

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA CARROCERÍA AERODINÁMICA PARA UN
VEHÍCULO ELÉCTRICO TIPO COUPÉ

ANDREW ESTEBAN MUÑOZ GONZÁLEZ
ESPERANZA KATHERINE PÉREZ ROA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2022

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA CARROCERÍA AERODINÁMICA PARA UN
VEHÍCULO ELÉCTRICO TIPO COUPÉ

ANDREW ESTEBAN MUÑOZ GONZÁLEZ
ESPERANZA KATHERINE PÉREZ ROA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director:

WILLIAM PINTO HERNÁNDEZ
Doctor en ciencias de Ingeniería Mecánica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2022

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento a Dios por darme la salud, sabiduría y perseverancia de culminar este sueño. A mis padres, hermana y familia por estar en todo momento a mi lado apoyando cada uno de mis pasos y siendo la fuerza de seguir siempre adelante.

Expreso mi profundo agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander por brindarme la oportunidad de convertirme en una profesional competente. A mis profesores, mentores y tutores, pues todo lo que aprendí en las aulas será aprovechado de manera ética en el futuro.

Especial agradecimiento a mi director de tesis Ing. William Pinto, por guiar el presente proyecto investigativo, irradiando siempre mensajes de objetividad y buscando que cada día seamos mejores profesionales para el servicio pleno de la sociedad. A mis amigos, compañeros y colegas por cada uno de sus aportes, ayuda, apoyo y momentos compartidos durante toda la carrera.

Y finalmente un gran agradecimiento a mi compañero de tesis Andrew Muñoz por su amistad, esfuerzo y dedicación que hicieron posible culminar con satisfacción este proyecto.

Esperanza Katherine Pérez Roa.

DEDICATORIA

A mi mamá Elizabeth Roa, mi papá Omar Faustino Pérez; su ejemplo, dedicación y esfuerzo me permitieron superar todos los obstáculos para seguir creciendo íntegramente personal y profesionalmente.

A mi hermana Jessica Aguillón, mi compañera de vida, apoyo fundamental para culminar esta etapa.

A mis nonos, tíos, primos y familia, que siempre estuvieron a mi lado expresando su profundo cariño y sabiduría para tomar las mejores decisiones.

A mi amigo Andrew Muñoz por creer en mi para hacer equipo en este proyecto y sacarlo adelante a pesar de todos los obstáculos presentados.

A mis amigos y compañeros de universidad y en general a todos aquellos que de alguna u otra forma me brindaron su amistad e hicieron posible a través de sus consejos y aportes llegar hasta aquí.

Esperanza Katherine Pérez Roa.

DEDICATORIA

Le dedico mi esfuerzo y trabajo principalmente a mi familia por estar siempre apoyándome, a mi padre Milton Muñoz, que siempre me inculco la fortaleza en los momentos difíciles, me demostró que a través de la exigencia podía dar más de mí mismo, que para cumplir los sueños hay que dar el 110%, a mi madre Gilma González, que me enseñó a ser dedicado y disciplinado con su ejemplo, veo en ella una gran mujer, con su disciplina saco adelante un curso que suponía un gran reto para ella. Y a mi hermano Juan pablo, que es mi confidente y consejero, en él veo una mejor versión de mí mismo y al cual quiero guiar para que sea mucho más grande que yo en todos los aspectos, creo más en él que en mí, por eso quiero dejar una vara bien alta, porque sé que me superará, pero no quiero dejárselo tan fácil.

Le agradezco a Dios o a la vida por darme la oportunidad de tener una familia así, también le dedico este trabajo a todos mis amigos que de alguna manera caminaron a mi lado y fueron creciendo conmigo durante el transcurso de la universidad y de mi vida, quiero decirles que ya lo vamos a lograr, ánimo y a seguir con fuerza.

Andrew Esteban Muñoz González.

CONTENIDO

| | Pág. |
|---|-------------|
| 1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA..... | 17 |
| 2. OBJETIVOS..... | 20 |
| 2.1 OBJETIVO GENERAL | 20 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 20 |
| 3. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN | 22 |
| 4. MARCO TEÓRICO | 24 |
| 4.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS | 24 |
| 4.1.1 Libros..... | 24 |
| 4.1.2 Tesis..... | 25 |
| 4.2 REFERENTES TEÓRICOS | 28 |
| 4.2.1 Biónica | 28 |
| 4.2.2 Leptophis Ahaetulla. | 28 |
| 4.2.2 Automóvil..... | 30 |
| 4.2.2.1 Dimensionamiento de un vehículo..... | 30 |
| 4.2.3 Carrocería..... | 31 |
| 4.2.3.1 Tipos de carrocería..... | 32 |
| 4.2.3.2 Tipos de carrocería según su forma..... | 32 |
| 4.2.3.3 Según sus líneas y volúmenes..... | 33 |
| 4.2.4 Aerodinámica de la carrocería..... | 34 |
| 4.2.4.1 El Drag (resistencia al avance) sobre un automóvil..... | 35 |
| 4.2.4.2 Influencia del Lift (o Downforce) sobre un automóvil..... | 37 |
| 4.2.5 Principio de Bernoulli..... | 38 |
| 4.2.6 Principio de continuidad..... | 39 |
| 4.2.7 Efecto Venturi..... | 41 |
| 4.2.8 Número de Reynolds..... | 43 |
| 4.2.9 Flujos de aire..... | 45 |

| | | |
|----------|--|----|
| 4.2.10 | Parámetros aerodinámicos de un automóvil. | 45 |
| 4.2.11 | Ecuación Navier Stokes | 47 |
| 4.2.12 | Modelos de turbulencia | 48 |
| 4.2.12.1 | Modelo de la longitud de mezcla de Prandtl. | 50 |
| 4.2.12.2 | Modelo K- ϵ : | 50 |
| 4.2.12.3 | Modelo K- ω :..... | 50 |
| 4.2.13 | CAD. | 51 |
| 4.2.14 | CFD..... | 51 |
| 4.2.14.1 | ANSYS 2020 R2. | 52 |
| 5. | DISEÑO AERODINÁMICO Y DE FORMA DE LA CARROCERÍA..... | 53 |
| 5.1 | PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LA LEPTOPHIS AHAETULLA | 54 |
| 5.2 | CREACIÓN DE UN CONCEPTO DE VALOR (LOGO)..... | 55 |
| 5.3 | CARACTERÍSTICAS DE LA LEPTOPHIS EN CROQUIS INICIALES | 57 |
| 5.4 | PARÁMETROS DE DISEÑO FINALES | 58 |
| 5.4.1 | Dimensionamiento del vehículo. | 58 |
| 5.4.2 | Bocetos digitalizados. | 58 |
| 5.5 | MODELADO EN SOLIDWORKS | 62 |
| 5.6 | DISTRIBUCIÓN DE ESPACIOS DEL VEHÍCULO..... | 63 |
| 5.6.1 | Distribución espacial en el modelo 3D. | 64 |
| 5.6.2 | Modelo final detallado. | 65 |
| 6. | DISTRIBUCIÓN ESTRUCTURAL (CHASIS BÁSICO)..... | 69 |
| 7. | SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN AERODINÁMICA (CFD) DE LA CARROCERÍA | 72 |
| 7.1 | DIAGRAMA DE LA ETAPAS DE SIMULACIÓN EN ANSYS 2020 R2..... | 72 |
| 7.2 | ECUACIONES DEL FENÓMENO FÍSICO..... | 72 |
| 7.3 | MODELO K- ϵ | 74 |
| 7.4 | PARÁMETROS ATMOSFÉRICOS DE SIMULACIÓN | 77 |
| 7.5 | CONDICIONES DE SIMULACIÓN | 78 |
| 7.6 | ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 79 |
| 7.6.1 | Análisis de malla. | 79 |

