1 es un deporte mundial con un vasto número de espectadores, sus comienzos remontan a 1946, después de la segunda guerra mundial un número de entusiastas en el automovilismo comenzaron a competir en algunas carreras que se disputaban en Europa, pero, es en 1950 que la fórmula 1 se institucionalizó oficialmente [10]. El primer intento que se llevó a cabo fue la incorporación de un alerón en un coche de carreras que lo realizó un ingeniero y piloto suizo llamado Michael May, en 1956, en un Porsche 550 Spyder, como se muestra en la Figura 1, pero, este no llegó a competir debido a que prohibieron su uso.

Figura 1. *Porsche Spyder 550 con alerón.*



Tomado de: [13].

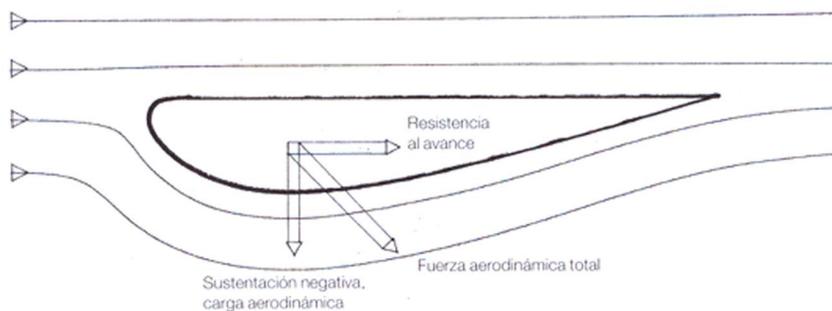
En la década de los 60, un sin número de diseñadores e ingenieros trataban de conseguir ventaja a través de la aerodinámica, su objetivo, reducir la resistencia al avance del vehículo, dando formas más afiladas a las carrocerías de los vehículos, coches más bajos y la reducción del área frontal del automóvil [14]. La fórmula 1 siempre se ha caracterizado por su desarrollo e innovación

en la automoción, por lo cual, la aerodinámica juega un papel importante en los avances históricos [15]. El incremento exponencial en la velocidad se debía a un mejor estudio de la técnica aerodinámica teniendo como principales características era que empezaron a utilizar el perfil de alas de avión invertido apegándolo más al suelo teniendo como objetivo el aumentar la fuerza normal haciendo que los neumáticos logren soportar fuerzas tangenciales mayores, teniendo una mayor estabilidad [12], [16].

2.3 Ecuaciones y Principios Aerodinámicos

Al generarse un flujo de corriente de aire sobre un vehículo como se observa en la Figura 2, existe una incidencia en el desempeño del automotor, la fuerza aerodinámica es la resultante de dos fuerzas, resistencia al avance o resistencia aerodinámica (drag force) y sustentación o carga aerodinámica (downforce) [2], [15], [17].

Figura 2. Componentes de la fuerza aerodinámica total.



Tomado de: [15].

2.3.1 Resistencia Aerodinámica

La resistencia aerodinámica se la define como una fuerza que actúa en dirección contraria al movimiento relativo de cualquier cuerpo u objeto que se mueve respecto al flujo de aire [18], [19].

$$R_A = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * A_f * C_D \quad (1)$$

Donde:

R_A = Resistencia Aerodinámica.

ρ = Densidad del fluido (aire).

V = Velocidad del fluido.

A_f = Área frontal.

C_D = Coeficiente de arrastre.

2.3.2 Carga Aerodinámica

La sustentación es la fuerza aerodinámica que se genera como resultado de la interacción entre un cuerpo y el fluido (aire) por el que se desplaza, actuando en una dirección perpendicular respecto a la velocidad del flujo incidente [18]. La fuerza de sustentación es la fuerza que empuja al coche contra el suelo al atravesar el fluido [17], [20].

$$C_A = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * A_S * C_L \quad (2)$$

Donde:

C_A = Carga Aerodinámica.

ρ = Densidad del fluido (aire).

V = Velocidad del fluido.

A_S = Área que produce sustentación.

C_L = Coeficiente de sustentación.

2.3.3 Coeficientes Aerodinámicos

Son cruciales en los diseños y análisis aerodinámicos de vehículos, los coeficientes aerodinámicos son adimensionales y se utilizan para la evaluación de cuanta resistencia al avance y carga aerodinámica produce un cuerpo en movimiento a través del aire [21].

La forma del objeto junto con su superficie y materiales influye en los coeficientes de arrastre y sustentación, estos coeficientes dependen principalmente de la forma del objeto [22]. Las fórmulas utilizadas para el cálculo del coeficiente de arrastre (C_D), y el coeficiente de sustentación (C_L) son:

$$C_D = \frac{2 * R_A}{\rho * V^2 * A_f} \quad (3)$$

$$C_L = \frac{2 * C_A}{\rho * V^2 * A_S} \quad (4)$$

2.3.4 Eficiencia Aerodinámica

La Eficiencia Aerodinámica es un número adimensional que indica la capacidad que tiene el vehículo para generar carga aerodinámica con la menor resistencia aerodinámica posible, un valor alto en la relación del coeficiente de sustentación y el coeficiente de arrastre indica una mayor eficiencia en el diseño aerodinámico del vehículo [23]. La fórmula para el cálculo de la eficiencia aerodinámica es:

$$\eta_A = \frac{C_L}{C_D} \quad (5)$$

2.3.5 Número de Mach

La aerodinámica tiene como objetivo el estudio de la interacción de uno o varios cuerpos sólidos y aire cuando existe movimientos relativos entre ellos [24]. El movimiento del fluido, en este caso el aire, se lo puede definir mediante el estudio de ciertas variables representativas (temperatura. Presión, densidad y velocidad) [25], [26].

Un fluido puede ser compresible o incompresible dependiendo de su número de Mach:

$$M = \frac{\text{Velocidad del flujo}}{\text{Velocidad del sonido}} \quad (6)$$

Mach (M) número adimensional que señala la velocidad real del fluido.

- **Flujo subsónico (M<1):**

La velocidad del fluido es menor a la del sonido.

- **Flujo sónico (M=1):**

El fluido se desplaza a la velocidad del sonido.

- **Flujo supersónico (M>1):**

La velocidad del fluido es mayor a la del sonido.

Con las variaciones de densidad de un fluido al experimentar un movimiento, su flujo se puede clasificar en:

2.3.6 *Número de Reynolds*

Unidad adimensional que permite predecir el patrón de flujo laminar, transicional o turbulento de un fluido, es un factor importante en la dinámica de fluidos, ya que, determina la reacción de un fluido bajo determinadas velocidades y niveles de viscosidad [27]. La ecuación se define como:

$$Re = \frac{\rho * V * L}{\mu} \quad (7)$$

Donde:

Re = Número de Reynolds.

ρ = Densidad del fluido (kg/m³).

V = Velocidad del fluido respecto a la superficie (m/s).

L = Longitud característica (m).

μ = Viscosidad dinámica del fluido (kg/(m*s)).

Rangos de flujo determinados por el Número de Reynolds:

$Re < 2000$; flujo laminar.

$2000 \leq Re \leq 4000$; flujo transicional (estado intermedio entre el flujo laminar y turbulento).

$Re > 4000$; flujo turbulento.

2.3.7 Flujo Incompresible

Un fluido se considera incompresible cuando no presenta variaciones importantes en su densidad, por lo cual, puede ser constante a lo largo de su movimiento, cuando el número de Mach sea menor a 0.3, los cambios de la densidad en movimiento con respecto a la densidad del fluido en reposo son del 5%, por lo tanto, se considera que, el flujo es incompresible (densidad constante) [8], [26].

2.3.8 Flujo Compresible

El fluido experimenta variaciones apreciables en su densidad cuando este se encuentra en movimiento, por consiguiente, esta propiedad es susceptible a fluctuaciones, si el número de Mach es mayor a 0.3, los cambios de la densidad deben de considerarse, por lo cual, es un fluido compresible [26], [28].

2.3.9 Ecuación de Continuidad

Dentro de un conducto, es importante describir el flujo de aire, por lo cual, se toma en cuenta la ecuación de continuidad, en donde, la cantidad de fluido que atraviesa una sección cualquiera del conducto por unidad de tiempo permanece constante, es decir, el caudal másico de entrada es igual al caudal másico de salida [26].

$$\rho \cdot v \cdot A = cte \quad (8)$$

Donde:

ρ = Densidad del fluido (kg/m³).

U = Velocidad del fluido (m/s).

A = Área frontal (m²).

2.3.10 Teorema de Bernoulli

La estela se basa en la ley de preservación de energía, en donde, se declara que la energía total de un sistema aislado (interacciona con otro sistema) debe permanecer invariable en función del tiempo, por lo cual, dicha energía puede transformarse en otra forma de energía [27], [29]. Existen 3 ejemplos de energía: energía cinética (por velocidad), energía potencial (por altura) y energía de presión. Al conservarse la energía, esta puede permanecer constante, es decir:

$$\frac{V^2 * \rho}{2} + P + \rho \cdot g * z = Cte \quad (9)$$

Donde:

V= Velocidad del fluido en la sección considerada (m/s).

ρ = Densidad del fluido (kg/m³).

P= Presión a lo largo de la línea de corriente (Pa).

g= gravedad (9,81 m/s²).

Z=Altura en la dirección de la gravedad, tomando en cuenta una cota referencial (m).

Para la aplicación de esta ecuación se debe realizar varias consideraciones [30] :

- Caudal constante.
- Flujo estacionario.
- Flujo incompresible (densidad constante).
- Flujo ideal (viscosidad despreciable).

2.3.11 3ra Ley de Newton en la Aerodinámica

El principio de Acción y Reacción establece que toda fuerza efectuada en un cuerpo le corresponde una reacción igual pero en el sentido contrario [31]. En la Aerodinámica este principio se utiliza en la Sustentación, ya que, la interacción del fluido con los alerones del vehículo genera una fuerza descendente, por lo cual, aumenta la carga aerodinámica y permite una mejor adherencia del vehículo con la superficie de la calzada, es decir:

$$F_{1-2} = -F_{2-1} \quad (10)$$

Donde:

F_{1-2} = Fuerza ejercida por el primer objeto sobre el segundo.

F_{2-1} = Fuerza ejercida por el segundo objeto sobre el primero.

2.3.12 Ecuaciones de Navier-Stokes

Describen la interacción de fluidos en movimiento con la superficie de un objeto a lo largo de una malla de elementos finitos creada en un dominio computacional, las ecuaciones de Navier-Stokes son fundamentales en la dinámica de fluidos, ya que, una vez establecidas las condiciones de contorno se genera resultados dinámicos, es decir, es crear un túnel de viento virtual para el análisis del comportamiento del fluido sobre el objeto en determinadas condiciones. Las ecuaciones de Navier-Stokes son un modelo matemático que a partir de un flujo laminar con un aumento progresivo de su velocidad crea inestabilidad dinámica, lo cual, la trayectoria de las partículas de aire no es estable y estas partículas son desviadas de forma creciente respecto al tiempo [32]. Las ecuaciones de conservación de masas y cantidad de movimiento conocidas como ecuaciones de Navier-Stokes y se expresan como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho * V_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (11)$$

$$\rho * \frac{dV_i}{dt} = \rho * f_i - \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}^*}{\partial x_j} \quad (12)$$

Donde:

V_i = Velocidad del fluido de una componente vectorial (m/s).

t = Tiempo (s).

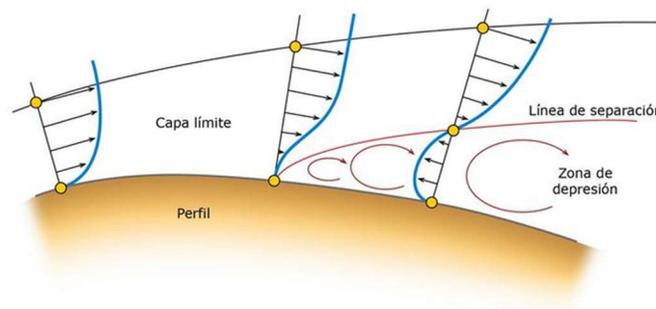
$x_{i;j}$ = Punto en el espacio del dominio computacional.

τ_{ij}^* = Parte viscosa del tensor de tensiones para fluidos newtonianos.

2.3.13 Teoría de la Capa Límite

En la intersección entre un fluido y un sólido que se mueven uno respecto a otro, aparece una capa delgada llamada capa límite como se muestra en la Figura 3. Al considerar el movimiento de un flujo viscoso sobre una superficie sólida, resulta fundamental considerar el perfil de velocidades tangencial en la capa límite. Este perfil de velocidades determina la posición en la que se produce el desprendimiento del corriente límite. Dicho fenómeno conlleva un incremento significativo en la presión de arrastre (Drag pressure), debido a la creación de una zona de baja presión en la región de separación [26], [27].

Figura 3. Desprendimiento de la capa límite.



Tomado de: [26].

En la Figura 4 se observa como las capas límites pueden ser laminares o turbulentas ya que coexisten en los dos tipos de regímenes en un mismo flujo;

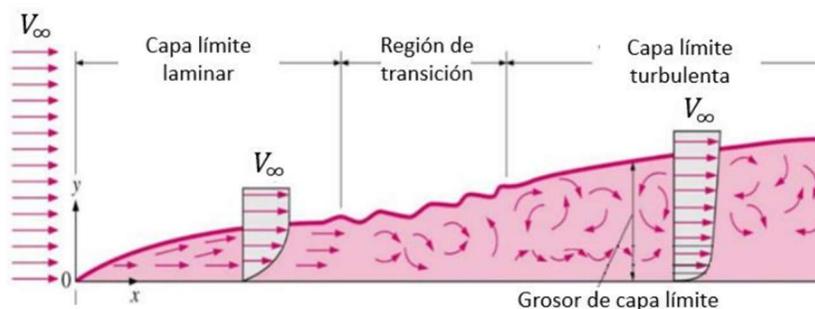
2.3.13.1 Capas límites laminares.

Las capas límites laminares se caracterizan por poseer un flujo ordenado, en la que las líneas de corriente mantienen trayectorias definidas y no se mezclan entre sí. Esta característica se traduce en una mínima mezcla entre las diferentes capas del fluido sin presencia de fluctuaciones aleatorias. Como consecuencia, los espesores de las capas límite laminares suelen ser menores en comparación con las capas límites turbulentas [26].

2.3.13.2 Capas límites turbulentas.

Las capas límite turbulentas se distinguen por un movimiento irregular y desordenado de las partículas fluidas, lo que provoca una intensa mezcla entre las diferentes capas del fluido. Este régimen de flujo se caracteriza por la presencia de fluctuaciones aleatorias y remolinos, es decir, turbulencia [26].

Figura 4. *Flujo laminar y turbulento en la capa límite.*



Tomado de: [26].

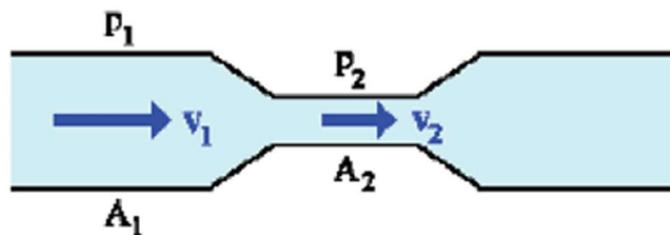
Los vehículos de F1 incorporan dispositivos aerodinámicos diseñados específicamente para provocar la transición del flujo laminar ya aprovechado en flujo turbulento. Esta manipulación del flujo tiene como objetivo retrasar al máximo el desprendimiento de la capa límite, optimizando la generación de carga aerodinámica y reduciendo la resistencia. El estudio detallado de la capa límite es fundamental en el diseño de estos vehículos, ya que permite determinar la geometría óptima de los dispositivos aerodinámicos para lograr un flujo laminar estable y un desprendimiento de la capa límite lo más tardío posible [26], [33].

2.4 Efectos Aerodinámicos

2.4.1 Efecto Venturi

El efecto Venturi tiene como fundamento los principios del teorema de Bernoulli y la ecuación de Continuidad. De acuerdo con estos principios, en la Figura 5 se observa como al circular un fluido a través de una sección reducida de un conducto, se produce un aumento en su velocidad y una disminución de la presión.[26], [34].

Figura 5. Esquema del Efecto Venturi.

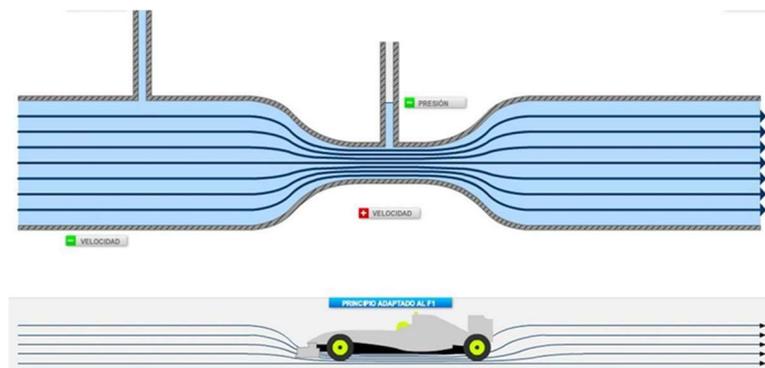


Tomado de: [26].

2.4.2 Efecto Suelo

El efecto suelo se basa en el efecto Venturi, por lo cual, es fundamental en el diseño automotriz, consiste en generar una zona de baja presión por debajo del vehículo y una zona de alta presión por encima del mismo, esto induce una fuerza de succión y empuje respectivamente como se parecía en la Figura 6. Esta fuerza influye en la sustentación del vehículo y permite adherirse con mayor facilidad a la calzada mejorando el agarre de los neumáticos, permitiendo aumentar la velocidad en curvas y la estabilidad del automóvil [35], [36].

Figura 6. Similitud del Efecto Suelo con el Efecto Venturi.



Tomado de: [36].

2.5 Digitalización 3D

La ocupación del escáner 3D es poder digitalizar un objeto real, el escáner almacena muestras geométricas obteniendo como resultado una nube de puntos los cuales constan de sus coordenadas correspondientes sobre los tres planos (X,Y,Z), creando una red con forma del objeto siendo procesado y analizado, determinando de esta forma la posición del mismo en el espacio y poder reconstruirlo, como por ejemplo en una impresión 3D [37]. El escáner 3D es muy distinto si los comparamos con una cámara fotográfica, ya que las cámaras fotográficas guardan como

información el color de la superficie, por otro lado, el escáner 3D guarda y reúne información acerca del dimensionamiento de uno o varios objetos geométricos [38], [39].

2.5.1 Escáner 3D

El escáner 3D es un dispositivo cuya función es medir de forma tridimensional, capturando un objeto del mundo real para digitalizarlo, con el objetivo de posibilitar el remodelado y analizar el objeto obteniendo mediciones completas o parciales, estos dispositivos generan medidas o puntos de extrema densidad comparándola con la tradicional que sería la de punto por punto haciendo referencia a otros dispositivos de medición [9].

2.5.1.1 Tipos.

Los tipos de escáner se pueden dividir en dos grupos, los que necesitan contacto y los que no [40], [41].

➤ Digitalización por contacto.

Los escáner de contacto funcionan mediante la adquisición de las coordenadas de los puntos tridimensionales, con la utilización de un palpador o una punta que toca el área del objeto físico, como por ejemplo, la punta montada sobre un brazo robot (Joint Arms) y el sistema de posicionamiento tridimensional (CMM), siendo estos los objetos que se utilizan para digitalizar uno o varios cuerpos físicos [41].

➤ **Digitalización sin contacto.**

El sistema de digitalización sin contacto funciona mediante un tipo de radiación (infrarroja, láser, ondas de radio, rayos X, etcétera.) [42], [43]. Este tipo de escáner sin contacto se divide en pasivo y activo, el escáner pasivo es aquel que no emiten ningún tipo de radiación por sí mismo, su funcionamiento es basado mediante la captación de radiación reflejada en el ambiente, mientras que el activo emite algún tipo de señal, analizando los datos para recibir o captar la forma del objeto [4], [41].

2.5.1.2 Principio de funcionamiento.

Existen dos tipos de tecnología más utilizados en escáner 3D, por triangulación láser y por luz estructurada, estos no tienen contacto entre el hardware y un objeto durante la obtención de datos [44].

El método de triangulación utiliza una línea laser proyectada la cual emplea ángulos y ubicación entre dispositivos fotosensibles y fuentes de luz (CCD- cámara del dispositivo de carga acoplada), crea un perfil de sección transversal el cual al pasar un objeto crea muchos perfiles los cuales se combinan creando una forma tridimensional. Este tipo de escáner cuenta con cámara a color y línea láser, recolecta los datos de toda el área del objeto el cual gira bajo el escáner formando una intercepción a lo largo de toda la superficie medida [45].