| | |
|---|-----|
| 7.6.1.1 Malla sin refinamiento. | 79 |
| 7.6.1.2 Malla con refinamiento. | 81 |
| 7.6.2 Control de convergencia. | 82 |
| 7.7 RESULTADOS..... | 83 |
| 7.7.1 Parámetros aerodinámicos de la carrocería | 87 |
| 7.7.1.1 Curva Potencia vs Velocidad (P - V)..... | 87 |
| 8. CONCLUSIONES | 89 |
| 9. RECOMENDACIONES..... | 91 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 93 |
| ANEXOS..... | 100 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1. Descripción de la energía en la ecuación de Bernoulli | 39 |
| Tabla 2. Definición de características físicas principales de la Leptophis | 54 |
| Tabla 3. Definición de dimensiones del vehículo | 58 |
| Tabla 4. Consideraciones finales | 62 |
| Tabla 5. Características de los principales componentes del vehículo | 63 |
| Tabla 6. Coeficientes del modelo K-épsilon | 76 |
| Tabla 7. Parámetros atmosféricos de la simulación | 77 |
| Tabla 8. Condiciones de simulación (Setup) en Ansys de la carrocería | 78 |
| Tabla 9. Dominio de simulación | 79 |
| Tabla 10. Parámetros obtenidos en la simulación | 87 |
| Tabla 11. Definición de fronteras | 120 |
| Tabla 12. Datos para la gráfica del mallado sin refinamiento | 127 |
| Tabla 13. Datos para la gráfica del mallado con refinamiento | 127 |
| Tabla 14. Datos para la gráfica de Potencia Vs Velocidad | 128 |
| Tabla 15. Datos para la gráfica de fuerza en z | 130 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Figura 1. Leptophis Ahaetulla | 29 |
| Figura 2. Vista lateral Leptophis..... | 30 |
| Figura 3. Diferencia entre chasis y carrocería | 31 |
| Figura 4. Segmentos automotrices | 33 |
| Figura 5. Líneas de volumen..... | 34 |
| Figura 6. Efecto de diferentes fuerzas sobre la carrocería de un automóvil | 35 |
| Figura 7. Fuentes principales del drag en un vehículo..... | 36 |
| Figura 8. Fuerzas Down y Drag sobre un automóvil | 37 |
| Figura 9. Teorema de Bernoulli..... | 38 |
| Figura 10. Esquema de la continuidad de un fluido | 40 |
| Figura 11. Esquema del efecto Venturi..... | 41 |
| Figura 12. Efecto Venturi en un automóvil | 42 |
| Figura 13. Comportamiento del número de Reynolds dependiendo del tipo de fluido | 43 |
| Figura 14. Régimen del número de Reynolds..... | 44 |
| Figura 15. Superficie frontal de un automóvil..... | 47 |
| Figura 16. Términos de la ecuación general de Navier Stokes..... | 48 |
| Figura 17. Ecuación de Navier Stokes en coordenadas cartesianas | 48 |
| Figura 18. Jerarquía de los modelos de turbulencia | 49 |
| Figura 19. CAD 3D..... | 51 |
| Figura 20. Simulación CFD de un coche de fórmula 1..... | 52 |
| Figura 21. Diagrama sobre el concepto de diseño de una carrocería..... | 53 |
| Figura 22. Collage de fotos correspondiente a la tabla 3..... | 55 |
| Figura 23. Diseño del logo en Illustrator | 56 |
| Figura 24. Logo del proyecto | 56 |

| | |
|---|----|
| Figura 25. Collage con croquis iniciales involucrando algunas características de la Leptophis | 57 |
| Figura 26. Vista lateral vehículo..... | 59 |
| Figura 27. Vista frontal del vehículo..... | 59 |
| Figura 28. Vista posterior del vehículo..... | 60 |
| Figura 29. Vista superior del vehículo..... | 60 |
| Figura 30. Espejo retrovisor en forma de cámara lateral | 61 |
| Figura 31. Efectos aerodinámicos en un vehículo | 62 |
| Figura 32. Modelo realizado en el programa SolidWorks | 63 |
| Figura 33. Vista isométrica de la carrocería con la distribución de elementos..... | 64 |
| Figura 34. Distribución de espacial de elementos del vehículo (vista superior) | 64 |
| Figura 35. Distribución de espacial de elementos del vehículo (vista lateral) | 65 |
| Figura 36. Renderizado del modelo detallado de carrocería (Vista isométrica) | 66 |
| Figura 37. Renderizado del modelo en un ambiente exterior | 66 |
| Figura 38. Renderizado del modelo detallado de carrocería (Vista frontal) | 66 |
| Figura 39. Renderizado del modelo detallado de carrocería (Vista superior) | 67 |
| Figura 40. Renderizado del modelo detallado de carrocería (Vista posterior) | 67 |
| Figura 41. Renderizado del modelo detallado de carrocería (Vista Lateral) | 68 |
| Figura 42. Renderizado de la carrocería con la propuesta de chasis (Vista isométrica) | 69 |
| Figura 43. Renderizado del chasis (Vista lateral)..... | 70 |
| Figura 44. Renderizado del chasis (Vista frontal) | 70 |
| Figura 45. Renderizado chasis con visualización de espacios del auto..... | 71 |
| Figura 46. Diagrama etapas de simulación en ANSYS..... | 72 |
| Figura 47. Jerarquía de los modelos de turbulencia según su costo computacional | 73 |
| Figura 48. Mallado sin refinamiento | 80 |
| Figura 49. Fuerza en X Vs Número de elementos para una malla sin refinamiento | 81 |
| Figura 50. Mallado con refinamiento..... | 81 |