La luz estructurada, sus primeras apariciones fue hace 40 años y hasta el día de hoy se va desarrollando de forma progresiva, investigándose nuevas combinaciones de patrones los cuales ayudan a analizar zonas mucho más complejas o inaccesibles. Este patrón de luz proyectado analiza la deformación en el mismo, causado por el objeto, siendo capturado por una cámara, determinando la posición de cada punto en el espacio 3D mediante unos algoritmos. El principal

problema de esta herramienta es que no valdría como iluminación los sistemas normales tales como bombillas, fluorescentes, etcétera. La luz estructurada está formada o compuesta por ondas que tienen diferentes frecuencias, las cuales provocan que el haz se difumine por el entorno [44].

2.5.1.3 Aplicaciones.

El escáner 3D, puede aplicarse a un sin número de cosas dándonos la posibilidad de facilitar y mejorar proyectos que pueden realizarse con el mismo [46].

En la ingeniería inversa, esta nos ayuda en la fabricación de grandes equipos, los cuales tienen medidas que no pueden tomarse usando la metrología, el remplazo de una pieza tanto por degradación, estar totalmente obsoleta o los datos CAD no existen o no están disponibles y la creación o producción de una o múltiples piezas con el diseño CAD original, etc [44].

En la medicina, el RE (Escaneado rápido) y el RP (Prototipado rápido) son muy importantes en la creación o fabricación de prototipos de órganos internos, huesos o incluso tumores, utilizando datos de la resonancia magnética para preparar o brindar la herramienta con la cual podrían prepararse de mejor manera antes de intervenir en el paciente, este tipo de escaneado es muy beneficioso en la medicina, siendo necesario mucha precisión por la forma de los objetos médicos que son muy complejos y por el tiempo que se ve reducido de forma drástica, siendo una tecnología emergente [47].

En la arqueología, se pueden replicar los fósiles que tengan el riesgo de deshacerse o destruirse durante la extradición en las rocas, siendo de mucha utilidad para crear de forma rápida y precisa una réplica, fabricada a partir de los datos proporcionados por el escáner 3D [44].

En la construcción, el escaneado rápido optimiza o reduce significativamente el tiempo empleado en la fabricación virtual, sirve tanto para inspeccionar estructuras que permite darle un

seguimiento al comportamiento de la misma, como para examinar el comportamiento de los materiales en una vivienda o edificio, examinando los daños localizados o el desgaste mecánico [48].

2.5.2 *Modelado Digital*

El modelado digital es utilizado para un sin número de aplicaciones, tales como: aplicaciones en la industria, educación, medicina ingeniería inversa, preservación cultural, etc. Mediante el uso de herramientas 3D es posible convertir objetos físicos en modelos digitales, los modelos digitales son compatibles con software de diseño, tecnologías de fabricación inversa e impresión 3D. La precisión de resultados depende de la aplicación que se requiera la utilización del modelo digital, por lo cual, una adecuada herramienta de digitalización 3D es fundamental para la obtención de resultados precisos y confiables [49].

2.5.3 *Computer Fluid Dynamics*

Computer Fluid Dynamics (CFD) es una metodología numérica que permite simular con precisión el comportamiento de fluidos en movimiento y los procesos de transferencia de calor asociados. Esta metodología es ampliamente empleada en diversos sectores industrias, por lo cual, se basa en la resolución numérica de ecuaciones que gobiernan la conservación de masa, momento y energía en el seno de un fluido, proporcionando un sin número de posibilidades para un correcto análisis y diseño de un determinado objeto, con la utilización de herramientas eficientes y prácticas [3]. En las últimas dos décadas las técnicas CFD han evolucionado, estas mejoras son representadas en las distintas áreas de la ingeniería, mediante el mejoramiento de los programas procesadores CFD [27]. En el ámbito automotriz, la aplicación de este procesamiento es

significativamente versátil, ya que, abarca desde el análisis aerodinámico de los vehículos hasta el estudio de flujos internos en componentes como el bloque motor, los múltiples de admisión y escape, y los sistemas de filtración. Asimismo, se emplea en el diseño de sistemas de climatización y control [27].

2.5.3.1 Preproceso.

El preprocesamiento CFD consiste en la preparación del modelo que se empleará en la simulación. Esta etapa involucra la importación o generación de la geometría del dominio físico, su simplificación y limpieza, el mallado y la evaluación de la calidad de dicha malla, y las condiciones de contorno que simulan las interacciones con el entorno. Finalmente, el modelo preprocesado es exportado a un programa procesador CFD para su análisis [27]. En el preproceso se ejecutan todas las operaciones pertinentes para la creación del mallado del objeto a analizar, posteriormente se asigna las diferentes condiciones necesarias como referencia para el túnel de viento, un problema de flujo (temperatura, presión, velocidad, etcétera) es definido con los nodos dentro de la celda de la malla. [21].

➤ Mallado computacional.

La precisión de un mallado computacional es definido por el número de celdas en la cuadrícula de la malla, por lo cual, al ser mayor el número de celdas, la precisión de la solución aumenta. Evidentemente, existe una correlación directa entre la complejidad de una malla y los recursos computacionales requeridos para su procesamiento. Sin embargo, para optimizar el análisis, se recurre a mallas no uniformes, adaptando su densidad a las características geométricas del objeto. De esta manera, es posible alcanzar la precisión deseada sin comprometer

excesivamente el tiempo de cálculo. Cabe destacar que, en la práctica industrial, más de la mitad del tiempo dedicado a un proyecto CFD se invierte en la generación y refinamiento de la malla [21]. La calidad de una malla es un factor determinante en la precisión y convergencia de las soluciones numéricas obtenidas en una simulación CFD. Una malla bien construida asegura que los resultados obtenidos sean representativos de la realidad física del problema. Por lo cual, resulta fundamental establecer parámetros rigurosos para evaluar la calidad de una malla y garantizar así la fiabilidad de los resultados [33].

➤ **Tipos de mallas.**

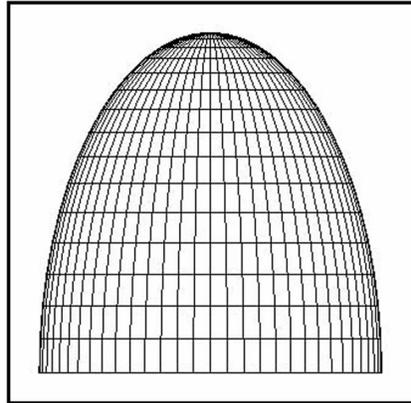
❖ **Mallas Estructuradas.**

Las mallas estructuradas son aquellas en donde cada elemento de control consta con el mismo número de elementos adyacentes como se evidencia en la Figura 7, ofreciendo ventajas como:

- La simplificación significativa en el proceso de generación de la malla, reduciendo así el costo computacional.
- Permite un control detallado sobre la forma y el tamaño de los elementos, lo cual es particularmente útil en la aplicación de métodos numéricos como las diferencias finitas.

Sin embargo, su rigidez geométrica limita su aplicación a dominios con geometrías relativamente complejas [3], [27].

Figura 7. *Malla estructurada.*

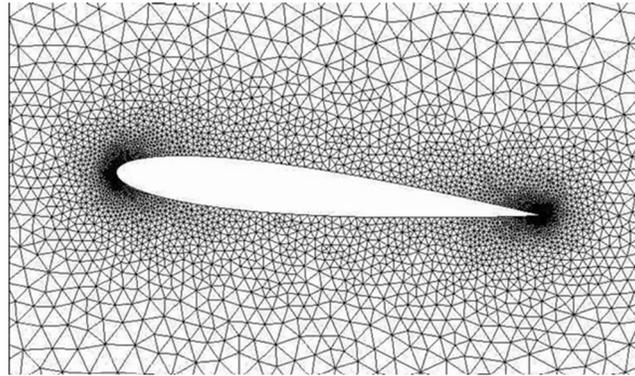


Tomado de: [27].

❖ **Mallas no estructuradas.**

Las mallas no estructuradas como se observa en la Figura 8, se caracterizan por su conectividad irregular y aleatoria, lo cual la diferencia de las mallas estructuradas que presentan una organización regular y predecible. Esta característica confiere a las mallas no estructuradas una gran flexibilidad, permitiendo cuantificar dominios geométricos complejos de manera eficiente. Sin embargo, este proceso conlleva un mayor costo computacional debido a la necesidad de almacenar explícitamente la información de conectividad entre los elementos [35]. La complejidad de los modelos matemáticos necesarios para determinar la conectividad entre elementos y calcular los volúmenes para las celdas, y la creación de mallas de alta calidad, resulta en tiempos de procesamiento considerablemente más largos [27].

Figura 8. *Malla no estructurada.*



Tomado de: [35].

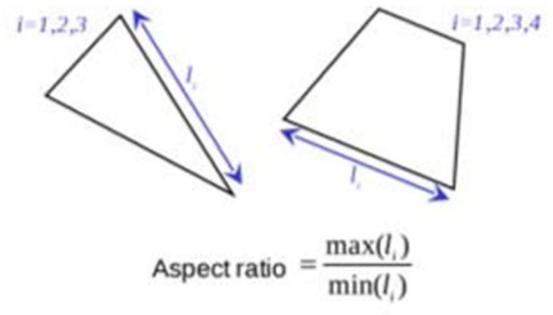
➤ **Calidad de mallas.**

La calidad de una malla se encuentra condicionada por múltiples factores interrelacionados, los cuales deben ser cuidadosamente considerados para obtener un mallado con características adecuadas, tales como;

❖ **Relación de Aspecto (Aspect ratio).**

La precisión numérica en el mallado es indispensable para obtener resultados confiables. Un mallado ideal, compuesto por tetraedros perfectos y uniformes, es teóricamente óptimo. Sin embargo, en geometrías reales, la presencia de aristas cortas y superficies curvas impide la generación de mallas completamente perfectas y uniformes. La relación de aspecto, definida como la relación de aspecto de un rectángulo uniforme es la relación de su lado más largo a su lado más corto, la relación de aspecto de un elemento tetraédrico perfecto sirve como un indicador de la calidad del mallado, siendo 1,0 la unidad de valor ideal para tetraedros perfectos [35], [50].

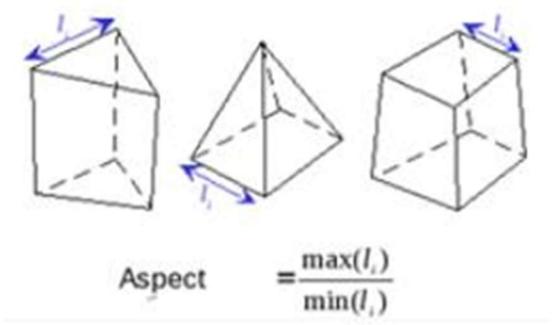
Figura 9. *Elemento 2D de Relación de Aspecto.*



Tomado de: [35].

En la Figura 9 se identifica dos figuras geométricas, un cuadrilátero irregular y un triángulo, la relación de aspecto compara la longitud más larga y la más corta de una figura geométrica, si la relación de aspecto es cercana a 1, indica que la figura geométrica es casi cuadrada o circular [35].

Figura 10. *Elemento 3D de Relación de Aspecto.*



Tomado de: [35].

En la Figura 10 se aprecia 3 figuras geométricas 3D, un prisma triangular, un tetraedro y un cubo, el proceso de análisis es el mismo que de las figuras geométricas 2D, se determina la longitud máxima y mínima de la figura geométrica 3D, mediante la diferencia de longitudes se determina si la figura 3D es casi cúbica, es decir si sus dimensiones tienen longitudes similares [35].

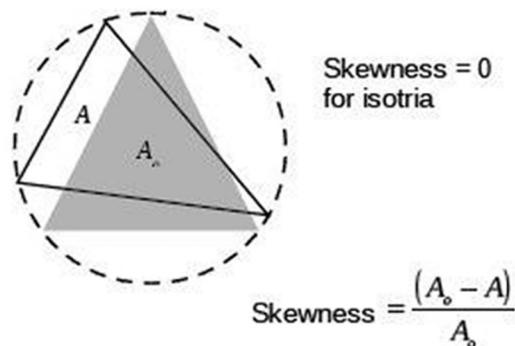
❖ **Relación de Crecimiento.**

Determina la forma de expansión del mallado a partir de los elementos de superficie.

❖ **Oblicuidad (Skewness).**

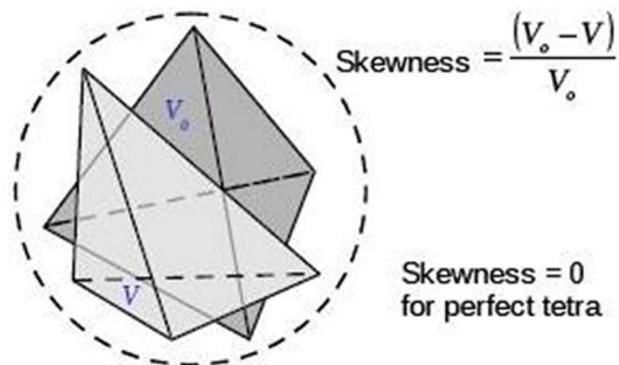
Cuantifica el grado de similitud de un elemento respecto a su forma ideal, caracterizada por una circunferencia en 2D o una esfera en 3D. La oblicuidad, como medida de calidad de la malla, evalúa el grado de aproximación de una cara o elemento a esta forma geométrica perfecta como se indica en la Tabla 1 [35], [50].

Figura 11. *Oblicuidad 2D.*



Tomado de: [35].

En la Figura 11 se observa la oblicuidad 2D de la caracterización de un triángulo sombreado irregular inscrito en una circunferencia. A_0 representa el área del triángulo sombreado y A representa el área del triángulo equilátero. La diferencia de estas dos áreas se lo divide al área del triángulo sombreado, si la oblicuidad es igual a cero quiere decir que el elemento respecto a su forma ideal presenta una distribución perfecta uniforme o isotrópica [35].

Figura 12. *Oblicuidad 3D.*

Tomado de: [35].

En la Figura 12 se muestra la oblicuidad 3D de un tetraedro sombreado irregular inscrito en una esfera, se realiza el mismo procedimiento que la oblicuidad 3D, pero, en este caso, V_0 representa el volumen del tetraedro sombreado y V el volumen del tetraedro ideal. La diferencia de estos dos volúmenes se la divide al volumen del tetraedro sombreado, si la oblicuidad es igual a cero, se determina el tetraedro sombreado como perfecto inscrito en una esfera [35].

Tabla 1. *Valores de calidad de la malla según el criterio de oblicuidad.*

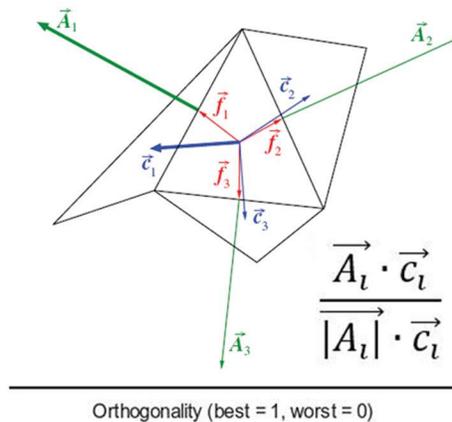
Valores de Oblicuidad	Calidad de la malla
0	Equilateral
[0; 0.25)	Excelente
[0.25; 0.5)	Buena
[0.5; 0.75)	Justa
[0.75; 0.9)	Pobre
[0.9; 1)	Mala
1	Deforme

Tomado de: [50].

❖ Ortogonalidad.

Se especifica el ángulo entre los ejes ortogonales de una cara y los vectores que determinan la dirección de las caras generadas a partir de sus aristas como se presenta en la Figura 13. El rango de calidad Ortogonal va de 0 a 1, considerando 0 la peor calidad, y 1 la mejor. La calidad ortogonal de una celda se realiza entre su vector normal y los vectores que unen su centroide con los centroides de las celdas vecinas y del centroide de la celda hacia cada una de sus caras [35], [50].

Figura 13. *Vectores de Calidad Ortogonal.*



Tomado de: [35].

2.5.3.2 Proceso.

El Proceso CFD se caracteriza en la configuración de todas las operaciones de distintas variables que intervienen en un estudio aerodinámico, el objetivo es determinar las fuerzas que actúan sobre el modelo (objeto), y las influencias de ensayo:

- Si se utiliza o no alerón.
- Si existe contacto de las ruedas con la calzada.
- Si el análisis se toma en cuenta o no el uso de las ruedas del vehículo.

➤ Configuraciones de simulación.

Es aquí donde se establece los parámetros de trabajo para el modelo a ser analizado, se involucra características tanto del fluido como del modelo involucrado, método de solución y modelos matemáticos pertinentes que permitan aproximar a resultados precisos [27].

❖ **Geometría.**

En el desarrollo del modelo CAD, se realizan o no simplificaciones que permiten suprimir determinados elementos que no son necesarios en el análisis aerodinámico, por lo cual, es probable que se presenten elementos que afecten en gran medida el comportamiento aerodinámico del vehículo, de igual manera, las simplificaciones de elementos del vehículo reducen el costo computacional y la complejidad geométrica del mismo [21], [51].

❖ **Malla.**

En esta etapa del análisis, se procede a generar un mallado de manera adaptativo a la geometría del vehículo, con determinados cambios geométricos en las celdas con la finalidad de adecuar aquellas regiones donde se presentan gradientes elevados o cambios significativos en la superficie del vehículo [52].

❖ **Parámetros de simulación.**

Los parámetros de simulación se dividen en condiciones de contorno y simulación como se muestra en la Tabla 2 [21].

Tabla 2. *Parámetros de simulación.*

Condiciones de Contorno	Simulación
Presión de referencia	Flujo
Temperatura	Tiempo de paso
Modelo de Turbulencia	Números de tiempo de paso
Velocidad de entrada del flujo	Máximas iteraciones por tiempo de paso
Presión relativa de salida	Error deseado

Tomado de: [21].

2.6 Impresión 3D

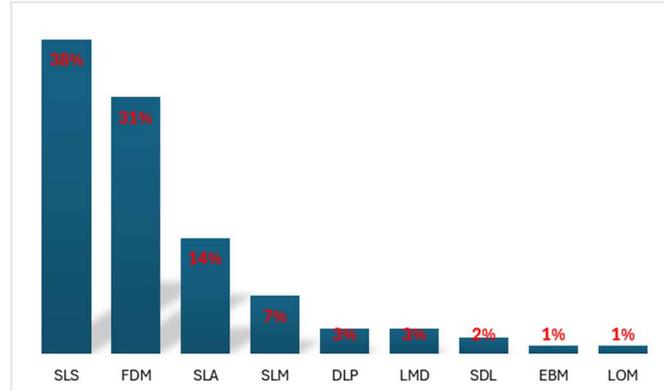
Es el proceso de creación o fabricación de objetos el cual utiliza un material depositado en el cabezal, alguna aguja o cualquier tipo de impresión 3D, previamente utilizando un modelo digital tridimensional creado desde la computadora CAD (Computer Aided Design), la cual puede crearse de forma autorizada mediante un control numérico CNC (Controlled Numerical Control). Esta tecnología inicia mediante la fabricación de un modelo 3D, capa por capa siguiendo el diseño del modelo CAD [53], [54].

La impresión 3D denominada múltiples veces como fabricación aditiva (Proceso de fabricación de una modelado 3D, capa por capa mediante la unión de materiales) es una tecnología muy versátil, ofreciéndole múltiples veneficios como por ejemplo a las empresas, mejorando el rendimiento, fabricación, velocidad de producción y costes [55].

2.6.1 Tipos de Impresión 3D

La impresión 3D cuenta con varios enfoques, pero según una encuesta realizada en el año 2016, existen tres tecnologías principales como se indica en la Figura 14, las cuales son: FDM (extrusión de material), SLS (fusión de polvo) y SLA (polimerización) [45].

Figura 14. *TOP tecnologías de impresión 3D.*

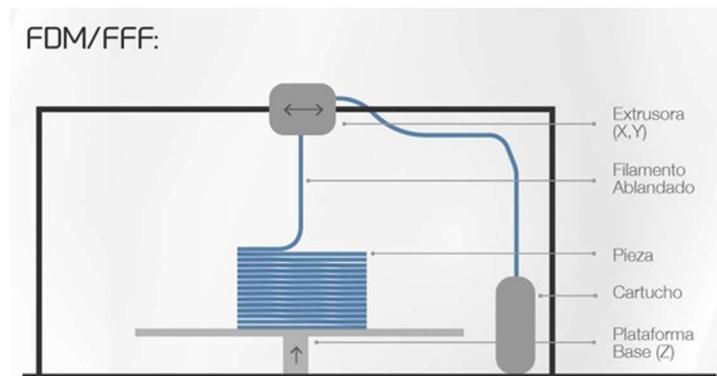


Tomado de: [56].

2.6.1.1 Modelado por deposición fundida.

El Modelado por deposición fundida (FDM), es considerada la más fácil de utilizar para el consumidor, esta impresora FDM, utiliza lo que es un termoplástico ya sea PLA (tiene un mayor rango de colores que se puede utilizar y no necesita de una base de impresión caliente) o ABS (cuenta con mayor resistencia y flexibilidad, se puede lijar, mecanizar, pulir, agujerear, pegar y pintar), el cual se introduce en el cabezal, según se vaya consumiendo, este filamento se va fundiendo capa por capa para crea el objeto como se aprecia en la Figura 15 [57], [58].

Figura 15. *Impresión 3D FDM/FFF.*

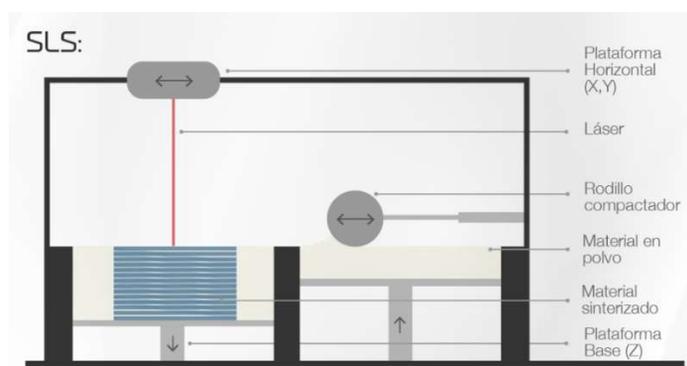


Tomado de: [56].

2.6.1.2 Sinterización selectiva por láser.

En la Figura 16 se puede observar el método de sinterización selectiva por láser (SLS), es lo que más se estableció en contexto industrial y profesional, esta impresión 3D utiliza polvo, como son: Polvo – plástico Nylon (PA12 – PA11) , Alumide, Carbon mide, Glass – filled Nylon y PEBA 230, el láser el cual va calentando y formando el objeto dentro del polvo colocado previamente en una bandeja de la misma, siendo una de las mayores veneficios que cuenta este tipo de impresión 3D, es que las capas de polvo también actúan como soporte de la pieza, aligerando de esta forma la carga del diseño y el esfuerzo al remover la pieza [45].

Figura 16. *Impresión 3D SLS.*



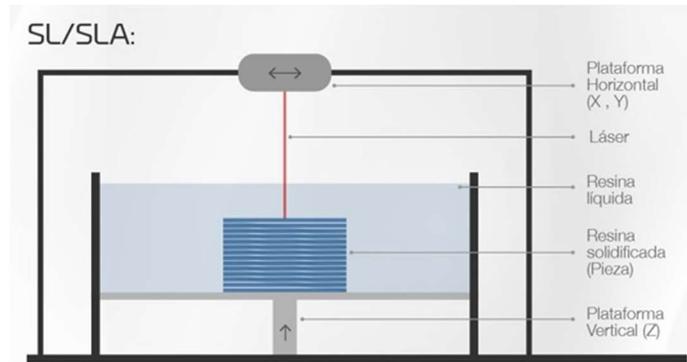
Tomado de: [56].

2.6.1.3 Estereolitografía.

Estereolitografía (SLA), esta máquina de fabricación aditiva utiliza un láser que va endureciendo un polímero líquido (Fotopolímeros líquidos de resina) el cual va formando el objeto capa por capa mediante el movimiento del láser como se observa en la Figura 17.

En la actualidad, las máquinas de fabricación aditiva se diferencian solamente por tres ítems que serían, el material, el cómo se realizan las capas y el cómo se acoplan unas con otras [59].

Figura 17. *Impresión 3D SL/SLA.*



Tomado de: [56].

CAPÍTULO III

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 MATERIALES

3.1.1 Vehículo Fórmula Student

El presente estudio se centra en un vehículo Fórmula *Student*, referenciado como un programa internacional de competición, este programa fue diseñado para impulsar y promover el crecimiento y conocimiento para el desarrollo de la profesión de ingeniería. Este proyecto permite a los estudiantes aplicar de manera práctica sus conocimientos teóricos al diseñar y construir un vehículo monoplaza [60].

Figura 18. Vehículo fórmula *Student*.



Tomado de: [61].

3.1.1.1 Dimensiones.

Las mediadas externas del vehículo se basan en las cotas permitidas en el reglamento de diseño y construcción fórmula *Student*, por ende, la Tabla 3 presenta las medidas exactas del vehículo analizado en la presente investigación.

Tabla 3. *Geometría ext. fórmula Student, tomando en cuenta solo chasis, carrocería y alerón.*

Dimensiones del vehículo fórmula Student	
Alto	1 126 mm
Ancho con Alerón	1 350 mm
Ancho sin Alerón	677 mm
Largo	2 607 mm
Distancia entre ejes	1 530 mm

Tomado de: [62].

3.1.1.2 Especificaciones.

El vehículo utilizado para el análisis pertenece a la sección de vehículos eléctricos, cuyas características técnicas se mencionan en la Tabla 4.

Tabla 4. *Características del vehículo fórmula Student.*

Ficha Técnica del vehículo fórmula Student	
Masa Total	241 kg
Potencia nominal	4 kW
Baterías	12V-12A de Plomo – Ácido (10 unidades)
Tipo de conexión de las baterías	Serie - Paralelo (60V – 24A)
Transmisión	2WD
Velocidad máx.	52,47 km/h
Autonomía	28,8 km
Motor eléctrico	Brushless (2 unidades)
Tipo de motor eléctrico	Sin escobillas con imanes permanentes de 2kW

Tomado de: [62].

3.1.2 MIRACO PRO 3D Scanner

Es importante contar con equipos de alta precisión, portabilidad, versatilidad y velocidad de procesamiento, por lo cual, la correcta elección del dispositivo de digitalización 3D es crucial,

REVOPOINT, empresa vanguardista enfocada en la tecnología de escaneo 3D ha crecido rápidamente y cuenta con dispositivos intuitivos y de alta calidad, el escáner MIRACO PRO 3D es un escáner que cuenta con un algoritmo de visión 3D de alta precisión, por lo que le permite enfatizar detalles pequeños y difíciles de detectar [63].

El escáner MIRACO PRO 3D permite capturar objetos físicos en 3 dimensiones para convertirlos en modelos digitales, este escáner cumple con los requisitos establecidos para esta investigación, ya que, al trabajar con un vehículo Fórmula *SAE*, es necesario que el usuario del escáner tenga movimientos suaves y continuos, evitando así, pausas forzadas por cables o desplazamiento de algún otro componente necesario para seguir con el escaneo.

Figura 19. *MIRACO PRO 3D scanner.*



Tomado de: [63].

3.1.2.1 Especificaciones.

El escáner MIRACO PRO 3D cuenta con capturas precisas de objetos a diferentes tamaños, lo cual, lo hace una herramienta importante para el uso automotriz, en la Tabla 5 se muestra los datos técnicos del escáner.

Tabla 5. Datos técnicos del escáner MIRACO PRO 3D.

Ficha Técnica MIRACO PRO 3D			
Precisión	0,02 a 0,04 mm	Volumen de escaneo mín.	10x10x10 mm
Batería	5 000 mAh	Volumen de escaneo máx.	4x4x4 m
Almacenamiento interno	256 GB	Iluminación auxiliar	Luces infrarrojas, Flash Leds
Memoria (RAM)	16 GB	Procesador	8 núcleos ARM A76, 2.4 GHz, GPU Mali G52
Velocidad de escaneo	Máx. 20 fps	Peso	750 g
Distancia de punto fusionado	Hasta 0,05 mm	Dimensiones	200x50x110 mm
Tipo de escaneo	Independiente con metrología fotogramétrica	Resolución de la cámara RGB	48 MP
Distancia de trabajo	100 a 1 000 mm	Requisitos de energía	DC-7-11V, 5ª. Carga rápida de 65W
Botones	2	Tipo de conector	USB Tipo-C

Tomado de: [63].

3.1.3 Software REVO SCAN 5

El software REVO SCAN 5 es complementario al Scanner MIRACO 3D, cuenta con un amplio número de facilidades, que, permiten un posprocesamiento con mayor velocidad y versatilidad en la alineación y fusión de múltiples modelos 3D. Al ser una aplicación perteneciente a REVOPOINT, utilizable tanto para ordenadores y smartphones, permite realizar tareas complejas de modelado 3D que requieren una gran cantidad de recursos computacionales.

En el software REVO SCAN 5, se puede encontrar herramientas adicionales, estas herramientas no se encuentran en el software integrado en el scanner 3D, por lo cual, la implementación de un mayor número de herramientas implica una mayor facilidad de edición y construcción de mallas de distintos modelos 3D [64].

3.1.4 *Software CAD/CAE*

Las herramientas CAD (Diseño Asistido por Computador) y CAE (Ingeniería Asistida por Computador), son versátiles y contienen una gran variedad de componentes y productos, permite a diseñadores, fabricante, ingenieros, estudiantes, entre otros, la creación y análisis estáticos y dinámicos de modelos 3D, muchos fabricantes desarrollan equipamientos industriales de alta calidad mediante el uso de software CAD/CAE, permitiendo así, reducir costos de desarrollo de un producto, optimizando procesos de fabricación y resolver problemas complejos que se pueden presentar en el diseño.

El software CAD/CAE implementa herramientas de simulación, lo que permite una investigación válida y rigurosa, contribuyendo con, la investigación, identificación y pronta mitigación de posibles fallos que pueda presentar el modelo analizado [65].

3.1.5 *Impresora 3D - ELEGOO SATURN 2*

Elegoo es una empresa visionaria en la impresión 3D, cuenta con una diversidad de impresoras 3D que se adaptan a las necesidades de los usuarios que buscan precios accesibles y altas calidades de impresión. La impresora 3D Elegoon Saturn 2 de resina es una alternativa idónea para la impresión de modelos 3D con un gran número de detalles, la capacidad de imprimir capas

muy delgadas hace que se tenga una transición suave entre las diferentes capas, como resultado, se obtiene superficies lisas y detalladas [66].

Principalmente existen dos tipos de impresión 3D accesibles, por filamento y por resina, al realizar un análisis a un modelo y tener como objetivo una comparativa tangible del modelo real y el modelo digital, es relevante el detalle de la geometría de los dos modelos impresos, por lo cual, la utilización de una impresora 3D de resina es significativa.

Figura 20. *ELEGOO SATURN 2 8K.*



Tomado de: [66].

3.1.5.1 Especificaciones.

En la Tabla 6 se observa los datos técnicos de la impresora 3D utilizada para imprimir el modelo digital modificado completo en escala reducida.

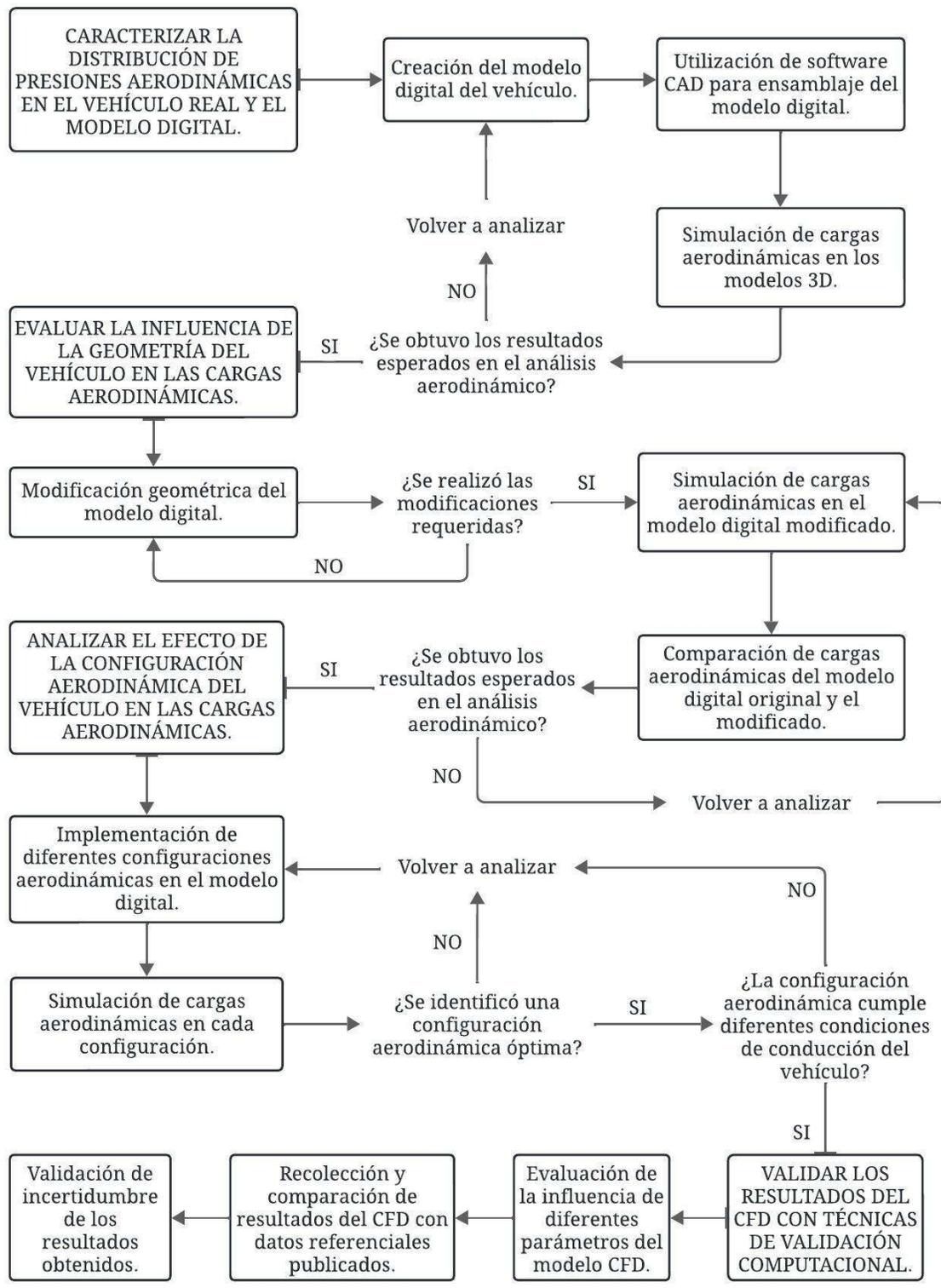
Tabla 6. *Datos técnicos de la impresora 3D de Resina ELEGOO SATURN 2.***Ficha Técnica ELEGOO SATURN 2**

Tamaño Pantalla LCD	10 pulgadas – resolución 8K
Resolución XY	7 680 x 4 320 pixeles
Fuente de Luz	Fresnel collimating light source
Tamaño de Píxel	28,5µm (0,00285mm)
Volumen de impresión	218,88 x 123,12 x 250 mm
Dimensiones	305,9 x 273 x 567,3 mm
Purificador de Aire	Si
Recubrimiento	PFA Release Liner

Tomado de: [66].

3.2 MÉTODOS

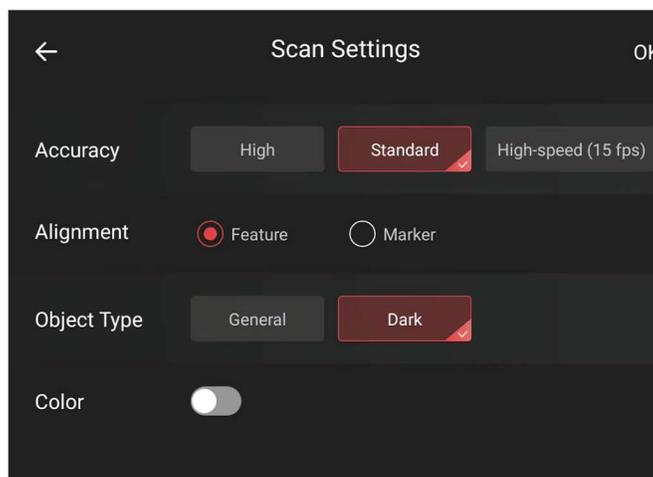
Figura 21. Proceso Metodológico.



3.2.1 Creación del Modelo Digital del Vehículo

Para la creación del modelo digital del vehículo se tomó en cuenta las características principales para un correcto escaneo del vehículo, es decir, el color y el brillo de todos los componentes, estos aspectos son importantes para una correcta configuración del escáner 3D, las configuraciones iniciales establecidas para el correcto escaneo se visualizan en la Figura 22.

Figura 22. Configuración de escaneo.



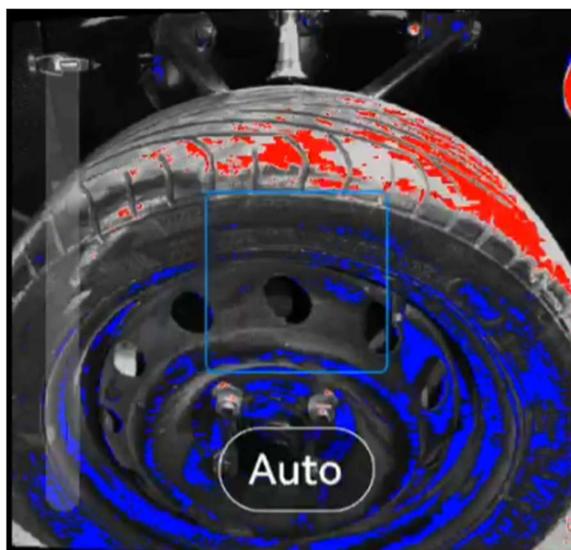
Se puede observar en la Figura 22 tres apartados importantes; precisión, seguimiento y tipo de objeto. Al ser objetos con dimensiones relativamente grandes se toma en cuenta una precisión estándar, ya que, el dispositivo de digitalización 3D tiene como máximo un total de 10 000 fotogramas por escaneo, si se establece la precisión como alta, el movimiento del escáner debe ser más lento, lo que provoca un mayor número de fotogramas y dificulta terminar de escanear el objeto establecido, por otro lado, si se establece la precisión como alta velocidad, los detalles no se toman en cuenta.

Se optó como seguimiento de características y no de marcadores, ya que, en este proceso de escaneo los objetos escaneados contaban con varias características geométricas que el escáner podía identificar y realizar un seguimiento geométrico óptimo.

En el apartado de tipo de objeto, fue importante seleccionar de tipo oscuro, debido al color de la mayoría de elementos escaneados, esta selección es importante ya que permite al escáner capturar mucha más superficie que el de tipo general.

Otro punto importante antes de empezar a escanear un objeto es la exposición de luz, para la presente investigación la exposición de luz se la configuró como automática, ya que, al escanearse en una zona con luz de ambiente controlada aumenta la correcta captura de nube de puntos de la superficie del objeto, este parámetro se toma muy en cuenta para una captura idónea del objeto a escanear como se muestra en la Figura 23.

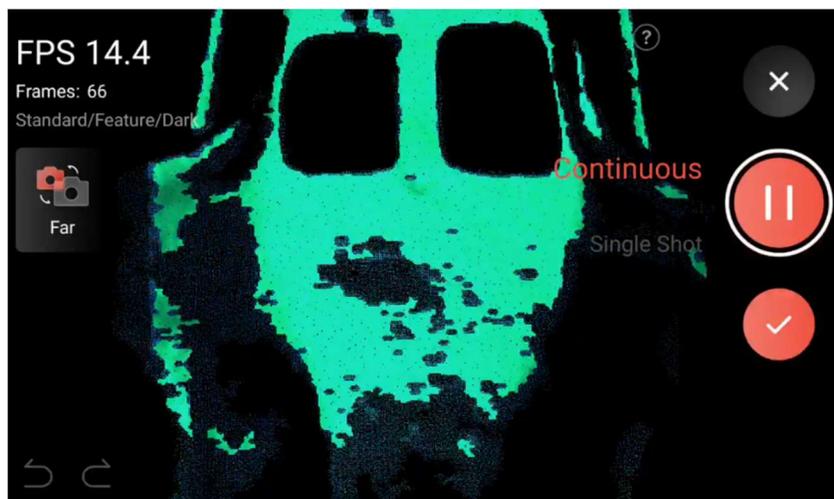
Figura 23. *Exposición de luz de un objeto a escanear.*



En la Figura 23 se puede observar el objeto escaneado en automático con tonalidades de color azul y rojo, el color azul representa subexposición de luz, es decir, poca luz, por otro lado, el color rojo indica sobreexposición de luz (demasiada luz). En la superficie del objeto se debe apreciar el mismo porcentaje de área tanto de la tonalidad roja como azul, este es un indicador para poder capturar el mayor número de puntos superficiales del objeto.

Por último, dos apartados importantes a tomar en cuenta, es el tipo de captura del objeto y la barra indicadora de distancia como se observa en la Figura 24 y Figura 25 respectivamente.