| | |
|---|-----|
| Figura 51. Fuerza en X Vs Número de elementos para una malla con refinamiento | 82 |
| Figura 52. RMS – convergencia de la simulación | 83 |
| Figura 53. Visualización de la presión dinámica (vista lateral)..... | 84 |
| Figura 54. Visualización de la presión dinámica (vista superior)..... | 84 |
| Figura 55. Visualización de la velocidad (vista lateral)..... | 85 |
| Figura 56. Visualización de la velocidad (vista superior) | 85 |
| Figura 57. Vórtices del modelo de carrocería | 86 |
| Figura 58. Gráfica Potencia Vs Velocidad | 87 |
| Figura 59. Código QR para la visualización y descarga de datos (CFD) y elementos (CAD) del proyecto | 88 |
| Figura 60. Renault Twizy | 101 |
| Figura 61. Zhidou D2S..... | 101 |
| Figura 62. Matriz de calidad con los requerimientos y especificaciones técnicas | 104 |
| Figura 63. Diferentes vistas de una carrocería tipo sedán..... | 106 |
| Figura 64. Vistas de una carrocería tipo coupé | 107 |
| Figura 65. Vistas de una carrocería tipo SUV | 108 |
| Figura 66. Evaluación de las alternativas de carrocería estudiadas | 109 |
| Figura 67. Boceto del modelo final del automóvil (Vista superior) | 110 |
| Figura 68. Boceto del modelo final del automóvil (Vista lateral)..... | 110 |
| Figura 69. Boceto del modelo final del automóvil (Vista frontal) | 110 |
| Figura 70. Ergonomía de la ubicación de una persona dentro del auto..... | 110 |
| Figura 71. Boceto de la ubicación de elementos y componentes dentro del auto | 111 |
| Figura 72. Modelo #1 diseñado en SolidWorks y simulado en Ansys..... | 112 |
| Figura 73. Modelo #2 diseñado en SolidWorks y simulado en Ansys..... | 113 |
| Figura 74. Croquis modelo de carrocería final | 113 |
| Figura 75. Modelado en SolidWorks de la carrocería (Vista isométrica frontal)... | 114 |
| Figura 76. Modelado en SolidWorks de la carrocería (Vista isométrica posterior) | 114 |
| Figura 77. Modelado de detalles de la carrocería..... | 115 |

| | |
|--|-----|
| Figura 78. Plano general de la carrocería final | 116 |
| Figura 79. Esquema de la estructura de simulación en ANSYS | 117 |
| Figura 80. Geometría del modelo sin simplificar | 118 |
| Figura 81. Geometría simplificada | 119 |
| Figura 82. Dominio establecido para la simulación | 120 |
| Figura 83. Visualización de fronteras del automóvil | 121 |
| Figura 84. Detalles de la malla de simulación | 122 |
| Figura 85. Detalles para la simulación | 123 |
| Figura 86. Condiciones de contorno | 124 |
| Figura 87. Visualización de la zona de estudio | 124 |
| Figura 88. Detalles del control del solver | 125 |
| Figura 89. Líneas de velocidad sobre la carrocería | 126 |
| Figura 90. Gráfica de la variación de la fuerza en Z vs la Velocidad | 130 |

LISTA DE ANEXOS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Anexo A. Diseño aerodinámico y de forma de la carrocería | 100 |
| Anexo B. Simulación y Evaluación Aerodinámica (CFD) de la carrocería | 117 |

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA CARROCERÍA AERODINÁMICA PARA UN VEHÍCULO ELÉCTRICO TIPO COUPÉ*

AUTOR: ANDREW ESTEBAN MUÑOZ GONZÁLEZ, ESPERANZA KATHERINE PÉREZ ROA**

PALABRAS CLAVE: INGENIERÍA AUTOMOTRIZ, AERODINÁMICA, VEHÍCULOS ELÉCTRICOS, DISEÑO, SIMULACIÓN CFX, COEFICIENTE DE ARRASTRE.

DESCRIPCIÓN:

El siguiente proyecto de investigación detalla el proceso de diseño y simulación de la aerodinámica de una carrocería para un vehículo eléctrico biplaza tomando como punto de partida la biónica de la "Leptophis Ahaetulla", especie de serpiente cuya distribución geográfica se encuentra en gran parte de países de centro y sur América, con el objetivo de incentivar la movilidad sostenible en la ciudad, promoviendo el uso de estos vehículos así como la concepción del diseño de autos en el país, de manera que no solo se implementen en Colombia (más específicamente la ciudad de Bucaramanga, Santander) sino en el resto del mundo.

Previo al desarrollo del proyecto se realizó una investigación y estudio exhaustivo de las diferentes alternativas de carrocería y características de la forma de la serpiente, estableciendo no solo parámetros y requerimientos de diseño sino también condiciones para la simulación.

Para la ejecución del proyecto, es decir, el modelado de la carrocería y chasis, se emplearon herramientas CAD, en este caso SolidWorks, mientras que para la simulación se hizo uso del software CAE (ingeniería asistida por ordenador), más específicamente ANSYS con el fin de dar fiabilidad a los datos y resultados obtenidos.

Finalmente, una vez que los resultados obtenidos indicaron un coeficiente de arrastre C_x adecuado se realizaron entonces algunas gráficas, tablas y curvas para conseguir otros parámetros como la potencia del vehículo respecto a la velocidad y la fuerza en Z.

* Proyecto de grado

** Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Director: William Pinto Hernández Doctor en ciencias de Ingeniería Mecánica

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND SIMULATION OF AN AERODYNAMIC BODYWORK FOR AN ELECTRIC VEHICLE TYPE COUPÉ.*

AUTHOR: ANDREW ESTEBAN MUÑOZ GONZÁLEZ, ESPERANZA KATHERINE PÉREZ ROA**

KEY WORDS: AUTOMOTIVE ENGINEERING, AERODYNAMICS, ELECTRIC VEHICLES, DESIGN, CFX SIMULATION, DRAG COEFFICIENT.

DESCRIPTION:

The following research project details the process of design and simulation of the aerodynamics of a bodywork for a two-seater electric vehicle taking as point as a starting point for the bionics of the "Leptophis Ahaetulla", a species of snake whose distribution geographical area is found in a large part of the countries of Central and South America, with the objective to encourage sustainable mobility in the city, promoting the use of these vehicles as well as the conception of car design in the country, so that not only implemented in Colombia (more specifically the city of Bucaramanga, Santander) but in the rest of the world. Prior to the development of the project, an exhaustive investigation and study of the different body alternatives and features of the snake shape, establishing not only parameters and design requirements but also conditions for the simulation.

For the execution of the project, that is, the modeling of the bodywork and chassis, used CAD tools, in this case SolidWorks, while for the simulation CAE (Computer Aided Engineering) software was used, more specifically ANSYS in order to give reliability to the data and results obtained.

Finally, once the results obtained indicated a drag coefficient C_x appropriate, then some graphs, tables and curves were made to get other parameters such as vehicle power versus speed and force in Z.

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanics. School of Mechanical Engineering. Director: William Pinto Hernández
Doctor of Science in Mechanical Engineering

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El sector transporte terrestre, alimentado con combustibles fósiles es una de las principales fuentes de contaminación del aire en el mundo.

Los carros, camiones y buses emiten contaminantes durante su ciclo de vida, incluyendo la operación de los vehículos y la producción del combustible. También hay emisiones asociadas con el refinamiento y distribución de combustibles, y, en menor medida, con la manufactura y chatarrización¹.

Ahora bien,

Según el Ministerio de transporte de Colombia, en el país se requiere implementar y trabajar sobre estrategias, planes y programas que permitan reducir el deterioro del aire relacionado con la contaminación, el promedio de edad del parque automotor y aumentar la vinculación de vehículos con tecnologías limpias.