Figura 24. *Tipo de captura de objeto.*



En la Figura 24 se muestra el tipo de captura de objeto, es decir, si se va a realizar el proceso con escaneo continuo o disparo único, para el escaneo continuo, solo se selecciona y si oprime reproducir, con esto, el escaneado es automático y solo se necesita un movimiento geométrico continuo y despacio. Para la opción de disparo único, el uso del escáner 3D se vuelve semejante a una cámara fotográfica, es decir, cada disparo representa un fotograma, para pasar de un fotograma a otro y el escáner reconozca y siga correctamente la geometría, cada siguiente disparo único debe observarse al menos un 30% de superficie del fotograma anterior.

Figura 25. *Barra indicadora de distancia.*

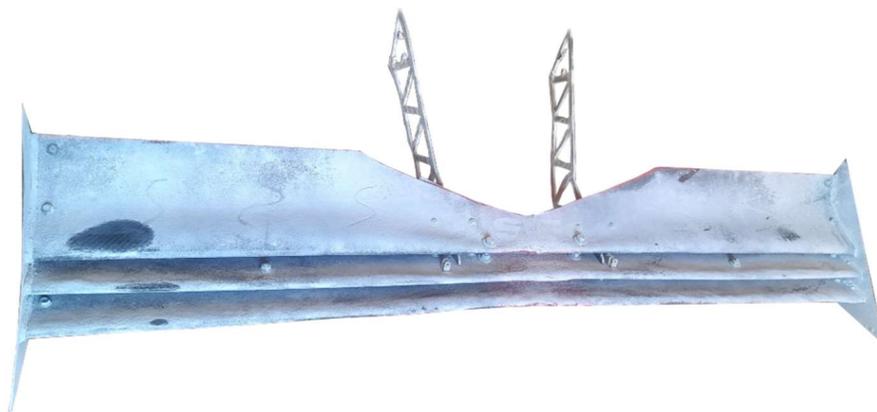


En la Figura 25 se puede apreciar la barra indicadora de distancia, esta barra se divide por varias secciones que representan que tan cerca o lejos se encuentra el lente del escáner y el objeto a escanear, la barra indicadora de distancia se vuelve verde cuando la distancia es excelente o buena, y se vuelve de color rojo cuando la distancia del escáner es, demasiado cerca o demasiado distante del objeto.

3.2.1.1 Alerón delantero.

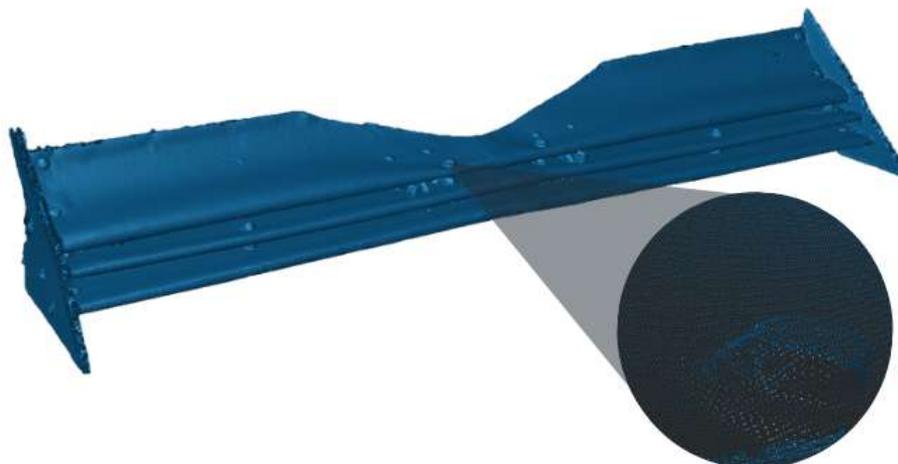
El material de alerón delantero es fibra de carbono, este material se caracteriza por su color oscuro y brillante, para un escaneo correcto fue importante la implementación de talco industrial en la superficie de dicha pieza como se muestra en la Figura 26, el propósito del uso de talco industrial fue para opacar la superficie del alerón, y la nube de puntos se forme correctamente.

Figura 26. *Alerón delantero cubierto con talco industrial.*



Una vez escaneado el alerón delantero del vehículo con las configuraciones ya mencionadas, se obtuvo una nube de puntos que conforma la forma del alerón como se aprecia en la Figura 27.

Figura 27. *Nube de puntos del alerón delantero.*



En la Figura 27 se puede evidenciar la nube de puntos que crea el escáner 3D de la superficie de un objeto, para obtener, una buena calidad, fusión de nube de puntos, detección de superposición de puntos, aislamiento y simplificación, se lo realizó como especifica la Tabla 7.

Tabla 7. *Parámetros de configuración para la edición de la nube de puntos del alerón delantero.*

Configuración de la nube de puntos del alerón delantero		
Fusión de nube de puntos	Distancia de puntos – método avanzado	0,68 mm
Aislamiento	Tasa de aislamiento	15%
Detección de superposición	Distancia de superposición	1,36 mm
Suavizado	Fuerza y veces de suavizado	10
Simplificación	Muestreo descendente uniforme - radio	40%

En la Tabla 7 se refleja los valores utilizados para la edición de nube de puntos del alerón delantero, estos valores se tomaron en cuenta con el objetivo de no perder la calidad de detalles de la superficie del alerón.

3.2.1.2 Nariz del vehículo.

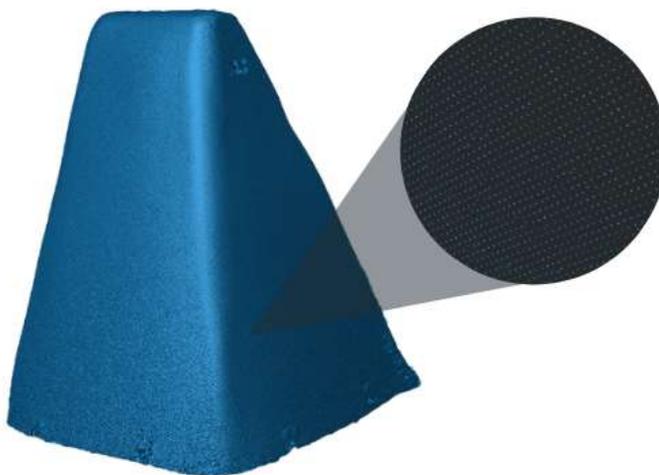
La nariz al ser fabricada del mismo material que el alerón delantero del vehículo, se utilizó talco industrial para opacar la superficie del objeto como se muestra en la Figura 28, con la finalidad de disminuir el brillo de la pieza para obtener un escaneo preciso y continuo.

Figura 28. *Nariz del vehículo cubierta con talco industrial.*



La nube de puntos obtenida en la nariz del vehículo se puede apreciar en la Figura 29, esta nube de puntos se obtuvo de gran calidad, esto debido a las configuraciones realizadas con antelación a la digitalización 3D.

Figura 29. *Nube de puntos de la nariz del vehículo.*



Al ser un elemento más pequeño que el alerón delantero, se tomó diferentes parámetros en la edición de nube de puntos, los criterios tomados en cuenta para la digitalización 3D de la nariz del vehículo se pueden observar en la Tabla 8.

Tabla 8. *Parámetros de configuración para la edición de la nube de puntos de la nariz del vehículo fórmula Student.*

Configuración de la nube de puntos de la nariz		
Fusión de nube de puntos	Distancia de puntos – método avanzado	0,50 mm
Aislamiento	Tasa de aislamiento	10%
Detección de superposición	Distancia de superposición	0,80 mm
Suavizado	Fuerza y veces de suavizado	10
Simplificación	Muestreo descendente uniforme - radio	15%

Los valores presentados en la Tabla 8 son bajos a comparación con los valores del alerón delantero, ya que, la nariz del vehículo es más pequeña que el alerón, este procedimiento se realizó con el propósito de crear una superficie uniforme y de buena calidad.

3.2.1.3 Carrocería y chasis.

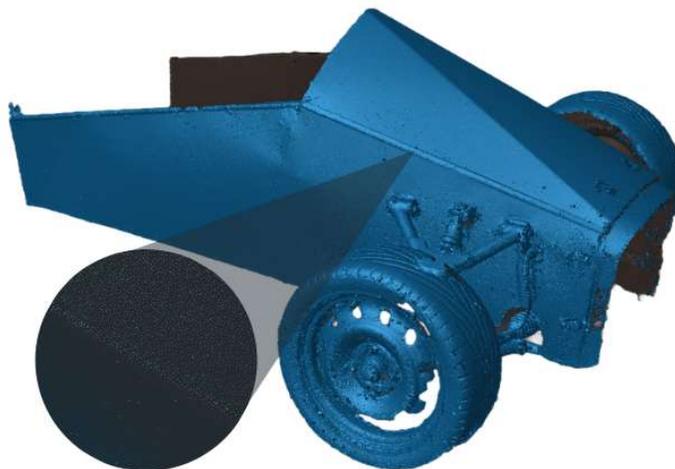
La carrocería del vehículo fue elaborada en base a una plancha de aluminio, las características de este material es su peso y resistencia, lo que lo convierte, en un material muy usado en la industria automotriz. En la digitalización 3D existe una leve dificultad con su digitalización, es decir, el aluminio se caracteriza por su textura brillante, como consecuencia, es necesario el uso de talco industrial o semejantes, en la Figura 30 se detalla el uso del talco industrial en la superficie de la carrocería.

Figura 30. Carrocería y chasis del vehículo fórmula Student cubierto con talco industrial.



De igual forma que el alerón delantero y la nariz del vehículo, se realizó la nube de puntos mediante la digitalización 3D como se evidencia en la Figura 31, específicamente en la carrocería, fue importante mantener una buena estabilidad del escáner 3D, y un desplazamiento estable, ya que, mediante movimientos bruscos del escáner 3D, los fotogramas pueden perder su continuidad y detener la digitalización 3D, debido a que la pieza es geoméricamente considerable.

Figura 31. Nube de puntos de la carrocería del vehículo fórmula Student.



Para los parámetros de edición de la nube de puntos perteneciente a la carrocería del vehículo se tomó en cuenta valores pertenecientes a la Tabla 9.

Tabla 9. *Parámetros de la configuración de la nube de puntos de la carrocería del vehículo fórmula Student.*

Configuración de la nube de puntos de la carrocería

Fusión de nube de puntos	Distancia de puntos – método avanzado	0,66 mm
Aislamiento	Tasa de aislamiento	15%
Detección de superposición	Distancia de superposición	1,70 mm
Suavizado	Fuerza y veces de suavizado	10
Simplificación	Muestreo descendente uniforme - radio	40%

De acuerdo con la Tabla 9, estos valores se seleccionaron debido a la geometría de la carrocería, la distancia de superposición se estableció de 1,7 mm, por motivo del escaneo continuo y repetitivo que se le realizó a la pieza, por lo cual, fue notable la superposición de fotogramas que provocaban un mayor tiempo de renderización, lo cual no era lo óptimo.

3.2.1.4 Asiento del conductor.

Para la digitalización 3D del asiento del conductor, se lo realizó en dos fases, en virtud de que, se presentaron inconvenientes en el desplazamiento del escáner 3D desde la zona frontal a la zona posterior del asiento. Al desplazar el escáner 3D hacia la zona posterior o viceversa el área de digitalización disminuía notablemente, esto no permitía al escáner reconocer la continuidad de la formación de fotogramas, por lo cual, la digitalización 3D se detenía y no permitía una correcta formación de nube de puntos.

Los parámetros establecidos para la nube de puntos tanto para la zona frontal y posterior del asiento del conductor se muestran en la Tabla 10. Se tomó muy en cuenta la tasa de aislamiento en asiento del conductor, tanto en la zona frontal como la posterior, ya que, si la tasa de aislamiento

era mayor al 10 %, zonas determinadas de eliminaban, dando como resultado una pieza incompleta.

Tabla 10. *Parámetros de configuración de la nube de puntos de la zona frontal y posterior del asiento del vehículo fórmula Student.*

Configuración de la nube de puntos del asiento del conductor		
Fusión de nube de puntos	Distancia de puntos – método avanzado	0,68 mm
Aislamiento	Tasa de aislamiento	10%
Detección de superposición	Distancia de superposición	1 mm
Suavizado	Fuerza y veces de suavizado	10
Simplificación	Muestreo descendente uniforme - radio	40%

➤ **Digitalización Frontal;**

Se creó la nube de puntos de la parte frontal del asiento con facilidad, es decir, solamente determinadas zonas del asiento presentaban problemas al digitalizar debido a la superficie brillante, pero esto se pudo controlar con el uso minucioso de talco industrial como se muestra en la Figura 32.

Figura 32. *Asiento cubierto de talco industrial en determinadas zonas brillantes.*



Para la creación de la nube de puntos del asiento del conductor - zona frontal, se la realizó controlando específicamente la luz ambiente, esto permitió identificar detalladamente toda la superficie frontal con facilidad, como resultado se obtuvo la nube de puntos de la parte frontal del asiento como se muestra en la Figura 33.

Figura 33. *Nube de puntos de la zona frontal del asiento.*



➤ **Digitalización Posterior;**

La zona posterior del asiento del conductor del vehículo no presentaba zonas brillantes, por lo cual, no se usó talco industrial para facilitar la digitalización, en la Figura 34 se observa la parte posterior del asiento sin ninguna sustancia añadida en su superficie.

Figura 34. *Zona posterior del asiento del vehículo.*



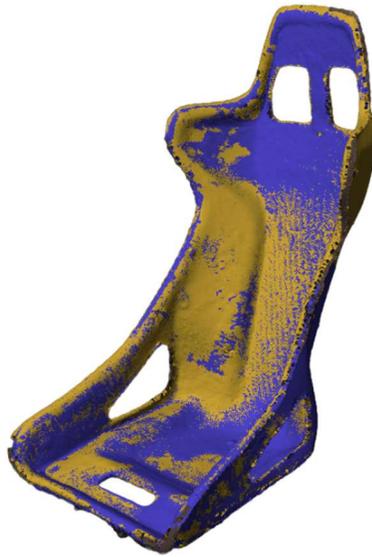
Respecto a la elaboración de la nube de puntos, el proceso y el resultado es el mismo de la zona frontal del asiento del conductor del vehículo como se muestra en la Figura 35.

Figura 35. *Nube de puntos de la zona posterior del asiento.*



Para unir la zona frontal y posterior es necesario la utilización de la función de fusión de modelos, esta función nos permite unir dos o más objetos diferentes que tengan al menos una zona de superposición en común entre ellos del 10%, esta fusión de modelos de pudo llevar a cabo mediante dos métodos, fusión por característica o fusión por marcador. La diferencia de estos dos métodos radica en la forma automática o manual de fusión, es decir el método por características fusiona automáticamente los modelos seleccionados y, por otro lado, el método de fusión por marcador implica marcar puntos semejantes manualmente para alinear los modelos en los puntos correspondientes como se observa en la Figura 36 [64].

Figura 36. *Fusión de la zona frontal y posterior del asiento.*



En la Figura 36 se puede observar la fusión de la zona frontal y zona posterior del asiento del conductor, la superficie de color amarillo es la parte frontal del asiento del conductor, y, la zona de color azul es la parte posterior del asiento. En las partes laterales del asiento se observa tonalidades azules y amarillas, es decir, tanto en la parte frontal como posterior, se digitalizó las zonas laterales, esto con la intención de tener superficies comunes entre las dos partes y poder fusionar correctamente las mismas.

3.2.1.5 Fusión de modelos.

Se creó un modelo 3D único y completo, mediante la combinación de todos los modelos escaneados, con el uso de la función de fusión de modelos, se fusionó todos los modelos realizados y editados como se muestra en la Figura 37, se tomó distintos puntos de la nube como referencia para la correcta alineación de todos los modelos, para ello, la calidad de la nube de puntos de todos los modelos debe ser la misma, por lo tanto, esto facilitó a la alineación de los modelos en base a las características geometrías de cada uno.

Figura 37. Nube de puntos de la fusión de los modelos que componen al vehículo.

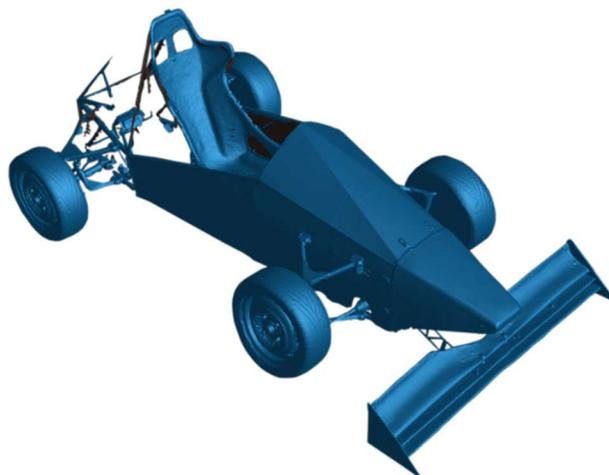


Tabla 11. *Parámetros y configuración de la nube de puntos de la fusión de todos los modelos que componen al vehículo fórmula Student.*

Configuración de la nube de puntos de la fusión de componentes del vehículo		
Fusión de nube de puntos	Distancia de puntos – método avanzado	1,20 mm
Aislamiento	Tasa de aislamiento	5%
Detección de superposición	Distancia de superposición	3,60 mm
Suavizado	Fuerza y veces de suavizado	10
Simplificación	Muestreo descendente uniforme - radio	20%
Calidad de la malla	Tamaño de cuadrícula	2,56 mm

La Tabla 11 menciona todos los parámetros que se tomaron en cuenta para el mallado final del vehículo, los datos presentados en la tabla se establecieron con el propósito de mantener una buena calidad de la malla del modelo fusionado, por otro lado, los recursos computacionales son significativos para una correcta realización y calidad de la malla. En la fusión de nube de puntos del modelo final, la distancia de puntos determinó la calidad y densidad de puntos establecidos para la formación de la malla del modelo, se utilizó una tasa de aislamiento de 5% (relativamente baja), suavizado (10 de fuerza y veces) y una simplificación en un radio del 20%, con la finalidad

de mantener los detalles de todos los modelos complementarios. El tamaño de la cuadrícula de la malla es un factor determinante para obtener una buena calidad de malla, en la fusión de todos los modelos complementarios se tomó en cuenta un tamaño de cuadrícula de 2,5 mm, es decir, una calidad de malla alta considerando el tamaño del vehículo.

3.2.1.6 Reconstrucción parcial de la zona posterior del chasis.

Como se puede observar en la Figura 37, existe una zona faltante en la parte posterior del chasis del vehículo, para ello, la reconstrucción de dicha zona se la realizó mediante la utilización de un software CAD/CAE. Para la reconstrucción se exportó el archivo el formato STL, esto con la intención de abrir, editar y analizar el modelo en el software, en la Figura 38 se evidencia la reconstrucción de la zona faltante del chasis del vehículo, este procedimiento se realizó, con la finalidad de caracterizar el modelo digitalizado al original con la mayor exactitud posible, para la obtención de resultados precisos de las diferentes simulaciones realizadas.

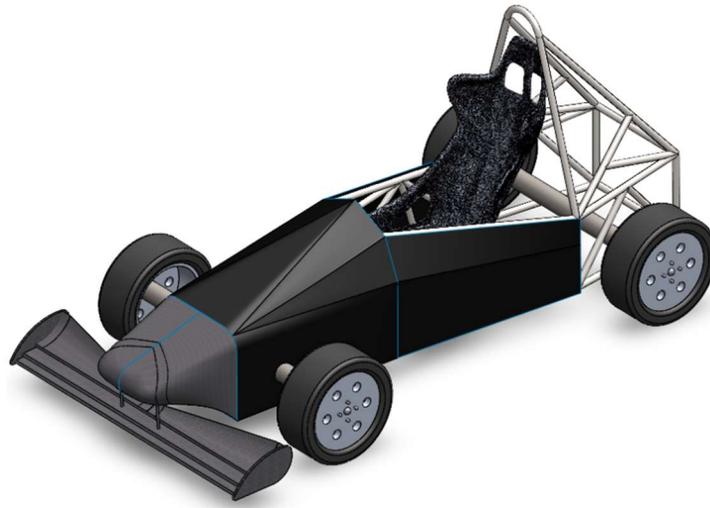
Figura 38. *Reconstrucción de la zona posterior del chasis del vehículo.*



3.2.2 *Reconstrucción e Integración de Elementos en los Modelos 3D*

Tanto el vehículo real como el modelo digital tienen una geometría similar, pero no es la misma, ya que, la principal diferencia de los dos modelos es la forma como se obtuvo el modelo tridimensional, es decir, el vehículo real fue realizado con mediciones manuales utilizando diferentes instrumentos tradicionales de medición como se muestra en la Figura 39, este tipo de mediciones están sujetas a errores de precisión, ya sea por utilización de instrumentos poco precisos o errores humanos. Por otro lado, en la Figura 38 se observa el modelo digital, el cual se lo realizó con herramientas de alta precisión para disminuir notablemente los errores de medición capturando el mayor número de detalles geométricos que influyeron en el análisis aerodinámico.

Figura 39. *Modelo real realizado con mediciones manuales.*

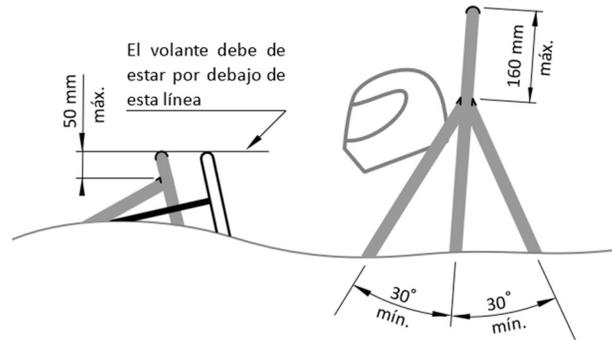


3.2.2.1 **Modelo Real.**

Para el correcto diseño de los diferentes elementos adicionales en los modelos 3D, se tomó en cuenta los requisitos generales de diseño del reglamento técnico fórmula *Student*, tanto para el modelo real y digital, se añadió elementos esenciales tales como; volante, motor eléctrico y una representación a escala real de un piloto promedio (*Dummy*) con su respectivo casco para asemejar

una conducción real. En la Figura 40 se evidencia el rango de altura mínima y máxima tomada en cuenta para el diseño e incorporación del volante en los modelos 3D.

Figura 40. *Requisitos geométricos del volante y estructura posterior.*



Tomado de: [67].

La Figura 41 muestra la integración de los diferentes elementos cruciales anteriormente mencionados para un correcto análisis aerodinámico.

Figura 41. *Configuración geométrica del modelo real.*



3.2.2.2 Modelo Digital Base.

Para la agregación de los distintos elementos indispensables para el análisis aerodinámico, se diseñó y reconstruyó los elementos considerando la construcción previa del vehículo, el volante y el motor eléctrico fueron los elementos reconstruidos como se observa en la Figura 42, por otro

lado, el *Dummy* fue elaborado con una dimensión corporal de percentil P90, es decir que el 90% de la población tiene una dimensión corporal igual o menor, el percentil P90 es utilizado en la industria automotriz para el diseño y fabricación de vehículos [68].

Figura 42. *Complementación de componentes en el modelo digital base.*



3.2.3 Configuraciones Geométricas del Modelo Digital Base

Se realizó diferentes configuraciones aerodinámicas para el presente análisis, todas las configuraciones fueron realizadas solamente al modelo digital con énfasis en el reglamento técnico de diseño y construcción de un vehículo fórmula *Student*.

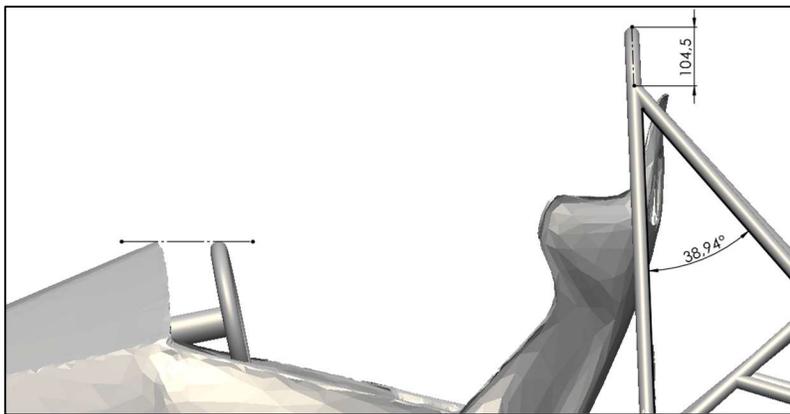
Las configuraciones geométricas realizadas en el modelo digital base se dividen en, variaciones geométricas y configuraciones aerodinámicas, las modificaciones geométricas se efectuaron para comprender la distribución de cargas aerodinámicas y optimizar la geometría del vehículo para mejorar su rendimiento aerodinámico.

3.2.3.1 Variaciones Geométricas.

En las variaciones geométricas de distintos elementos del vehículo se cambió la geometría y altura considerando el reglamento técnico, la distancia vertical del volante con respecto a una línea horizontal coincidente con la parte más alta de la carrocería es 0 mm, lo cual, es permitido.

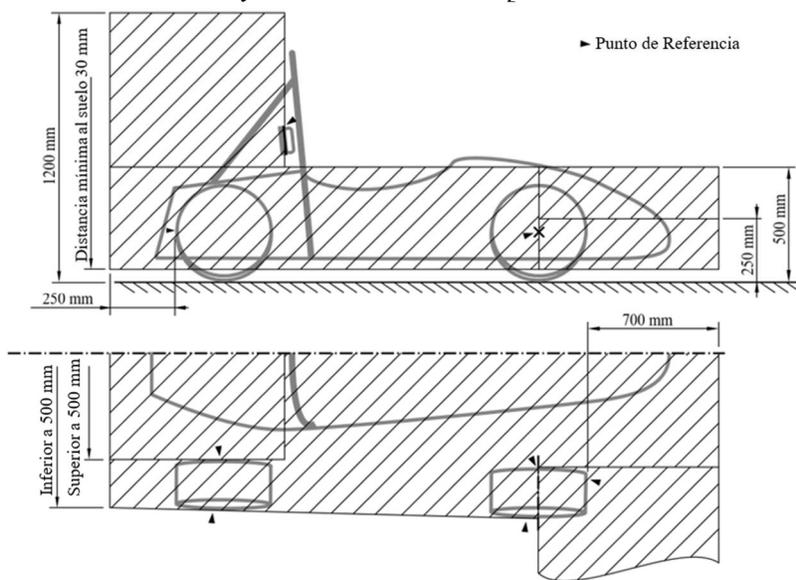
Las dimensiones de la estructura ubicada en el espaldar del piloto son correctas ya que se encuentran dentro de los rangos establecidos, como se muestra en la Figura 43.

Figura 43. Variación geométrica del modelo digital ajustado.



Se cambió la altura estática mínima de la parte más baja del vehículo con respecto al suelo, exceptuando las ruedas. La altura estática mínima debe ser de 30 mm como se aprecia en la Figura 44, en la modificación de altura estática del modelo digital base se tomó la distancia mínima establecida (30 mm).

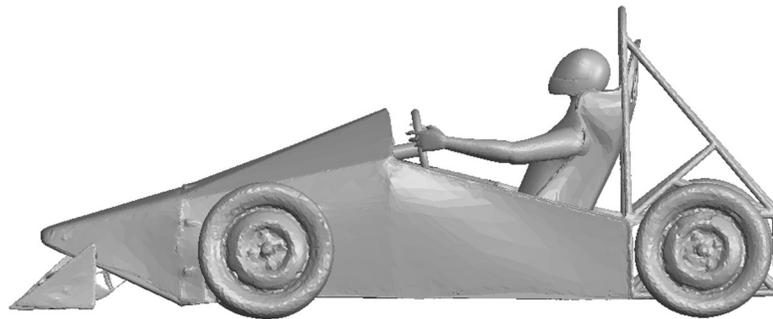
Figura 44. Distancias y áreas establecidas para el diseño del vehículo.



Tomado de: [67].

Por otro lado, se cambió la altura del alerón con respecto al suelo, inicialmente la parte más baja del alerón no era colineal a la parte más baja de la carrocería del vehículo, por lo cual, se ajustó la altura del alerón para poder disminuir la distancia de cualquier parte del vehículo respecto al suelo. También se realizó ajustes geométricos en la nariz del vehículo, ya que, presentó una inclinación en la parte baja y perfiles perpendiculares, lo que era poco efectivo en el correcto flujo del aire, se realizó un perfil continuo y tangencial respecto a la parte externa del piso del vehículo lo que facilitó la canalización eficiente del flujo de aire hacia la parte baja del vehículo como se observa en la Figura 45.

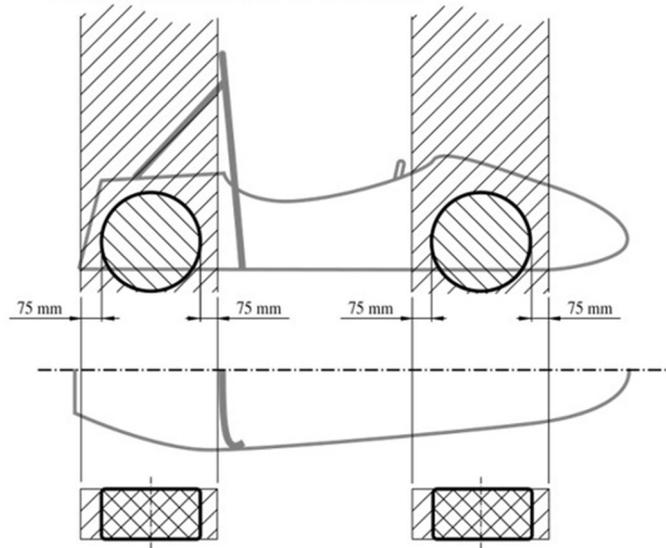
Figura 45. *Modelo digital ajustado.*



3.2.4 Configuraciones Aerodinámicas del Modelo Digital Ajustado

Los vehículos fórmula *Student* deben ser diseñados de cabina y ruedas abiertas, es decir, para ruedas abierta no debe existir ningún componente o dispositivo dentro del área indicada como se evidencia en la Figura 46, y, para cabina abierta el vehículo debe tener una estructura donde la parte superior no esté completamente cubierta.

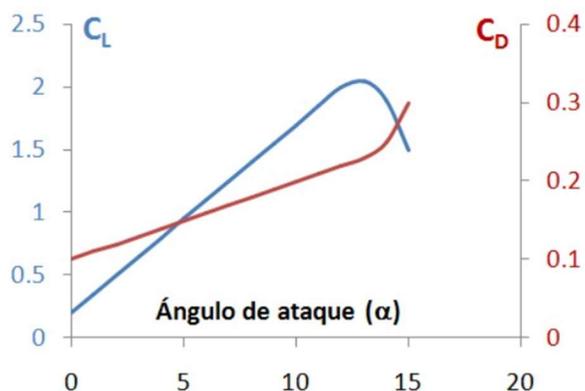
Figura 46. Áreas restringidas para dispositivos o componentes del vehículo.



Tomado de: [67].

Para el diseño de los dispositivos aerodinámicos es importante entender las restricciones para dichos dispositivos, restricciones como, altura, ancho, longitud, estabilidad y fuerza, en la Figura 44 y Figura 46 se observa las dimensiones máximas y posiciones permitidas de los dispositivos aerodinámicos. En ángulo de ataque de los alerones es determinante para disminuir o aumentar los coeficientes C_L y C_D como se muestra en la Figura 47, para la presente investigación se escogió ángulos de ataque en un rango de 12 a 14° con la finalidad de aumentar la carga aerodinámica sin aumentar excesivamente la resistencia al avance [69].

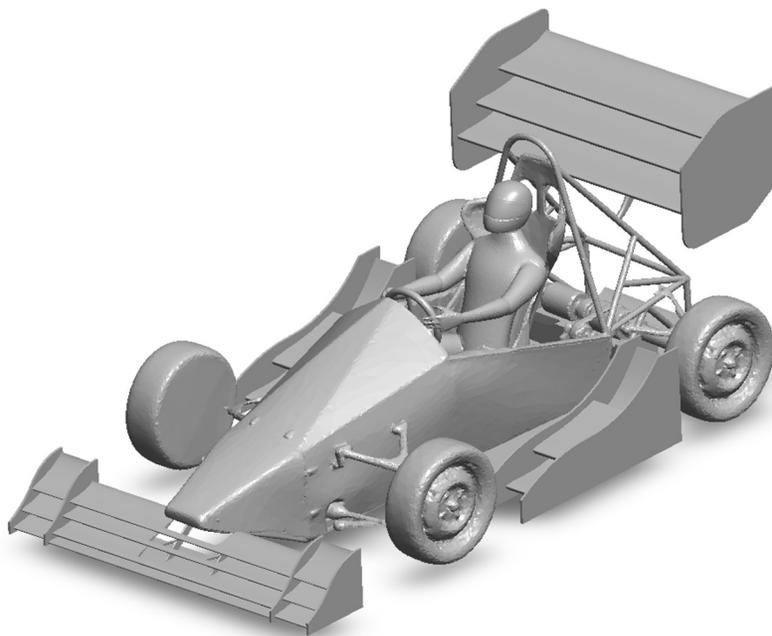
Figura 47. *Ángulo de ataque para alerones de competencia.*



Tomado de: [70].

Los dispositivos aerodinámicos son diseñados para guiar de forma óptima el flujo de aire alrededor del vehículo, teniendo como objetivo aumentar la carga aerodinámica y disminuir la resistencia al avance, en la presente investigación se optó por la utilización de dispositivos aerodinámicos tales como, alerón anterior y posterior, difusor y deflectores laterales como se aprecia en la Figura 48.

Figura 48. *Modelo digital modificado.*



3.2.5 Configuraciones de Entorno Aerodinámico para los modelos 3D

En el análisis aerodinámico se identificó las variables de cada modelo digital que intervienen en el estudio aerodinámico, para cada modificación geométrica realizada se creó un dominio computacional individual, y, se establecieron las mismas condiciones de contorno para cada configuración geométrica.

3.2.5.1 Creación del dominio computacional.

La caracterización del dominio computacional debe de tener un tamaño suficientemente grande para garantizar la interacción del fluido en regiones alejadas del vehículo, pero, el dominio no debe ser excesivamente grande ya que innecesariamente aumenta el tiempo de cálculo computacional. Para el tamaño adecuado del dominio computacional se estableció en términos de las dimensiones del modelo Ahmed, como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. *Tamaño del dominio computacional.*

Dimensionamiento del Dominio Computacional	
Distancia	Dimensiones
Entrada	3 veces el largo del vehículo
Salida	7 veces el largo del vehículo
Ancho	2 veces el ancho del vehículo (a cada lado)
Altura	5 veces el alto del vehículo

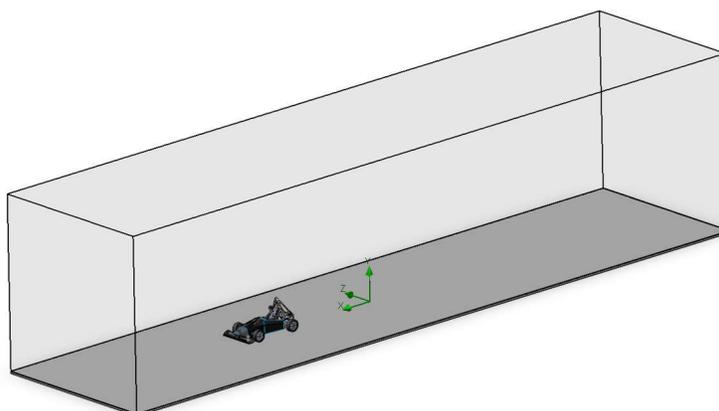
Tomado de: [71].

Una vez caracterizadas las dimensiones adecuadas para el análisis aerodinámico, se estableció las dimensiones del vehículo teniendo en cuenta las medidas externas totales, es decir, las cotas H100, W103, y L103. En la Tabla 13 se puede observar las cotas de altura, ancho y largo con el tamaño del dominio computacional respectivamente.

Tabla 13. Dimensiones de los modelos y dominios computacionales.

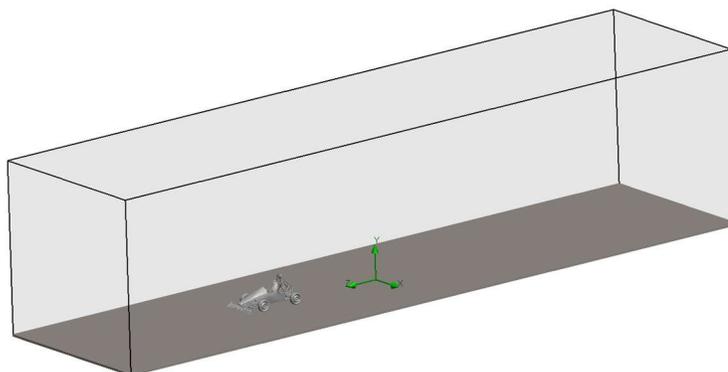
Modelo	Cotas del Vehículo		Tamaño del dominio computacional		
	<i>mm</i>	<i>m</i>	<i>mm</i>	<i>m</i>	
Real	H100	1 214,35	1,21	7 286,10	7,28
	W103	1 350	1,35	6 750	6,75
	L103	2 606,77	2,60	28 674,47	28,67
Digital base	H100	1 213,30	1,21	7 279,81	7,27
	W103	1 546,26	1,55	7 731,31	7,73
	L103	2 797,80	2,80	30 775,87	30,77
Digital ajustado	H100	1 110,4	1,11	6 662,4	6,66
	W103	1 546,26	1,55	7 731,31	7,73
	L103	2 797,80	2,80	30 775,87	30,77
Digital modificado	H100	1 200	1,2	7 200	7,20
	W103	1 546,26	1,55	7 731,31	7,731
	L103	2 981,94	2,98	32 801,34	32,80

La Figura 49 muestra la caracterización del dominio computacional realizada en el software CAD/CAE con el uso de las dimensiones calculadas anteriormente para el tamaño del dominio para el modelo real.

Figura 49. Dominio computacional del modelo real.

En la Figura 50 se aprecia el dimensionamiento del dominio computacional perteneciente al modelo digital base con las cotas respectivas mencionadas en la Tabla 13.

Figura 50. *Dominio computacional del modelo digital base.*



3.2.5.2 Condiciones de Contorno.

Las condiciones de contorno son los parámetros de simulación establecidos dentro del dominio computacional para definir como el vehículo interactúa con su entorno, por lo cual, se estableció variables de contorno como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14. *Condiciones de contorno para los modelos 3D.*

Condiciones de Contorno	
Presión de Referencia	1 atm
Temperatura	20 °C
Gravedad	9,81 m/s ²
Velocidad de entrada del flujo	120 km/h
Tipo de análisis	Externo
Tipo de Flujo	Laminar - Turbulento

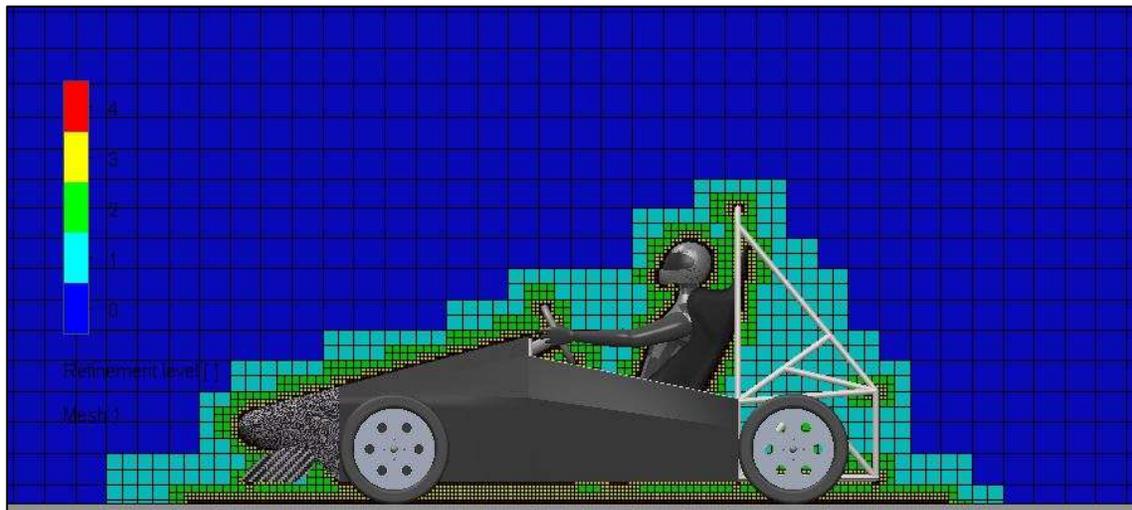
Una vez configuradas las condiciones de contorno y el dominio computacional, se procedió a establecer los objetivos o metas para el análisis computacional, estos objetivos son parámetros

de interés que se desea visualizar en los resultados de la simulación, datos de interés seleccionados; velocidad, presión, turbulencia, coeficientes aerodinámicos, fuerza en el eje longitudinal y fuerza de sustentación del vehículo.

3.2.5.3 Malla CFD.

El mallado utilizado para el análisis es indispensable para obtener resultados óptimos, por ende, se utilizó una configuración de malla automática de nivel 5, permitiendo un mallado más fino. Por otro lado, también se utilizó la herramienta de mallado local, la que permite realizar un control de malla en superficies que se encuentran en contacto directo con el fluido, se realizó un refinamiento de las celdas entre el límite del fluido y el vehículo de nivel 4 como se muestra en la Figura 51, esto con el objetivo de ajustar el tamaño de la malla en áreas específicas del vehículo que requieren una mayor precisión para la obtención de resultados detallados.