La tecnología con que se han fabricado los motores, está muy asociada con su año de fabricación, el estado técnico y mecánico, el tipo y calidad del combustible que emplean, las prácticas de operación de los conductores, el tráfico, entre otras, son las principales causas relacionadas con los niveles de emisión de los vehículos².

¹ UNION OF CONCERNED SCIENTISTS. Carros, camiones, buses y la contaminación del aire. El sector transporte es uno de los mayores contaminantes del aire en Estados Unidos. UCSUSA. [en línea] 2017. Disponible en: <https://es.ucsusa.org/resources/carros-camiones-buses-contaminacion#:~:text=Los%20carros%2C%20camiones%20y%20buses,global%20en%20los%20Estados%20Unidos>.

² MINTRANSPORTE. El Ministerio de Transporte se compromete con la Calidad del Aire. [en línea] 2018. Disponible en: <https://www.mintransporte.gov.co/asuntosambientales/publicaciones/5719/el-ministerio-de-transporte-se-compromete-con-la-calidad-del-aire/>

Por otra parte, según el informe del IDEAM 2012 el sector del transporte produce alrededor de 1.32 Megatoneladas de CO₂ en Santander, este valor representa alrededor del 10% de las emisiones totales de CO₂ en el departamento. Ahora bien, teniendo en cuenta los indicadores ambientales, además del crecimiento del parque automotor, en el área metropolitana de Bucaramanga y de acuerdo a Vanguardia, *“se registraron en 2018 un total 675.656 vehículos. Representando la importancia de incentivar la utilización de vehículos eléctricos para disminuir las proyecciones de gases de efecto invernadero (GEI) en el departamento”*³.

En ese sentido, la tendencia de utilizar esta tecnología ha ido en aumento según estadísticas ofrecidas por el portal Tucarro.com, donde indican en su informe anual que *“durante 2020 la intención de compra de carros eléctricos en Colombia creció más de un 90%”*⁴. Esto evidencia una clara necesidad de diseñar y construir vehículos eléctricos inspirados y desarrollados en Colombia, impulsando a su vez, el crecimiento de la industria y la economía colombiana.

Si bien, el diseño de un vehículo eléctrico presenta un gran reto desde el punto de vista de la ingeniería automotriz, es necesario, la implementación de un diseño modular que divida en varios sistemas y componentes mecánicos el diseño de este, representando cada uno en mayor o menor medida una relación directa con la autonomía y eficiencia del vehículo.

³ VANGUARDIA. Así ha crecido el parque automotor en el área metropolitana de Bucaramanga. Vanguardia. [en línea] 2018. Disponible en: <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/asi-ha-crecido-el-parque-automotor-en-el-area-metropolitana-de-bucaramanga-ABVL445775>

⁴ INFOBAE. La intención de compra de carros eléctricos en Colombia se incrementó en más del 90% en 2020. Infobae. [en línea] 2021. Disponible en: <https://www.infobae.com/america/colombia/2021/01/06/la-intencion-de-compra-de-carros-electricos-en-colombia-se-incremento-en-mas-del-90-en-2020/#:~:text=La%20intenci%C3%B3n%20de%20compra%20de,del%2090%25%20en%202020%20%2D%20Infobae>

En términos de optimizar el vehículo se hace necesario reducir la resistencia aerodinámica.

Para un automóvil de pasajeros típico que viaja a una velocidad superior a aproximadamente 80 km / h (50 mph), la potencia necesaria para superar la resistencia aerodinámica es mayor que la necesaria para superar el balanceo resistencia de los neumáticos y la resistencia en la transmisión⁵.

Por lo tanto, debido a los efectos significativos de la resistencia aerodinámica en requisitos de potencia del vehículo a velocidades moderadas y altas; este proyecto busca desarrollar el diseño y modelado de una carrocería que posea el menor coeficiente de arrastre C_x de forma que se disminuya la potencia que el vehículo implementa para vencer la resistencia del aire, y cumpliendo a su vez con las condiciones de diseño necesarias: seguridad, funcionalidad, autonomía y componentes estéticos; motivando la incorporación y uso de los vehículos eléctricos en el país.

⁵ WONG, Jo Yung. MECH E., F. I.; Theory of Ground Vehicles. New York : John Wiley & Sons, Inc, págs. 209-210. [en línea] 2001. Disponible en: http://160592857366.free.fr/joe/ebooks/Automotive%20engineering%20books/Theory_of_ground_vehicles.pdf

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar la carrocería de un vehículo eléctrico bajo los parámetros de un automóvil tipo coupé implementando como concepto creativo la biónica de la *Leptophis Ahaetulla*, contribuyendo así con la misión de la Universidad Industrial de Santander dentro de la cual se tiene como compromiso la formación de personas de alta calidad profesional en pro del progreso y el beneficio de la industria y sociedad colombiana.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar la carrocería para un vehículo eléctrico tipo coupé que contemple la biónica de la *Leptophis Ahaetulla* mediante herramientas CAD (SolidWorks) y con los siguientes parámetros de diseño iniciales:
Carrocería: 2 Volúmenes
Número de puertas: 1
Batalla: 2300 [mm]
Vía delantera: 1464 [mm]
Vía trasera: 1443 [mm]
Número de plazas: 2
- Simular los modelos propuestos en CFD (Dinámica de fluidos computacional) con el fin de obtener una carrocería con un buen coeficiente de arrastre aerodinámico (C_x) de forma que se cumpla con los requerimientos de diseño establecidos, logrando definir la potencia necesaria para vencer la resistencia aerodinámica.

- Diseñar una estructura básica (chasis) que permita visualizar la forma de la carrocería del automóvil prescindiendo de las diferentes cargas que sufre esta y ofreciendo una alternativa de distribución estructural para futuros estudios del tema.

3. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN

El diseño de una carrocería para un vehículo eléctrico desarrollada en el presente proyecto incentiva no solo el mercado colombiano con la implementación y uso de estos autos, sino que también aporta al progreso, evolución y rediseño del concepto estético y funcional de las carrocerías de automóviles para que cumplan con ciertas condiciones aerodinámicas obteniendo un vehículo perfectamente estable, económico en consumo energético, amigable con el medio ambiente, superficialmente llamativo y con buen desempeño y comportamiento direccional a altas velocidades.

En ese sentido este proyecto vincula como área de conocimiento principal la aerodinámica, que es la ciencia que estudia los flujos de aire y que, en conjunto con la ingeniería mecánica compensan necesidades reales, permitiendo así una profundización y análisis de la influencia de distintos factores en el diseño de los vehículos.

Se dice que un automóvil tiene buena aerodinámica cuando ofrece la menor resistencia al aire posible, por lo que, fabricantes de vehículos invierten grandes cantidades de tiempo y dinero en el diseño, estudio y revisión de la mejor alternativa, así como en pruebas y prototipos para lograr un producto que integre todos los aspectos estéticos con los funcionales e ingenieriles para que lo posicionen como una competencia en el mercado de los distintos países.