Figura 51. *Refinamiento del mallado computacional modelo base.*



CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Simulación y Comparación de Cargas Aerodinámicas en los Modelos 3D

Para obtener del coeficiente de arrastre y de sustentación se calculó las áreas de interés, en la Tabla 15 se observa las áreas frontales (Af.) y áreas alares (Aa.) calculadas.

Tabla 15. Áreas frontales y alares de los modelos 3D.

Modelo	Af. (m ²)	Aa. (m ²)
Real	0,73	0,27
Digital Base	0,91	0,31
Digital Ajustado	0,87	0,31
Digital Modificado	1,13	1,64
	Alerón frontal: 0,55	Alerón posterior: 1,09

4.1.1 Modelo Real y Modelo Digital Base

Los datos de las áreas del modelo real y el modelo digital base mostrados en la Tabla 15 no coinciden, esto sucede debido al tipo de medición efectuado en cada modelo, el modelo real se realizó con la utilización de instrumentos tradicionales de medición, y, por otro lado, los modelos digitales se conformaron con herramientas de medición de alta precisión.

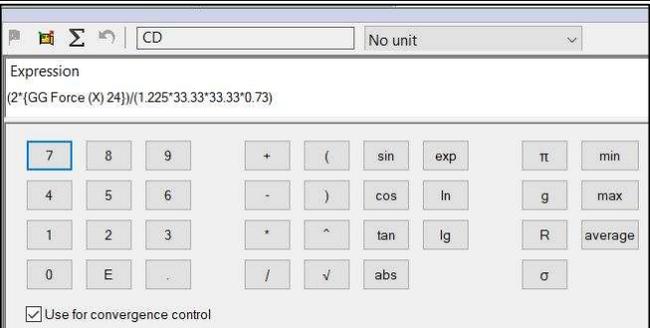
Tabla 16. Resultados CFD del modelo real y digital base.

Parámetros		Modelo Real			Modelo Digital Base		
		mín.	prom.	máx.	mín.	prom.	máx.
Presión estática		99,56	101,28	102,99	99,712	101,28	104,2
Presión dinámica	[kPa]	0	0,659	1,82	0	0,66	1,55
Presión total		99,56	101,94	103,48	99,71	101,94	104,97
Velocidad		0	118,93	197,91	0	118,99	183,18
Velocidad longitudinal	[km/h]	-182,4	-118,91	81,57	-182,57	-118,97	92,07
Velocidad vertical		-151,5	0,12	132,67	-153,43	0,11	153,07
Fuerza			627,4			714,57	
Fuerza longitudinal	[N]		626,6			707,46	
Fuerza vertical			-27,09			-99,76	
Intensidad de turbulencia	[%]		0,37			0,33	
Número Mach			0,10			0,15	
CL	[]		-0,06			-0,16	
CD			1,262			1,14	
CL Alerón delantero			-0,50			-0,44	

La Tabla 16 muestra los datos de interés calculados en el análisis aerodinámico del modelo real y modelo digital base, para el cálculo del coeficiente de arrastre y coeficiente de sustentación no es necesario la realización de cálculos externos al software CFD, en el apartada de metas, se

inserta una ecuación en la cual se digita la ecuación deseada y se selecciona las variables de interés, en la Tabla 17 se puede observar un ejemplo de la realización de las ecuaciones en el software CFD.

Tabla 17. Aplicación de fórmulas en el CFD.

Ecuación	Implementación
$C_D = \frac{2 * R_A}{\rho * V^2 * A_f}$	 <p>The screenshot shows a software interface for defining an expression. The title bar includes a calculator icon, a summation symbol, and the variable 'CD'. The 'Expression' field contains the formula: $(2 * \text{GG Force (X) 24}) / (1.225 * 33.33 * 33.33 * 0.73)$. Below the field is a keypad with buttons for digits 0-9, mathematical operators (+, -, *, /, ^, sqrt), and trigonometric functions (sin, cos, tan, ln, exp, lg). There are also buttons for pi, min, max, average, and sigma. A checkbox at the bottom is labeled 'Use for convergence control'.</p>

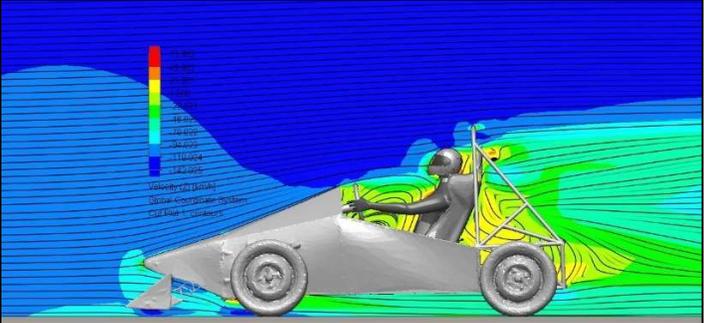
4.1.1.1 Velocidad-Turbulencia.

La Tabla 18 muestra el comportamiento aerodinámico de los modelos 3D analizados, desde una vista lateral se observa la velocidad y trayectoria del aire, la velocidad máxima del modelo digital es mayor a la velocidad máxima del modelo real en un 8,52%, por lo cual, el número de mach es mayor en el modelo digital.

La intensidad de turbulencia en el modelo real es de 0,37 respecto al 0,33 % del modelo digital base, es decir, en el modelo real existe una mayor cantidad de fluctuación de la velocidad del viento en todo el vehículo, por ello, el aumento de la velocidad máxima es un 12,12 % respecto al modelo digital base.

El número de mach indica cuando un vehículo alcanza velocidades cercanas o mayores a la velocidad del sonido, en el modelo real y modelo digital base se determinó un flujo subsónico, debido a que el número de mach en cualquier modelo es menor a uno.

Tabla 18. *Velocidad y trayectoria, vista lateral modelo real y digital base.*

Ilustración	Variables	Valores
Modelo Real		
	Velocidad máxima	68,17 km/h
Modelo Digital Base		
	Velocidad máxima	73,98 km/h

En la Tabla 18 se visualiza la trayectoria del flujo de aire de los modelos mencionados, se analizaron en las mismas condiciones de contorno, por ende, se puede determinar que el compartimiento de potencia y cabina son las zonas de mayor turbulencia en los vehículos fórmula *Student*, en términos aerodinámicos estos espacios son perjudiciales.

Tabla 19. Velocidad y trayectoria, plano de sección modelo real y digital base.

Ilustración	Variables	Valores
Modelo Real		
	Velocidad máxima	44,48 km/h
Modelo Digital Base		
	Velocidad máxima	41,53 km/h

Se realizó un plano de sección paralelo a la vista lateral para enfatizar el comportamiento de flujo de aire en las ruedas y parte del alerón delantero, en la Tabla 19 se observa la alta turbulencia existente en las zonas posteriores de los neumáticos, lo cual, aumenta la resistencia al avance y disminuye la estabilidad del vehículo a velocidades altas.

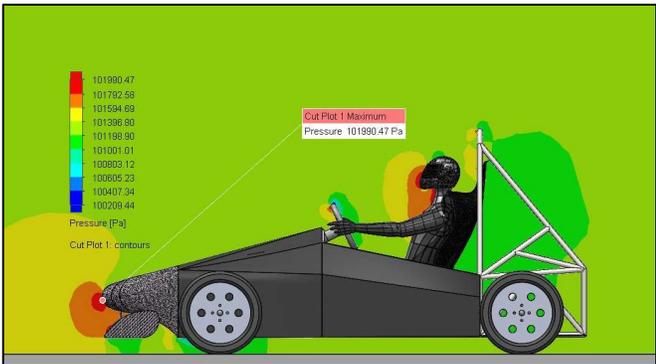
En el plano de sección mencionado con anterioridad se compara las velocidades máximas de los modelos, por lo tanto, el modelo real presenta un aumento del 7,1 %, donde se verifica que existe una mayor turbulencia incluso entre el alerón y los neumáticos delanteros del vehículo, algo que no se percibe claramente en el modelo digital base.

4.1.1.2 Presión-Fuerza.

Las altas variaciones de presión que ejerce el flujo de aire a la superficie del vehículo disminuyen notablemente la eficiencia aerodinámica del mismo, principalmente la elevada concentración de presión en superficies transversales a la trayectoria del flujo de aire conlleva a un aumento de la resistencia aerodinámica lo cual es desfavorable.

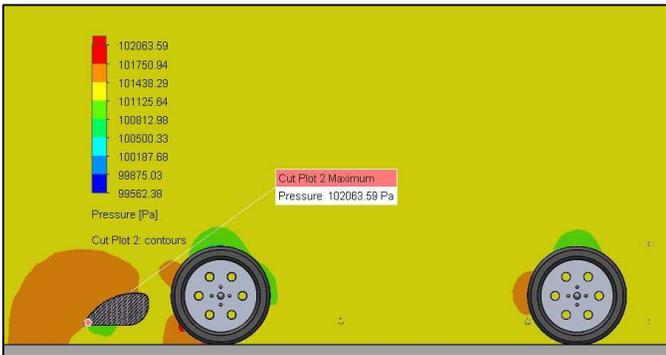
La Tabla 20 muestra las presiones máximas de los dos modelos del vehículo en una vista lateral y las superficies más afectadas, se puede observar zonas de concentración de presión en la zona del torso del *Dummy* y la nariz del vehículo, esta concentración de presión se efectúa debido a la forma e inclinación de las superficies de los modelos. La presión máxima del modelo digital base es mayor en un 0,19% debido a la variación de forma existente entre los dos vehículos.

Tabla 20. Presión, vista lateral modelo real y digital base.

Ilustración	Variables	Valores
Modelo Real		
	Presión máxima	101 990 Pa
Modelo Digital Base		
	Presión máxima	102 182 Pa

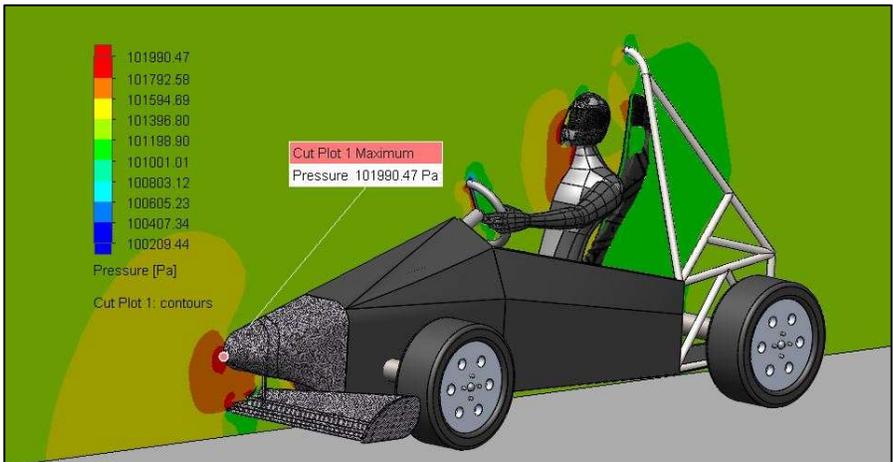
En el plano de sección mostrado en la Tabla 21 se visualiza las zonas de concentración de presión de los modelos, las zonas más afectadas son el alerón delantero y zonas frontales de las ruedas, en donde, la presión máxima del modelo real es de un 0,18% mayor al modelo digital, estas zonas se tomaron en cuenta para la construcción del alerón frontal e incorporación de deflectores laterales en el modelo digital modificado.

Tabla 21. Presión, plano de sección modelo real y digital base.

Ilustración	Variables	Valores
Modelo Real		
	Presión máxima	102 063 Pa
Modelo Digital Base		
	Presión máxima	101 877 Pa

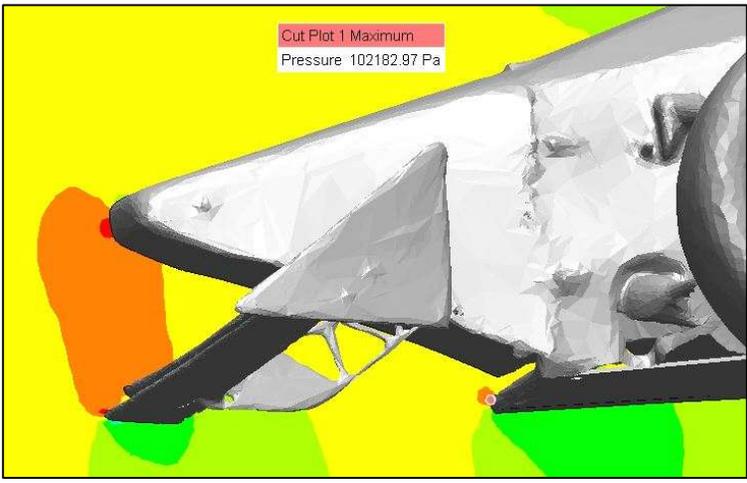
En la Figura 52 se evidencia que el punto de mayor influencia de presión en el modelo real, esto ocurre en el extremo anterior de la nariz, señalando el punto de mayor influencia de presión, es decir, es la zona de mayor resistencia al avance en la vista lateral del vehículo.

Figura 52. Punto máximo de presión del modelo real.



El punto de mayor incidencia de presión en el modelo digital base se encuentra en la parte baja de la nariz, debido a la construcción de esta, cuenta con determinadas aberturas que influyen en el trayecto del flujo de aire dirigiéndolo de manera que provocan zonas de alta presión aumentando la resistencia aerodinámica como se muestra en la Figura 53.

Figura 53. Punto máximo de presión del modelo digital base.



4.1.1.3 Eficiencia Aerodinámica.

Para determinar la eficiencia aerodinámica del modelo real y el modelo digital base solamente se toma en cuenta los coeficientes de arrastre y sustentación obtenidos en las mismas condiciones de contorno:

Tabla 22. *Eficiencia aerodinámica del modelo real y digital base.*

	Modelo Real	Modelo Digital Base
C_L	0,06	0,16
C_D	1,26	1,14
η_A	$\frac{0,06}{1,26}$	$\frac{0,16}{1,14}$
	0,047	0,14

La Tabla 22 muestra la eficiencia aerodinámica del modelo real y el modelo digital base, como resultado, el modelo digital base tiene una mejora aerodinámica del 198% respecto al modelo real.

4.1.2 *Modelo Digital Base y Modelo Digital Ajustado*

La principal diferencia entre estos dos modelos digitales es que, el cambio geométrico significativo del modelo digital ajustado no es la posición del volante o del alerón anterior. El cambio geométrico significativo en términos aerodinámicos es la altura del piso del vehículo y la calzada, esta altura es de 30 mm, lo cual disminuye notablemente la altura original del mismo (104 mm), al ser mínimo el espacio del vehículo respecto a la calzada se crea un efecto de succión, es decir, la presión disminuye al reducir el espacio de flujo de aire debajo del vehículo, lo cual lo mantiene adherido con mayor fuerza a la calzada, este efecto es denominado el efecto Suelo y se basa en el teorema de Bernoulli.

La Tabla 23 presenta los parámetros de interés analizados para el modelo digital ajustado.

Tabla 23. Resultados CFD del modelo digital ajustado.

Parámetros	Modelo Digital Ajustado		
	mín.	prom.	máx.
Presión estática	99,879	101,28	103,92
Presión dinámica	[kPa]	0	0,65
Presión total		99,88	101,94
Velocidad		0	118,93
Velocidad longitudinal	[km/h]	-180,70	-118,92
Velocidad vertical		-137,90	0,12
Fuerza			732,72
Fuerza longitudinal	[N]		673,01
Fuerza vertical			-289,59
Intensidad de turbulencia	[%]		0,34
Número Mach			0,15
CL			-0,49
CD	[]		1,13
CL Alerón delantero			-0,94

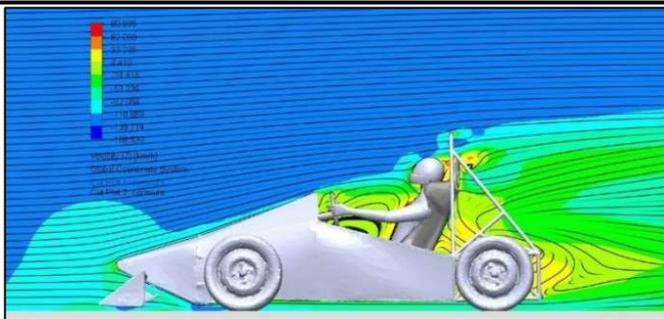
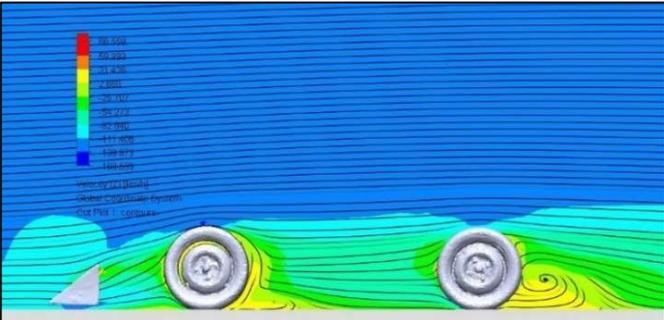
4.1.2.1 Velocidad-Turbulencia.

La velocidad del modelo digital ajustado respecto al plano lateral mostrado en la Tabla 24 aumenta en 20% en comparación con el modelo digital base, debido parcialmente a la reducción de la distancia al suelo, creando el efecto suelo. Las zonas con mayor velocidad de flujo de aire siguen siendo el compartimiento de potencia y la zona de la cabina debido a la turbulencia que se crea.

En el plano de sección paralelo creado para visualizar el comportamiento del aire en las ruedas y parte del alerón delantero como se observa en la Tabla 24 perteneciente al modelo digital

ajustado, se visualiza las zonas de mayor velocidad de la corriente de aire, en comparación con el modelo digital base, se modificó la altura ligeramente provocando un aumento de la velocidad máxima hasta 88,56 km/h representando un incremento del 113,2%. Los dos vehículos cuentan con un número de mach de 0,15 lo cual indica un flujo subsónico.

Tabla 24. *Velocidad y trayectoria, modelo digital ajustado.*

Ilustración	Variables	Valores
	Velocidad máxima	88,8 km/h
	Velocidad máxima	88.56 km/h

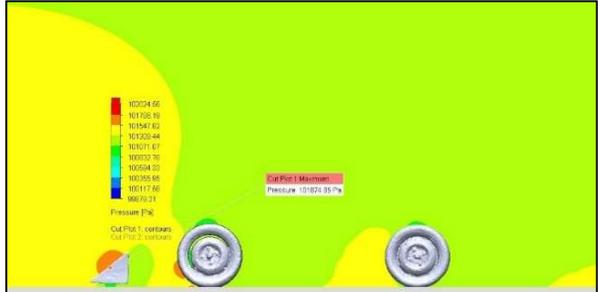
4.1.2.2 Presión-Fuerza.

La fuerza longitudinal del modelo ajustado disminuye en un 4,87% principalmente debido a la reducción del área frontal respecto al modelo base como se muestra en la Tabla 23 y Tabla 16, y se tiene como resultado una disminución en la resistencia aerodinámica lo cual es factible ya que el vehículo requiere menos fuerza para mantener o aumentar su velocidad.

Las presiones máximas mostradas en la Tabla 25 no varían notablemente con el modelo base debido a la forma del vehículo, en los dos modelos digitales es la misma. Se puede observar que las zonas de presión máxima son las mismas zonas en los dos modelos exceptuando que, los

puntos máximos de presión en las vistas laterales de los vehículos no están situados en las mismas superficies.

Tabla 25. Presión máxima, modelo digital ajustado.

Ilustración	Variables	Valores
	Presión máxima	102 024 Pa
	Presión máxima	101 874 Pa

El punto máximo de presión en la vista lateral del modelo digital ajustado no se encuentra en las aberturas de la nariz del vehículo como se observa en la Figura 53, uno de los cambios realizados en el modelo ajustado fue sellar las aberturas existentes en la nariz como se muestra en la Figura 54.

Figura 54. Punto máximo de presión, modelo digital ajustado.



Los cambios realizados en el modelo ajustado se realizaron con énfasis en la fuerza de sustentación, es decir, presentar evidencia de la importancia de las cargas aerodinámicas en los vehículos de competencia, mejorando la sustentación con ligeras configuraciones geométricas.

4.1.2.3 Eficiencia Aerodinámica.

Llegar a un equilibrio aerodinámico es fundamental para obtener altas cargas aerodinámicas sin comprometer demasiado el área frontal y forma del vehículo provocando un aumento exagerado de la resistencia aerodinámica, en la Tabla 26 se muestra la eficiencia aerodinámica del modelo ajustado, como resultado mediante los ligeros cambios geométricos realizados al modelo base se aumentó la eficiencia aerodinámica en un 207%.