Ahora bien, hablando en términos de los factores influyentes en el diseño de un automóvil estos afectan en mayor o menor medida la resistencia aerodinámica “Cx” incidiendo de forma directa no solo en el consumo de combustible o en este caso el consumo de energía sino también en el confort y estética del vehículo, por tanto, exteriores como los espejos retrovisores, rines, molduras y demás componentes

que integre el vehículo son de suma importancia ya que impactan de forma negativa en la aerodinámica.

Por otra parte, desde el punto de vista ambiental, este proyecto busca que el diseño final no represente un daño ambiental, esto bajo el principio de no maleficencia, es decir, la obligación de no infringir daño intencionadamente.

Además, desde el punto de vista económico y social se pretende aportar al desarrollo sostenible del país en términos de movilidad sustentable con ideas que incentiven a las personas a invertir en el uso de este tipo de tecnologías con la solución de un automóvil coupé dos volúmenes, alternativa con un estilo deportivo, versátil y de uso tanto familiar como personal. A su vez, se busca promover la creación de conceptos de diseño para estas y otras áreas de la ingeniería.

Por lo tanto, este proyecto propone el diseño de una carrocería inspirada en la fauna de los bosques colombianos especialmente de la serpiente *Leptophis Ahaetulla*, la cual habita en las zonas tropicales colombianas y de centro américa, modelo que no solo está dirigido al mercado colombiano, sino que permita la adaptación de este a los distintos terrenos y condiciones climáticas de los diferentes países de américa y el mundo.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS

Para la aerodinámica, diseño y evaluación CFD de la carrocería se busca apoyar este proyecto con algunos libros, guías y tesis que se mencionan a continuación, no obstante, hay muchos otros que se tienen en cuenta durante el desarrollo de este.

4.1.1 Libros.

Aerodinámica de vehículos de carretera: de la mecánica de fluidos a la ingeniería de vehículos ("Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering") (Edited by Wolf-Heinrich Hucho, 1987).

Aerodinámica de vehículos de carretera detalla la aerodinámica de automóviles de pasajeros, vehículos comerciales, automóviles deportivos y automóviles de carreras; su campo de flujo externo; así como su campo de flujo interno.

El libro, después de dar una introducción a la aerodinámica del automóvil y algunos fundamentos de la mecánica de fluidos, cubre temas como el rendimiento y la aerodinámica de diferentes tipos de vehículos, así como técnicas de prueba para su aerodinámica. El libro también cubre otros conceptos relacionados con los automóviles como los sistemas de refrigeración y ventilación para vehículos⁶

El texto representa un complemento para todos los ingenieros mecánicos y físicos que desean profundizar en la industria automotriz y comprender no solo los conceptos aerodinámicos sino también la importancia del campo de la seguridad vial y la producción de automóviles.

⁶ SCIENCE DIRECT. Aerodinámica de los vehículos de carretera: De la mecánica de fluidos a la ingeniería de vehículos. [en línea] disponible en: <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2191/book/9780750612678/aerodynamics-of-road-vehicles>

H-Point: los fundamentos del diseño y embalaje de automóviles (“H-Point: The Fundamentals of Car Design and Packaging”) (Stuart Macey & Geoff Wardle, 2009).

Este libro es un

compilado para los aspirantes a creadores de automóviles de todo el mundo, H-Point ofrece una introducción única y completa al diseño y empaquetado de vehículos avanzados. Escrito e ilustrado por Stuart Macey con Geoff Wardle, este libro desmitifica el proceso de diseño automotriz y permite a los diseñadores acceder a una carrera ilustre digna de conocimiento. Stuart trabaja actualmente como ingeniero de estudio en el estudio Hyundai Design North América en el sur de California y enseña arquitectura de vehículos a tiempo parcial en Art Center College of Design. Geoff es director de Movilidad Avanzada en Art Center⁷.

Guía de tutoriales de ANSYS FLUENT (“ANSYS FLUENT Tutorial Guide”) (2011)

La guía de tutoriales de ANSYS FLUENT contiene una serie de tutoriales que enseñan cómo utilizar Ansys fluyente para resolver diferentes tipos de problemas. En cada tutorial, se muestran las funciones relacionadas con la configuración del problema y el post-procesamiento⁸.

4.1.2 Tesis.

Diseño y construcción de la carrocería de un vehículo de competencia tipo fórmula SAE. (Juan F. Pauta & Miguel L. Sánchez, 2014)

En esta tesis de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca de Ecuador se realiza el diseño y construcción de la carrocería de un vehículo de competencia tipo

⁷ CURB. H-Point: los fundamentos del diseño y embalaje de automóviles. Curb. [En línea] [Citado el: 01 de Junio de 2021] disponible en: <https://thecurbshop.com/products/h-point-the-fundamentals-of-car-design-packaging-2nd-edition>.

⁸ YUMPU. Guía de tutoriales de ANSYS FLUEN. [En línea] 2013. [Citado el: 01 de junio de 2021.] disponible en: <https://www.yumpu.com/en/document/view/2459518/ansys-fluent-tutorial-guide>

fórmula SAE donde inicialmente se expone todo el fundamento teórico para la concepción del diseño, así como la ejecución y construcción de este, a su vez, se habla de ciertos conceptos preliminares y ecuaciones que describen el comportamiento y movimiento de un fluido.

Se incorpora la dinámica de fluidos computacional CFD para realizar un análisis de la geometría diseñada, además como el proyecto se lleva a la fase de construcción se agregan los apartados de moldes y materiales más utilizados para la fabricación de prototipos de formula SAE, así como un análisis financiero y de costos de producción.

Entre las conclusiones de la tesis se destaca que las ecuaciones de gobierno que rigen el comportamiento de un flujo alrededor de un sólido para la simulación y análisis de las diferentes geometrías, se basan en el modelo matemático de turbulencia K-épsilon, el mismo que se resuelve mediante el método de volúmenes finitos en un dominio definido, constituyendo un medio para el análisis de la geometría. Además, para determinar la geometría más adecuada de carrocería con el mayor rendimiento aerodinámico, los valores iniciales de las curvas de comportamiento de las presiones frontales deben poseer el más bajo valor y disminuir rápidamente hasta la presión final en la parte posterior de la manera más rápida posible, así como también permitir la mayor velocidad del paso de flujo de aire a través de su geometría en el menor tiempo posible (PAUTA SOLANO, y otros, 2014)⁹.

Diseño y construcción del bastidor y carrocería, de un vehículo eléctrico biplaza plegable, usando software CAD-CAE y manufactura ecuatoriana (Carlos W. Cunalata & Jorge S. Terán, 2014)

⁹ PAUTA SOLANO, Juan Fernando y SÁNCHEZ RAMÍREZ, Miguel Leonardo. Diseño y construcción de la carrocería de un vehículo de competencia tipo formula SAE. [Tesis. Ingeniero mecánico automotriz] Cuenca: Universidad Politecnica Salesiana. [En línea] noviembre de 2014. [Citado el: 22 de mayo de 2021] disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7183/1/UPS-CT004048.pdf>

Esta tesis de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE de Ecuador detalla paso a paso los procesos de diseño y construcción del bastidor y carrocería para un vehículo biplaza, el mismo que será propulsado por energía eléctrica. Para la ejecución del proyecto se han empleado herramientas CAD, para posteriormente con el uso de software CAE, realizar pruebas tanto estáticas como aerodinámicas, con el fin de dar fiabilidad al diseño del bastidor y la carrocería¹⁰.

La tesis se encuentra dividida por capítulos donde el capítulo II reúne todos los conceptos y antecedentes teóricos necesarios para la comprensión y entendimiento del desarrollo de todo el proyecto, a su vez, los demás capítulos exponen los diferentes requerimientos técnicos para el diseño y construcción de los componentes, así como el análisis financiero de costos.

Estudio de los modelos de turbulencia aplicados a la aerodinámica externa de un automóvil mediante software de dinámica computacional de fluidos (Rafael Cerpa, Eduardo A. Nieto & Lina Londoño, 2016)

En este fragmento de tesis se presenta un estudio que define el método de convergencia más exacto utilizando software de dinámica computacional de fluidos en un automóvil concepto urbano, comparando dichos resultados con pruebas experimentales en el túnel de viento. Los métodos de turbulencia Reynolds-Averaged Navier-Stokes - RANS- utilizados fueron Spalart Allmaras, $k-\epsilon$, $k-\omega$ y $k-k\ell-\omega$, debido a que no requieren demasiados recursos computacionales, tal como RSM y LES.¹¹

¹⁰ CUNALATA CUNALATA, Carlos Wilfrido y TERÁN VACA, Jorge Santiago. Diseño y construcción del bastidor y carrocería, de un vehículo eléctrico biplaza plegable, usando Software CAD-CAE y manufactura ecuatoriana. [Repositorio Institucional de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE]. [En línea] agosto de 2014. [Citado el: 27 de mayo de 2021.] <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/8845>.

¹¹ CERPA Rafael; NIETO CRUZ Eduardo Alfredo; LONDOÑO Lina. Estudio de los modelos de turbulencia aplicados a la aerodinámica externa de un automóvil mediante software de dinámica computacional de fluidos [en línea] 2016 disponible en: https://www.researchgate.net/publication/314869722_Estudio_de_los_modelos_de_turbulencia_aplicados_a_la_aerodinamica_externa_de_un_automovil_mediante_software_de_dinamica_computacional_de_fluidos

4.2 REFERENTES TEÓRICOS

En el desarrollo de un proyecto es indispensable realizar la búsqueda y recolección de información de los conceptos teóricos para conocer los fundamentos o referentes a las líneas de investigación en las cuales se lleva a cabo el estudio, de manera que se puedan establecer los lineamientos adecuados para el entendimiento y la ejecución de los objetivos planteados. En ese sentido, a continuación, se presentan las respectivas bases teóricas del proyecto propuesto.

4.2.1 Biónica

La biónica es una buena herramienta que ha contribuido en la formación del diseño, ya sea por el aporte de los modelos naturales como ejemplificación de algunos conceptos, o por la aplicación de muchas soluciones de diseño en distintos campos: ingeniería de materiales, medicina, implementos tecnológicos, arquitectura entre otros. En diversos campos del diseño, son conocidas las grandes contribuciones que puede hacer la biónica para el desarrollo de modelos conceptuales de uso habitual en el diseño. Más aún cuando se trata de criterios como la forma y la función, que están íntimamente ligados a las ejemplificaciones biológicas. Cuando se trata de indagar sobre las contribuciones de la biónica en el diseño, no se precisa con claridad la influencia que el primero puede tener sobre el segundo, debido a que la mayoría de los diseñadores sólo consideran los aspectos formales de esta disciplina, y no los funcionales, estructurales, entre otros.¹²

4.2.2 Leptophis Ahaetulla.

Es un reptil que habita las zonas tropicales, bosques y sobre todo la vegetación alrededor de quebradas y pantanos. Es arborícola y se encuentra principalmente

¹² SARMIENTO, Mariluz. La relación entre la biónica y el diseño para los criterios de forma y función. Facultad de diseño y comunicación de la Universidad de Palermo. [En línea] [Citado el: 24 de mayo de 2021] disponible en: https://fido.palermo.edu/servicios_dyc/publicacionesdc/cuadernos/detalle_articulo

activa durante las horas del día. Su tamaño varía de acuerdo con la familia entre 10-15 cm y hasta 2 m.

Figura 1. *Leptophis Ahaetulla*



Fuente: VARGAS DURÁN, Luis. *Leptophis ahaetulla*. [En línea] 20 de diciembre de 2018. [Citado el 24 de mayo de 2021] Disponible en: <https://www.flickr.com/photos/36288885@N02/18584504930/in/photostream/>.

“La serpiente tiene forma cilíndrica y alargada, su cuerpo está totalmente cubierto por escamas y no poseen extremidades, se les denomina animales de sangre fría debido a que no tienen la capacidad de regular a ellas misma su temperatura” (Hum).¹³

“La *Leptophis* es una serpiente no venenosa, que posee las siguientes características: La coloración ventral y dorsal es verde pasto, con una delgada franja negra que parte de los ojos hasta la comisura bucal. La lengua es azul verdoso”.¹⁴

¹³ INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE RECURSOS BIOLÓGICOS ALEXANDER VON HUMBOLDT. Serpientes de los andes colombianos. Bogotá [en línea] disponible en: <http://www.bionica.info/Biblioteca/RodriguezSerpientesColombia.pdf>

¹⁴ FUNDACIÓN BOTÁNICA Y ZOOLOGICA DE BARRANQUILLA. Bejuquillo Verde. [En línea] disponible en: https://www.zoobaq.org/especieani/bejuquillo_verde.php

Figura 2. Vista lateral Leptophis



Fuente: UETZ, Peter. The reptile database. *Leptofis ahaetulla* (LINNAEUS, 1758). [En línea]. [Consultado 24 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://reptile-database.reptarium.cz/species?genus=Leptophis&species=ahaetulla>.

“Sus escamas son lisas situadas una al lado de la otra. le confiere a la serpiente un aspecto liso y brillante. Por otra parte, sus dientes son numerosos, pequeños y ganchudos”¹⁵.

4.2.2 Automóvil.

4.2.2.1 Dimensionamiento de un vehículo.

- **Batalla:** La Batalla o también llamada distancia entre ejes es la longitud medida entre el centro de la rueda delantera y el centro de la rueda trasera.
- **Vía delantera:** Es la distancia entre las ruedas del mismo eje, es decir la distancia que existe entre el centro de la rueda izquierda delantera y la rueda derecha delantera.
- **Vía trasera:** Es la distancia entre las ruedas del mismo eje, es decir la distancia que existe entre el centro de la rueda izquierda trasera y la rueda derecha ficha técnica.

¹⁵ INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE RECURSOS BIOLÓGICOS ALEXANDER VON HUMBOLDT. Op. Cit.

- **Longitud:** es la distancia de la carrocería entre la parte delantera y la trasera
- **Altura:** es la distancia que existe entre el piso y el techo de la carrocería del automóvil.

4.2.3 Carrocería. La carrocería es la capa exterior del vehículo, esta permite dar forma y utilidad al chasis o plataforma.