Tabla 26. *Eficiencia aerodinámica del modelo digital ajustado.*

Modelo Digital Ajustado	
C_L	0,49
C_D	1,13
η_A	$\frac{0,49}{1,13}$
	0,43

4.1.3 *Modelo Digital Ajustado y Modelo Digital Modificado*

En esta comparación al modelo ajustado se le agregó diferentes dispositivos aerodinámicos que influyen en el aumento de la carga aerodinámica, en la presente configuración se aprovecha la tercera ley de Newton, la cual afirma que, el flujo de aire al tener contacto con la superficie de sustentación de los dispositivos aerodinámicos y ser desviado ejerce una fuerza vertical hacia el suelo lo que provoca un efecto de acción y reacción, esta fuerza es aprovechada para que el

vehículo de competencia se mantenga adherido a la calzada y pueda aumentar su velocidad especialmente en curvas produciendo una mejora en su estabilidad.

En la Tabla 27 se observa los resultados obtenidos en el análisis aerodinámico del modelo digital modificado en diferentes velocidades, tomando como referencia las velocidades máximas y medias en las competiciones de vehículos fórmula *Student* [72], [73].

Tabla 27. Resultados CFD del modelo digital modificado.

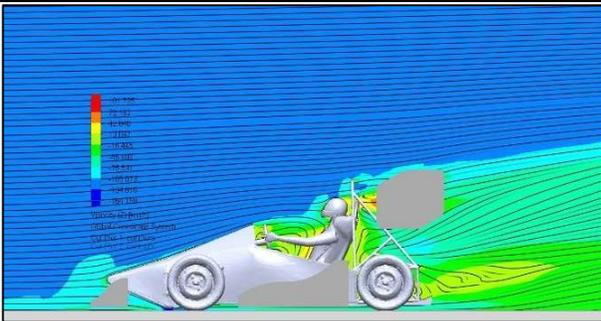
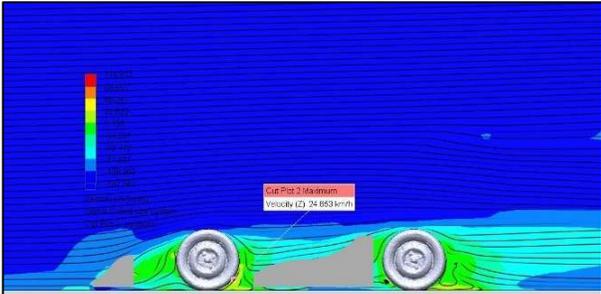
Parámetros		Modelo Digital Modificado					
		120 km/h			72 km/h		
		mín.	prom.	máx.	mín.	prom.	máx.
Presión estática		99,38	101,28	104,29	100,96	101,28	101,68
Presión dinámica	[kPa]	0	0,65	2,22	0	236,51	403,06
Presión total		99,38	101,94	105,36	100,96	101,51	101,81
Velocidad		0	118,82	220,30	0	71,25	93,24
Velocidad longitudinal	[km/h]	-220,03	-118,78	123	-92,9	-71,22	26,82
Velocidad vertical		-131,94	0,25	127,37	-36,68	0,13	56
Fuerza			898,79			378,50	
Fuerza longitudinal	[N]		888,67			277,20	
Fuerza vertical			-805,11			-257,71	
Intensidad de turbulencia	[%]		0,40			0,53	
Número Mach			0,09			0,05	
CL			-1,05			-0,94	
CD	[]		1,15			1	
CL Alerón delantero			-2,15			-1,49	
CL Alerón posterior			-2,36			-1,58	

4.1.3.1 Velocidad-Turbulencia.

En el modelo modificado se optó por añadir dispositivos aerodinámicos necesarios para aumentar la carga aerodinámica del vehículo teniendo en cuenta la resistencia aerodinámica, en la Tabla 28 se observa el trayecto y velocidad máxima del modelo modificado en 2 vistas laterales, la velocidad máxima del modelo modificado en la vista lateral es mayor a la velocidad máxima del modelo ajustado, este aumento del 21,28% se debe a la incorporación de dispositivos aerodinámicos lo que aumenta la velocidad del flujo de aire.

La Tabla 28 muestra el plano de sección paralelo al plano lateral, y se observa la velocidad máxima con los dispositivos aerodinámicos añadidos, se evidencia que los deflectores laterales cumplen su función al redireccionar la trayectoria del flujo de aire para disminuir la turbulencia provocada en las ruedas del vehículo, esta disminución de velocidad es del 72,1% lo cual es una reducción significativa y aporta en la disminución de la resistencia aerodinámica del vehículo.

Tabla 28. *Velocidad y trayectoria, modelo digital modificado.*

Ilustración	Variables	Valores
	Velocidad máxima	101,7 km/h
	Velocidad máxima	24,65 km/h

El alerón frontal y posterior se diseñaron con perfiles alares que tienen ángulos de ataque entre 12 y 14° para balancear la carga aerodinámica y ajustar la estabilidad y velocidad.

4.1.3.2 Presión-Fuerza.

La fuerza longitudinal del modelo modificado aumenta en un 32% comparado con el modelo ajustado, este incremento de resistencia aerodinámica no es factible ya que el vehículo debe realizar un mayor esfuerzo para avanzar, pero, es indiscutible que si se requiere el aumento de sustentación mediante la incorporación de dispositivos aerodinámicos es evidente el aumento del área frontal del vehículo, por lo cual, disminuir la turbulencia formada en determinadas zonas del vehículo es crucial para reducir la resistencia al avance.

La fuerza vertical aumenta notablemente comparado con el modelo anterior, un aumento del 178% de la fuerza de sustentación impulsa considerablemente el rendimiento del vehículo.

En la Tabla 29 se observa las presiones máximas de la vista lateral y el plano de sección, las presiones no varían significativamente, pero sí cambia la posición del punto máximo de presión, en el plano de sección se puede observar la significativa disminución de presión en la parte delantera y posterior de las ruedas del vehículo mediante la implementación y modificación de los deflectores laterales y alerón frontal respectivamente.

Tabla 29. Presión máxima, modelo digital modificado.

Ilustración	Variables	Valores
	Presión máxima	101 974 Pa
	Presión máxima	102 026 Pa

4.1.3.3 Eficiencia Aerodinámica.

Como resultado el modelo modificado es el más eficiente ya que muestra una eficiencia mayor de 114% respecto al modelo digital ajustado mostrado en la Tabla 30 y Tabla 26.

Tabla 30. Eficiencia aerodinámica, modelo digital modificado.

	Modelo Digital Modificado	
	120 km/h	72 km/h
C_L	1,05	0,94
C_D	1,15	1
η_A	$\frac{1,05}{1,15}$	$\frac{0,94}{1}$
	0,92	0,94

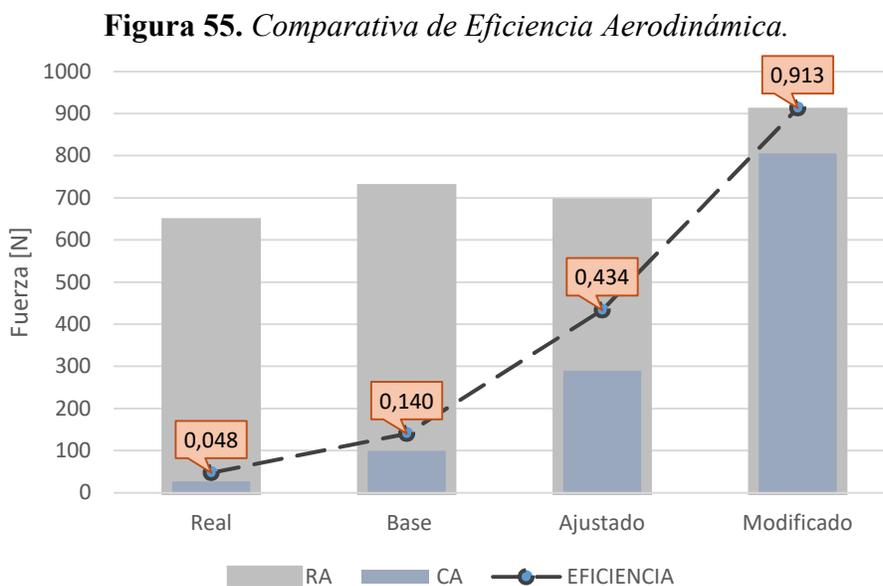
4.2 Evaluación de la Influencia de Diferentes Parámetros del Modelo CFD

Para el análisis de datos se tomó en cuenta todos los parámetros establecidos de cada objetivo de la presente investigación. Los modelos obtenidos se analizaron en las mismas condiciones teniendo en cuenta las características aerodinámicas principales. El modelo digital modificado presenta las mejores configuraciones geométricas ya que su eficiencia aerodinámica es superior a todos los modelos analizados, en la Tabla 31 se muestra los principales datos aerodinámicos obtenidos del modelo modificado a dos velocidades.

Tabla 31. Datos CFD de interés, modelo digital modificado.

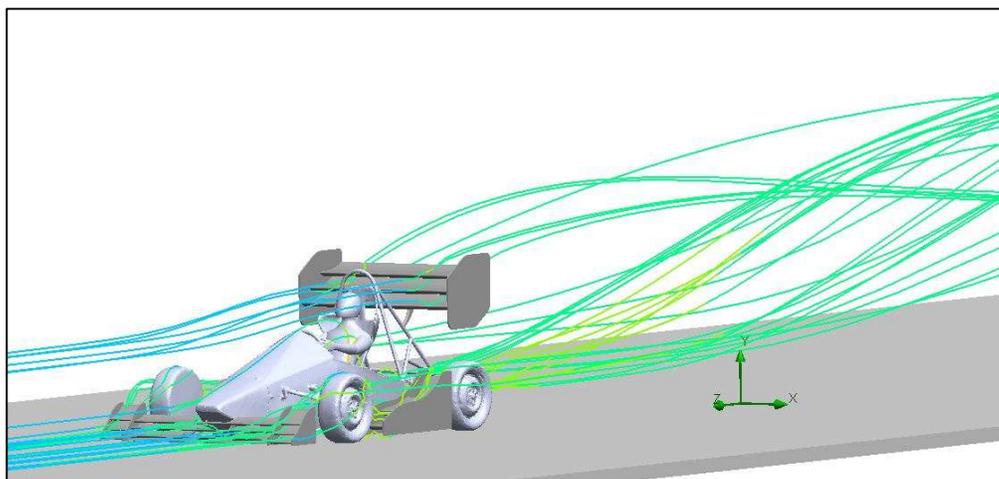
Velocidad [km/h]	Af [m ²]	Aa [m ²]	C _L []	C _D []	R _A [N]	C _A [N]
120			-1,05	1,15	888,67	-805,11
72	1,13	1,64	-0,94	1	277,20	-257,71

La Figura 55 detalla la comparativa de fuerzas longitudinales y verticales que se obtuvieron en el análisis para cada modelo del vehículo y la eficiencia aerodinámica respectivamente.



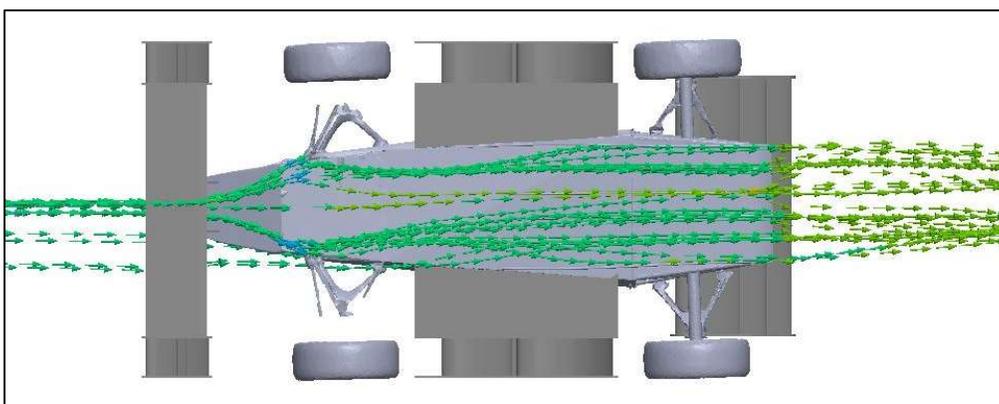
En la Figura 56 se observa el comportamiento del flujo de aire de las superficies alares y difusor del modelo digital modificado, se destaca la disminución de velocidad en áreas claves reflejando la interacción entre el flujo y las superficies del modelo.

Figura 56. *Flujo de aire sobre el modelo digital modificado.*



La Figura 57 ilustra una captura del difusor, la cual destaca la trayectoria del flujo de aire que desacelera y disminuye la presión para minimizar la turbulencia debajo del vehículo, en esta zona se puede observar la distribución del flujo de aire la cual es clave para entender el impacto de la eficiencia aerodinámica en el vehículo.

Figura 57. *Fujo de aire en el difusor del modelo digital modificado.*



4.2.1 Cálculo de Reynolds

Se calculó Reynolds en el modelo digital modificado para determinar el tipo de flujo, mediante la utilización de la ecuación (7).

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

$$R_e = \frac{1,225 \frac{kg}{m^3} * \frac{120}{3.6} \frac{m}{s} * 2,98 m}{1,81 * 10^{-5} Pa * s}$$

$$R_e = 6,722 * 10^6 > 4000; \text{Flujo Turbulento}$$

Mediante el cálculo de Reynolds se determinó que el flujo de aire alrededor del vehículo es predominantemente turbulento, este fenómeno atribuye parcialmente a la complejidad aerodinámica del diseño, el flujo de aire interactúa con todas las superficies exteriores del vehículo afectando la carga y resistencia aerodinámica.

4.3 Recolección y Comparación de Resultados del CFD con Datos Referenciales Publicados

En este apartado se comparó el modelo digital modificado con estudios similares realizados a un vehículo fórmula *SAE* o *Student* con dispositivos aerodinámicos. La Tabla 32 muestra los datos de referencia publicados de interés.

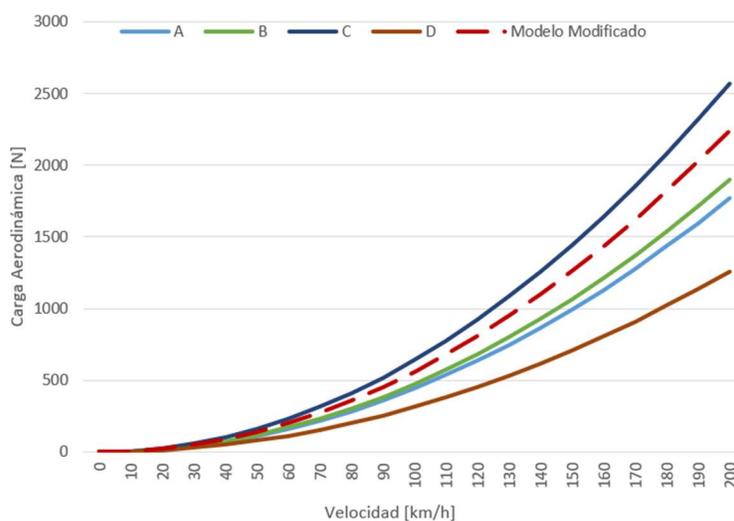
Tabla 32. Datos de interés referenciales publicados.

	Velocidad [km/h]	Af [m ²]	Aa [m ²]	C_L []	C_D []	R_A [N]	C_A [N]	
A	60	0,51	-	-1,83	1,11	96,91	-159,42	[74]
B	80	0,82	-	-1,28	0,66	156,55	-303,60	[75]
C	90	1,18	-	-1,15	1,21	546,58	519,47	[76]
D	95	1,15	0,62	-0,61	0,65	302,92	286,29	[77]

Tomado de: [74] - [77].

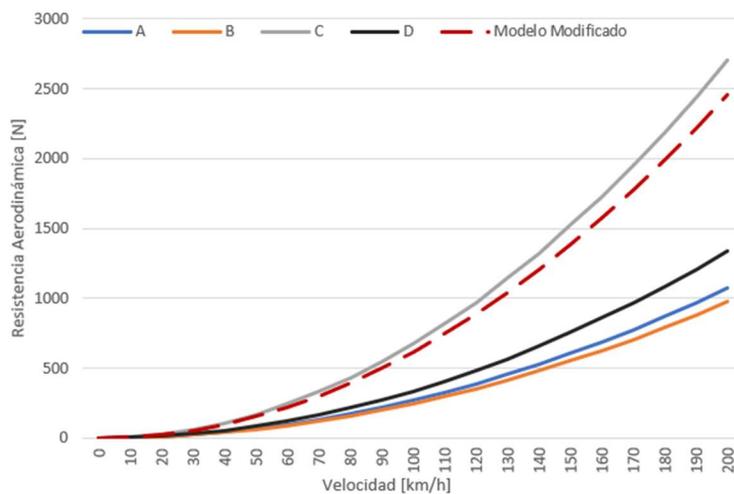
En la Figura 58 se observa la curva característica de la carga aerodinámica de los resultados referenciados y de la presente investigación manteniendo los coeficientes aerodinámicos constantes, si bien es cierto, tanto el coeficiente de arrastre como el de sustentación no varían directamente de la velocidad del vehículo, dependen principalmente de la forma del objeto, ángulo de ataque de los dispositivos aerodinámicos y la rugosidad de las superficies.

Figura 58. *Carga aerodinámica de los vehículos referenciados.*



La Figura 59 detalla los resultados calculados de la resistencia aerodinámica de los vehículos a analizar y del modelo digital modificado.

Figura 59. *Resistencia Aerodinámica de los vehículos referenciados.*



4.3.1 Validación de Incertidumbre de los Resultados Obtenidos

Para la validación de los resultados obtenidos en el modelo digital modificado, se analizó respecto a los resultados calculados de 4 investigaciones diferentes, mostrados en la Tabla 32, todas las investigaciones cuentan con la incorporación de diferentes dispositivos aerodinámicos al vehículo fórmula *Student* o *SAE*.

Tabla 33. Resultados calculados de los vehículos referenciados.

	120 km/h		72 km/h	
	R _A [N]	C _A [N]	R _A [N]	C _A [N]
A	386,02	-636,41	138,97	-229,11
B	352,23	-683,11	126,80	-245,92
C	971,70	-923,51	349,81	-332,47
D	482,55	-452,86	173,72	-163,03
Modificado	888,67	-805,11	277,20	-257,71

La Tabla 33 muestra resultados calculados para cada uno de los vehículos referenciados, en los cuales, entre las 4 investigaciones publicadas, existe un promedio de resistencia y carga aerodinámica de 548,13 N y -673,97 N respectivamente con velocidades de 120 km/h. Por otro lado, a velocidades de 72 km/h los monoplazas presentaron un promedio de 197,33 y -242,63 N de resistencia y carga aerodinámica. Es decir, a 120 km/h el modelo digital modificado tiene un aumento del 0,62% respecto al promedio total, esto es desfavorable, ya que indica que el vehículo debe entregar mayor energía para alcanzar dicha fuerza y sobrepasar la velocidad establecida, para la carga aerodinámica el modelo modificado tiene una mejora del 0,19% mejorando la maniobrabilidad a velocidades elevadas. En velocidades moderadas de 72 km/h la resistencia aerodinámica del modelo modificado respecto al promedio tiene un aumento desfavorable de 0,4%, por otro lado, la carga aerodinámica que ejerce el modelo modificado aumenta en 0,06%.

CAPÍTULO V

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- La caracterización de la distribución de presiones aerodinámicas del modelo real y el modelo digital mostraron concordancias significativas, validando la eficacia del modelo digital creado a partir de la digitalización 3D, este proceso de alta precisión permitió análisis detallados para generar las distribuciones y presiones en los modelos digitales, identificando de manera más exacta las zonas de mayor influencia de cargas aerodinámicas con una diferencia de 198% en la eficiencia aerodinámica.
- AL modificar la geometría del modelo digital los resultados demostraron que los ligeros cambios geométricos en un vehículo influyen significativamente en las cargas aerodinámicas, la reducción de la altura del vehículo en un 71,15% respecto a la altura original, revelando la influencia del efecto suelo debajo del mismo lo que intensifica la fuerza de sustentación y produce una mejor estabilidad del vehículo destacando la importancia de un diseño aerodinámico optimizado para maximizar el rendimiento y eficiencia mediante el aumento de cargas aerodinámicas.
- En el presente estudio la implementación de dispositivos aerodinámicos genera un incremento en la sustentación, mejora la estabilidad y tracción del vehículo conforme aumenta la velocidad, la configuración óptima se seleccionó mediante el cálculo de la eficiencia aerodinámica de cada modelo analizado, como resultado, en la presente investigación el modelo digital modificado presentó las mejores configuraciones aerodinámicas maximizando el control del vehículo y asegurando un desempeño superior

para distintos escenarios de conducción. El modelo digital base cuenta con una carga aerodinámica de -99,76 N y el modelo digital modificado de -805,11 N representando un aumento significativo de 707%.