Figura 3. Diferencia entre chasis y carrocería



Fuente: ALVARADO, Palomino. *Diferencia entre chasis y carrocería*. [En línea] 31 de julio de 2015. [Citado el: 08 de junio de 2021.] disponible en: <https://www.nitro.pe/mecanico-nitro/diferencia-entre-chasis-y-carroceria.html>

La carrocería es la estructura básica que permite crear el habitáculo en el que se situarán los pasajeros y la carga. Además, es la que permite dotar de una estética y funcionalidad concretas al mismo.

Actualmente, la carrocería no cumple sólo la función de crear el habitáculo, sino que sirve para mejorar las prestaciones y las emisiones contaminantes del vehículo a través de una mayor ligereza, un perfil más aerodinámico o una habitabilidad interior más eficiente. Además, permite incrementar la seguridad con niveles variables de resistencia o deformación controlada y programada, permitiendo una absorción de energía proveniente de los impactos vital para el bienestar de los ocupantes¹⁶.

¹⁶ MOTOR. ¿Qué es la carrocería? Tipos y características. [En línea] [Citado el: 08 de junio de 2021] disponible en: <https://www.motor.es/que-es/carroceria>

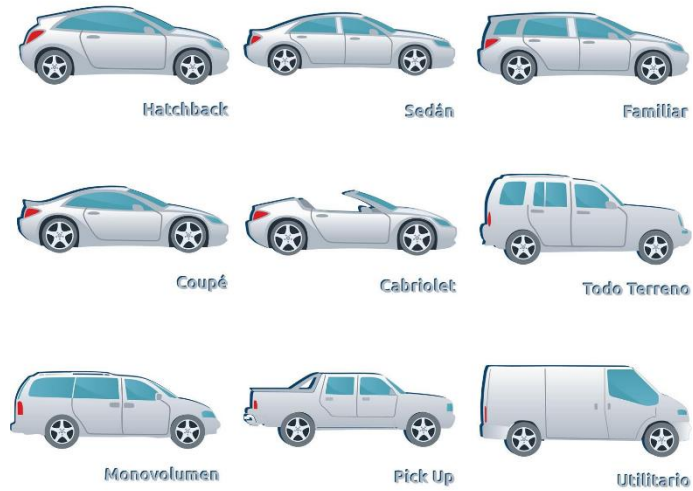
4.2.3.1 Tipos de carrocería. En la actualidad se cuenta con un gran número de carrocerías que se adaptan a todas las necesidades y demandas del terreno, así como a los requerimientos de los clientes y fabricantes de vehículos. En ese sentido a continuación se presentan algunos tipos de carrocería:

- **Carrocería con chasis independiente:** el chasis soporta la mecánica, pudiendo rodar incluso sin carrocería. Esta se atornilla al chasis y puede separarse para su reparación. Es propia de todoterrenos y vehículos industriales.
- **Plataforma con carrocería separada:** Similar al anterior tipo, pero sobre una plataforma en lugar de un chasis. La carrocería también va atornillada a la misma.
- **Carrocería monocasco:** Todo el conjunto se realiza en una sola pieza, aunque dispone de elementos desmontables como el capó motor, las puertas o los parachoques.
- **Carrocería autoportante:** Es la más común en la actualidad y consta de numerosas piezas soldadas entre sí que acaban formando la estructura del vehículo. La carrocería acaba completándose en el exterior por elementos desmontables como puertas o capós. Gracias a ello, el coste de reparación o sustitución de los elementos de la carrocería es menor¹⁷.

4.2.3.2 Tipos de carrocería según su forma. La forma de la carrocería es una notación en la que se conservan ciertas características como la altura, distancia entre ejes (Batalla), número de puertas, forma de las líneas de diseño, entre otras características. Las carrocerías Coupé deriva de un auto deportivo de altura baja sus curvas van consecuentes longitudinalmente formando una estructura agresiva y muy estética se le llama coupé estrictamente a los modelos de carrocería cerrada fija y dos puertas.

¹⁷ Ibíd.

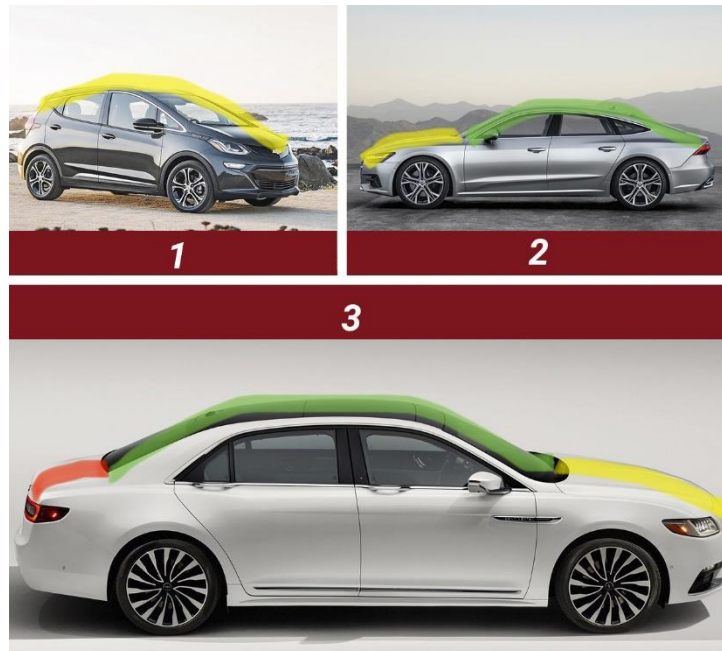
Figura 4. Segmentos automotrices



Fuente: CALAZA, Hernando. ¿Cuáles son los segmentos automotrices? Autocosmos. [En línea] 04 de octubre de 2013. [Citado el: 24 de mayo de 2021.] disponible en: <https://especiales.autocosmos.com.ar/tecnologia/noticias/2013/10/04/cuales-son-los-segmentos-automotrices>.

4.2.3.3 Según sus líneas y volúmenes. La forma de la carrocería según sus volúmenes y líneas nos permiten denotar de una manera más exacta la configuración que tendrá el vehículo ya que esta notación permite tener en cuenta el quiebre de las líneas de forma, estos quiebres dividen los espacios del automóvil en volúmenes como lo son Monovolumen, dos volúmenes, entre otros.

Figura 5. Líneas de volumen



Fuente: JUÁREZ, Mau. El ABC de los tipos de carrocerías: cuándo es un sedán, cuándo un SUV y cuándo un invento del marketing. 2020.

4.2.4 Aerodinámica de la carrocería. La aerodinámica aplicada a la carrocería de un automóvil hace referencia al estudio de la influencia que tiene el aire en el vehículo según sean las formas de éste.