- La comparativa demuestra que con los 4 estudios publicados en promedio cuentan con formas del vehículo más adecuados para la disminución de la resistencia aerodinámica, esto se debe en gran medida a la eficiencia aerodinámica de cada uno de los vehículos, desde 0,94 a 1,94, los vehículos A y B tienen una eficiencia de 1% mayor en comparación con el modelo modificado y los vehículos restantes cuentan con una eficiencia aerodinámica igual.

5.2 RECOMENDACIONES

- La precisión de los resultados depende significativamente de la calidad de la nube de puntos para el mallado adecuado del objeto, partir con configuraciones adecuadas en la nube de puntos como el suavizado, fusión de puntos, superposición y simplificación ayudan a la captura más exacta de detalles de los modelos a analizar, es crucial asegurarse una alta calidad del mallado para la obtención de resultados precisos, un mallado refinado en las superficies críticas del modelo garantizan resultados más exactos. El dimensionamiento del dominio computacional es importante para la obtención de resultados esperados, por ende, un tamaño adecuado y suficientemente amplio es relevante para concretar un análisis eficiente y obtener resultados de interés concisos.
- Para la realización de cambios geométricos en un fórmula *Student* se debe tener en cuenta el reglamento técnico de diseño y construcción, asegurando modificaciones válidas que garanticen el cumplimiento de las normas de competencia. En las ligeras modificaciones

que se realicen a un vehículo se recomienda tener en cuenta las aberturas de determinadas zonas, al sellar aberturas que influyen en la presión e intensidad de turbulencia de flujo de aire contribuyen a una mejora notable en los resultados.

- Para la construcción de dispositivos aerodinámicos se recomienda ajustar los ángulos de ataque del alerón frontal y posterior en un rango de 12 a 14° con la finalidad de no afectar notablemente la elevación de la resistencia al avance del vehículo, para los deflectores laterales los ángulos de ataque pueden incrementar debido a que su función principal no es aumentar la carga aerodinámica, sino optimizar el flujo de aire para reducir la turbulencia.
- Es recomendable el uso de distintos software CFD para simulaciones en las mismas condiciones de contorno, esto podría permitir una comparativa adecuada y mejorar la precisión de resultados, para futuras investigaciones se recomienda tomar en cuenta minuciosamente las áreas frontales de los vehículos, ya que son factores determinantes que afectan o contribuyen de manera directa a los coeficientes aerodinámicos y al aumento o disminución de las fuerzas aerodinámicas que se ejercen sobre el vehículo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] I. Y. C. Gavilan, M. V. G. Águila, y I. C. M. Chuairey, «Computational Fluid Dynamics: Review and Analysis of Applications in Engineering», *Computational Fluid Dynamics*, vol. 29, n.º 4.
- [2] I. F., «Estudio de la aerodinámica en los vehículos», *PROSPECTIVA*, vol. 4, pp. 66-70, 2006.
- [3] B. I. Flores, «Interés y posibilidades de la Dinámica de fluidos computacional», *E.S. Ingenieros de Bilbao*, p. 9.
- [4] G. A. Ruiz-Domínguez, R. U. Rivera-Landaverde, y G. Orrantia-Daniel, «Estudio de Esfuerzo y Deformación de Piezas de Impresión 3D», n.º 3, 2019.
- [5] Universidad Autónoma Metropolitana, L. Cabrera Frías, y D. M. Córdova Esparza, «3D printing as an educational tool for developing creative thinking: systematic review», *Ap*, vol. 15, n.º 2, pp. 88-103, sep. 2023, doi: 10.32870/Ap.v15n2.2382.
- [6] J. Hortelano Capetillo, «Análisis aerodinámico en CFD de los alerones en automóviles convencionales», *Revista de Ingeniería Industrial*, pp. 1-12, ene. 2020, doi: 10.35429/JIE.2020.11.4.1.12.
- [7] G. Gatto y D. C. Sacco, «ESCANE0 3D Y ESTUDIO AERODINÁMICO DE UN AUTOMÓVIL DE COMPETICIÓN».
- [8] S. Carlos, «ANÁLISIS DE LA AERODINÁMICA DE UN AUTOMÓVIL DE COMPETICIÓN», 2006.
- [9] L. Lopresti, L. L. M. Fuertes, S. Gavino, L. Speroni, y G. Defranco, «Reconstrucción geométrica de una pieza mecánica: láser escáner e impresión 3D Geometric reconstruction of a mechanical piece: láser scanner and 3D printing».
- [10] O. R. Pérez y J. V. Costa, «ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN AERODINÁMICA DE LOS COCHES DE FÓRMULA».
- [11] F. Foster, *F1: A History of Formula One Racing*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=dLARngEACAAJ>
- [12] R. G. Vita, «La Fórmula 1 desde 1950 hasta 1980: evolución e innovación exponencial», Top Gear España. Accedido: 5 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.topgear.es/noticias/motorsport/evolucion-coches-f1-1950-hoy-89062>
- [13] «Porsche 550 Spyder “Michael May”», Revs Automedia. Accedido: 4 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://automediamedia.revsinstitute.org/porsche-550-spyder-michael-may>
- [14] V. Abad, «Fórmula1 Anatomía de una pasión», vol. 1, p. 13, 2024.
- [15] S. McBeath, *Aerodinámica del automóvil de competición*. CEAC, 2005.

- [16] Triya Nanalal Vadgama, Mr. Arpit Patel, Dr. Dipali Thakkar, y Sardar Vallabhbai Patel Institute of Technology, «Design of Formula One Racing Car», *IJERT*, vol. V4, n.º 04, p. IJERTV4IS040962, abr. 2015, doi: 10.17577/IJERTV4IS040962.
- [17] J. G. Hortelano-Capetillo, J. M. Martínez-Vázquez, J. L. Zúñiga-Cerroblanco, y G. Rodríguez-Ortiz, «Analysis of drag and lift forces for a sedan car using a rear lip spoiler», *JME*, pp. 23-31, jun. 2020, doi: 10.35429/JME.2020.13.4.23.31.
- [18] W. F. Milliken y D. L. Milliken, *Race Car Vehicle Dynamics*. SAE International, 1995. [En línea]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=opgHfQzlnLEC>
- [19] J. Katz, «AERODYNAMICS OF RACE CARS», *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 38, n.º 1, pp. 27-63, ene. 2006, doi: 10.1146/annurev.fluid.38.050304.092016.
- [20] J. D. Anderson, *Fundamentals of Aerodynamics*. en Aeronautical and Aerospace Engineering Series. McGraw-Hill, 2001. [En línea]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=CaBTAAAMAAJ>
- [21] J. M. Quintana, «ANÁLISIS AERODINÁMICO MEDIANTE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL DE UN VEHICULO FORMULA SAE».
- [22] E. M. Sepulveda, «Resistencia del Aire y Aerodinámica - Física en Línea». Accedido: 24 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://fisicaenlinea.com/2024/11/05/resistencia-del-aire-y-aerodinamica/>
- [23] G. Tacuri y P. Andres, «Análisis y optimización del comportamiento aerodinámico de la carrocería de un bus categoría M3 (interprovincial)».
- [24] I. Sadreghighi, *Aerodynamic Basics*. Annapolis, MD, 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/339499388_Aerodynamic_Basics
- [25] C. Sacco, «Análisis de cargas aerodinámicas en un auto de competición», vol. 6, 2019.
- [26] N. C. Lorenzana, «Valladolid, julio de 2017».
- [27] E. Cumbe y R. Rockwood, «Simulación aerodinámica de un vehículo Toyota Corolla 2005 en un programa de dinámica de fluidos computacional-CFD-», Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador, 2009. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/4103/1/07548.pdf>
- [28] E. L. Gómez Gómez, J. E. Parra Villamarin, D. A. Reyes Caballero, J. Galindo, y E. Zuluaga, «Implementación de sistema para la medición de fuerzas aerodinámicas en un túnel de viento subsónico», *Ciencia y Poder Aéreo*, vol. 13, n.º 1, pp. 106-113, jun. 2018, doi: 10.18667/cienciaypoderareo.590.
- [29] W. Hucho y G. Sovran, «Aerodynamics of Road Vehicles», *AERODYNAMICS OF ROAD VEHICLES*.

- [30] E. Pedroza González, J. Ortiz Medel, y F. Martínez González, «Historia del Teorema de Bernoulli», *Acta Universitaria*, vol. 17, n.º 1, pp. 39-45, abr. 2007, doi: 10.15174/au.2007.166.
- [31] «Tercera ley del movimiento de Newton: Relación entre fuerzas iguales y sentidos opuestos de un cuerpo», ResearchGate. Accedido: 12 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/347112914_Articulo_Cientifico_-_Tercera_ley_del_movimiento_de_Newton_Relacion_entre_fuerzas_iguales_y_sentidos_opuestos_de_un_cuerpo
- [32] L. M. González Gutierrez, «Integración de las ecuaciones de Navier-Stokes mediante el método de los elementos finitos y el método de las características : Aplicaciones a casos con superficie libre», PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, 2001. doi: 10.20868/UPM.thesis.99.
- [33] A. Fosch Sabán, «ANÁLISIS DEL FLUJO DE AIRE A TRAVÉS DE UN DIFUSOR DE AUTOMÓVIL», Universitat Politècnica de Catalunya Barcelonatech, Barcelona, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/123030/memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [34] S. Cruz Vanegas, «Parámetros concentrados locales de un tubo Venturi Cavitante», *iit*, vol. 20, n.º 3, pp. 1-11, jul. 2019, doi: 10.22201/fi.25940732e.2019.20n3.033.
- [35] S. Gómez Gonzáles, «MALLADO Y SIMULACIÓN CFD DE AUTOMÓVIL», Escola Técnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Barcelona, 2017. [En línea]. Disponible en: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/108947/Mallado_y_simulacion_CFD_de_automovil_-_GOMEZGONZALEZsamuel.pdf
- [36] R. Camúñez Llanos, «ELEMENTOS Y DISPOSITIVOS AERODINÁMICOS EN LA FÓRMULA 1: PARTE CENTRAL DEL VEHÍCULO», Escola Técnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Barcelona, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/24755/TFG%20memoria.pdf>
- [37] F. R. Ojeda-Pardo, O. Belete-Fuentes, y Y. E. Batista-Legrá, «Elaboración del modelo digital de elevaciones mediante tecnología 3D láser escáner», 1993.
- [38] S. D. D. Guayllas, «Propiedades aerodinámicas que influyen en un vehículo de "Formula 1" a través de CFD».
- [39] I. Gibson, D. W. Rosen, y B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. Boston, MA: Springer US, 2010. doi: 10.1007/978-1-4419-1120-9.
- [40] G. Gatto, «4to Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica».

- [41] L. A. H. Chalco, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ESCÁNER 3D E INTEGRACIÓN EN UNA IMPRESORA 3D.».
- [42] S. Rodriguez, «Propuesta metodológica para documentación y evaluación de elementos patrimoniales dentro del complejo histórico de la Alhambra (Granada) mediante modelización tridimensional», 2013, [En línea]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/143455391.pdf>
- [43] J. De La Torre-Cantero, J. L. Saorín, C. Meier, D. Melián-Díaz, y M. D.-D. Alemán, «Creación de réplicas de patrimonio escultórico mediante reconstrucción 3D e impresoras 3D de bajo coste para uso en entornos educativos», *Arte Individ. Soc.*, vol. 27, n.º 3, pp. 429-446, sep. 2015, doi: 10.5209/rev_ARIS.2015.v27.n3.45864.
- [44] J. Tepezila, *SCANNER 3D PARA LA FABRICACIÓN DE COMPONENTES MECÁNICOS MEDIANTE INGENIERÍA INVERSA*. Instituto Tecnológico Superior de Martínez de la Torre, 2022.
- [45] J. N. Díaz López, «Retos de la cadena de suministro con la inclusión de la tecnología de impresión 3d - fabricación aditiva am», *Cuad. Latinoam. Adm.*, vol. 14, n.º 27, dic. 2018, doi: 10.18270/cuaderlam.v14i27.2660.
- [46] M. E. Silveira, «3D scanning applied in the correlation of large plastic deformation», *Exacta*, vol. 10, n.º 2, pp. 247-258, nov. 2012, doi: 10.5585/exacta.v10n2.3775.
- [47] G. Carrillo, C. Nuila, y J. Laínez, «Prototipado rápido en la fabricación de moldes impresos en 3D para soplado de plástico», *Ingenius*, n.º 24, pp. 28-35, jun. 2020, doi: 10.17163/ings.n24.2020.03.
- [48] J. L. Lerma, «Modelado fotorrealístico 3D a partir de procesos fotogramétricos: láser escáner versus imagen digital», 2013.
- [49] Sicnova3D, Ed., «Digitalización 3D. Tipo de escáneres, aplicaciones y casos de éxito». SICNOVA. [En línea]. Disponible en: <https://sicnova3d.com/wp-content/uploads/sicnova-guia-digitalizacion-3d-vol-1.pdf>
- [50] M. B. I. René, V. P. D. Alejandro, R. P. F. Renato, y D. C. C. Wime, «SIMULACIÓN NUMÉRICA DE CONTACTO ENTRE SUPERFICIES CON MOVIMIENTO RELATIVO PARA PREDICCIÓN DE DESGASTE EN COJINETES DE FRICCIÓN DE ALEACIÓN DE ALUMINIO».
- [51] J. Mora, «ESTUDIO DE LA AERODINÁMICA DE LA CARROCERÍA DEL FÓRMULA VILANOVA TEAM.».
- [52] E. C. A. Torres, S. E. Díaz, y N. García, «ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA AERODINÁMICA DE UN CARRO TIPO FÓRMULA».
- [53] J. Suardíaz Muro, M. Pérez Gomáriz, A. Cabrera Lozoya, y R. Ove Do Carmo Trolle, «Combinando Impresión 3D y electrónica como estrategia para mejorar la experiencia de aprendizaje», *RIED*, vol. 24, n.º 1, p. 115, oct. 2020, doi: 10.5944/ried.24.1.27596.

- [54] B. J. Briceño-Martínez, E. A. Llanes Cedeño, J. C. Rocha-Hoyos, E. Chamba, D. Cuasapud, y A. Cárdenaz-Yáñez, «Tecnologías de impresión 3D: evaluaciones de FDM y Polyjet en la fabricación de autopartes de automóviles», *Enfoque UTE*, vol. 10, n.º 3, pp. 13-29, sep. 2019, doi: 10.29019/enfoque.v10n3.414.
- [55] P. Position, «¿Qué es la Impresión 3D?», AMETIC. [En línea]. Disponible en: https://ametic.es/sites/default/files/position_paper_impresion_3d.pdf
- [56] por R. Perez, «SLS», TECNOIMPRES 3D. Accedido: 21 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://tecnoimpre3d.com/4-tecnologias/sls-01/>
- [57] M. D. Díaz Alemán, «Modelado 3D de precisión en procesos de digitalización de escultura construida», *AusArt*, vol. 9, n.º 2, pp. 113-125, dic. 2021, doi: 10.1387/ausart.23077.
- [58] Impresoras 3D, «ABS y PLA: diferencias, ventajas y desventajas», ABS y PLA: diferencias, ventajas y desventajas. [En línea]. Disponible en: <https://www.impresoras3d.com/abs-y-pla-diferencias-ventajas-y-desventajas/>
- [59] G. Chung, D. Niezgodá, R. Beissmann, K. Chaturvedi, y T. K. J. Wen, «PROJECT MANAGEMENT, CONTENT, AND EDITORIAL OFFICE».
- [60] «FSAEOnline.com». Accedido: 19 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fsaeonline.com/>
- [61] «UNAM MotorSports 22-23». Accedido: 20 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://unam.pro/22-23/>
- [62] C. P. C. Fabricio y F. D. F. Sebastián, «CONSTRUCCIÓN DE UN MONOPLAZA ELÉCTRICO CON MOTORES INDEPENDIENTES», Universidad Técnica del Norte, Ibarra, 2022. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/12920>
- [63] «Brand Story - Revopoint», Revopoint 3D US. Accedido: 19 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.revopoint3d.com/pages/brand-story>
- [64] «Best 3D Scanning Software-Revo Scan 5», Revopoint 3D US. Accedido: 15 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.revopoint3d.com/pages/support-download>
- [65] «Software de diseño CAD 3D | SOLIDWORKS». Accedido: 20 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.solidworks.com/es/home-page-2021>
- [66] «ELEGOO: Best Consumer Level 3D Printers, Materials and STEM Products», ELEGOO Official. Accedido: 20 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.elegoo.com/>
- [67] I. SAE, «Formula Student Rules». SAE International, 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2024/rules/FS-Rules_2024_v1.1.pdf

- [68] E. G. Vera Puebla, D. J. Morales Neira, A. J. Peña Pinargote, y A. R. Rodríguez Vargas, *Ergonomía para pilotos de monoplaça*, Primera. Colloquium, 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/David-Morales-Neira/publication/334224236_Ergonomia_para_pilotos_de_monoplaza/links/5d1d823492851cf440630f63/Ergonomia-para-pilotos-de-monoplaza.pdf
- [69] J. Martínez Cuello, «ESTUDIO Y DISEÑO AERODINÁMICOS DE UN ALERÓN TRASERO PARA UN COCHE DEPORTIVO», Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, 2021. [En línea]. Disponible en: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/365775/Memoria%20y%20Anexos_TFG_Jule_n_Mart%C3%ADnez_Cuello.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [70] «Los alerones: resistencia aerodinámica», Los secretos de la Formula 1. Accedido: 27 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://secretosf1.wordpress.com/2010/03/27/los-alerones-resistencia-aerodinamica/>
- [71] O. L. Mejía, L. M. Camargo, y P. Co-Asesor, «ESTUDIO EXPERIMENTAL Y COMPUTACIONAL DE LA AERODINÁMICA DE UN VEHÍCULO COMERCIAL».
- [72] N. Pfeiffer, «Formula Student Aerodynamics With CFD», SimScale. Accedido: 24 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.simscale.com/blog/formula-student-aerodynamics/>
- [73] S. A. Gallón y O. D. L. Mejía, «Mejora de un paquete aerodinámico para un vehículo de Fórmula SAE utilizando herramientas computacionales».
- [74] V. Pérez Ruiz, «DESARROLLO DE ELEMENTOS AERODINÁMICOS DEL PROTOTIPO FORMULA STUDENT E-TECH RACING», Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/113216?show=full&form=MG0AV3>
- [75] G. Morocho y L. Darío, «Diseño y construcción de una carrocería de un vehículo de competencia Formula SAE eléctrico».
- [76] «Aerodynamic optimisation of Formula student vehicle using computational fluid dynamics», *Fields: journal of Huddersfield student research*, vol. 4, n.º 1, feb. 2018, doi: 10.5920/fields.2018.02.
- [77] A. Vargas y C. Andrés, «Estudio de factibilidad de la colocación de un alerón frontal y posterior mediante análisis CFD para el vehículo monoplaça eléctrico tipo Formula SAE».

ANEXOS

FÓRMULA STUDENT



PROCESO DE DIGITALIZACIÓN 3D



USO DEL SCANNER MIRACO PRO 3D



CREACIÓN DE LA MALLA CFD

Mesh Generation: SIMULACIÓN MODELO DIGITAL MODIFICADO 120 km_h [Predeterminado] (MODELO DIGITAL MODIFICADO.SLDPRT)

File Calculation View Insert Window Help

Parameter	Value
Status	Mesh generation finished normally.
Total cells	4,064,701
Fluid cells	4,064,701
Fluid cells contacting solids	1,219,390
CPU time	0 : 2 : 26
Calculation time left	
Run at	DESKTOP-7HMJVH
Number of cores	8

Event	Iteration	Time
Mesh generation started	0	11:44:46 , Mar 10
Mesh generation normally finished	0	11:47:12 , Mar 10

Warning: No warnings

Log: Mesh generation finished normally.

CÁLCULOS DE RESULTADOS CFD

Solver: SIMULACIÓN M. MODIFICADO 120 km_h [Predeterminado] (M. DIGITAL MODIFICADO.SLDPRT) - [Log]

File Calculation View Insert Window Help

Event	Iteration	Time
Mesh generation started	0	00:52:38 , Mar 14
Mesh generation normally finished	0	00:54:06 , Mar 14
Preparing data for calculation	0	01:02:41 , Mar 14
Calculation started	0	01:05:50 , Mar 14
Calculation has converged since the fo...	980	10:43:20 , Mar 14
Max. travel is reached	980	
Calculation finished	980	10:44:19 , Mar 14

Log Info

Ready Solver is finished. Iterations : 980

IMPRESIÓN 3D DEL MODELO DIGITAL MODIFICADO

ESCALA 1:16