En ese sentido, realizar un buen estudio aerodinámico del vehículo es fundamental, pues el comportamiento del aire en torno al vehículo influye, por ejemplo, en:

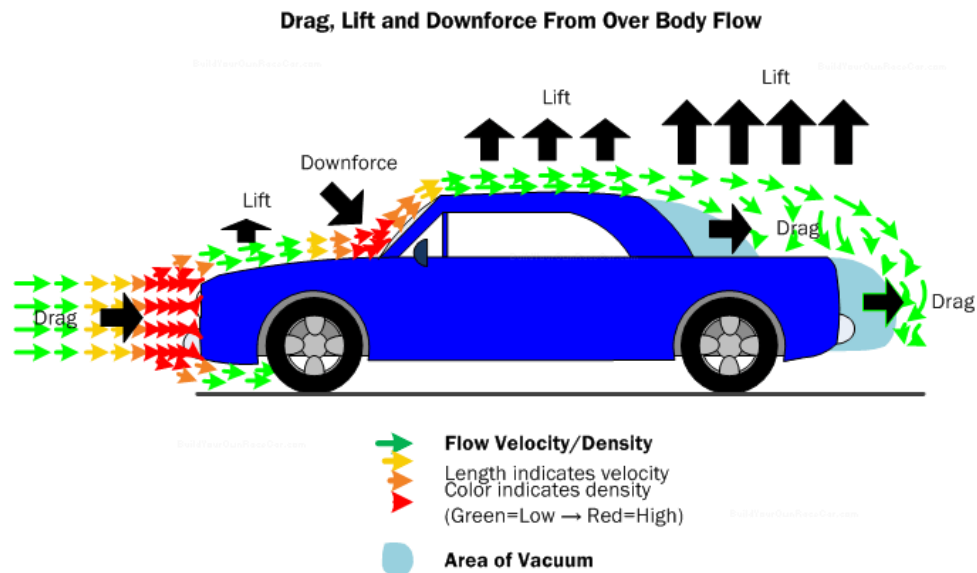
- La mayor o menor resistencia al avance.
- Las reacciones del coche ante el viento lateral.
- La mayor o menor capacidad para mantenerse estable a altas velocidades.
- Los flujos de aire a determinados elementos del vehículo.¹⁸

¹⁸ AYALA, David. Aerodinámica conceptos básicos. [En línea] [Citado el: 19 de enero de 2022.] disponible en: <https://motorgiga.com/el-automovil-a-fondo/aerodinamica-conceptos-basicos/gmx-niv199-con387137.htm>.

Por lo tanto, un buen estudio de la aerodinámica dará como resultado un auto que será más ecológico porque consumirá menos combustible o en este caso menos electricidad. Además, el auto será más eficiente y seguro ya que permitirá enviar más aire a las zonas donde más se requiere obteniendo un vehículo más estable y confiable.

4.2.4.1 El Drag (resistencia al avance) sobre un automóvil.

Figura 6. Efecto de diferentes fuerzas sobre la carrocería de un automóvil



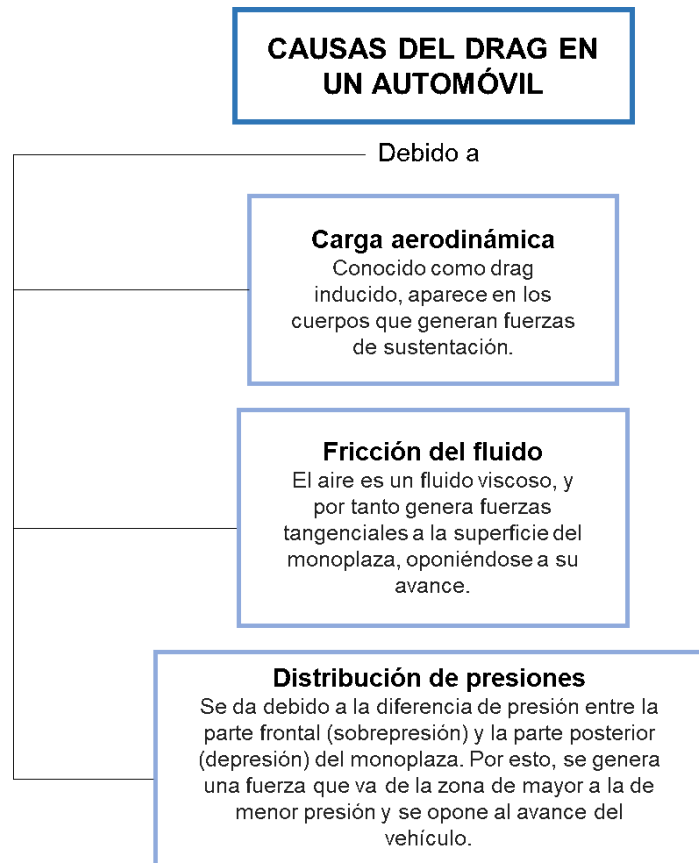
Fuente: CLAES, Bert.. Techtalk: Lift. [En línea] 08 de Febrero de 2016. [Citado el: 30 de Enero de 2022.] disponible en: <https://drivr.be/2016/08/02/techtalk-lift/>.

El efecto tangible de la aerodinámica sobre un cuerpo es la aparición de fuerzas que afectan a su dinámica. Hablando en términos automovilísticos, el drag es la fuerza que experimenta el monoplaza en la dirección de avance y en sentido contrario a este. Por tanto, dicha fuerza se opone a su movimiento longitudinal.¹⁹

¹⁹ FERNÁNDEZ OSMA. Las fuerzas sobre el monoplaza, drag y lift (o downforce). [En línea] 03 de Septiembre de 2019. [Citado el: 30 de Enero de 2022.] disponible en: <https://www.aerodinamicaf1.com/2019/09/las-fuerzas-sobre-el-monoplaza-drag-y-lift-o-downforce/>.

Ahora bien, el “drag” en un automóvil puede tener diferentes fuentes, entre ellas se destacan las siguientes:

Figura 7. Fuentes principales del drag en un vehículo



Fuente: Elaboración por autores con información tomada de: FERNÁNDEZ OSMA. 2019. AERODINÁMICA F1. Las fuerzas sobre el monoplaza, drag y lift (o downforce). [En línea] 03 de Septiembre de 2019. [Citado el: 30 de Enero de 2022.] <https://www.aerodinamicaf1.com/2019/09/las-fuerzas-sobre-el-monoplaza-drag-y-lift-o-downforce/>.

La ecuación que se emplea para calcular la fuerza “Drag” es la siguiente:

$$D = \frac{1}{2} \rho A C_D V^2$$

Donde,

D es el “*drag*”, ρ es la densidad del aire, A es el área frontal del vehículo, V es la velocidad a la que circula y C_D es el coeficiente adimensional de resistencia al avance y representa los efectos combinados de varios factores como la forma.

4.2.4.2 Influencia del Lift (o Downforce) sobre un automóvil.

El “*Lift*” es la fuerza de elevación o de sustentación vertical que provoca que los aviones se eleven y se mantengan en el aire. En el mundo del automovilismo se busca crear el efecto contrario, el “*Downforce*”, generalmente traducido al español como “carga aerodinámica”. Esta fuerza también es vertical, pero en este caso apunta hacia el suelo, siendo su efecto el de empujar al vehículo hacia el asfalto.²⁰

Figura 8. Fuerzas Down y Drag sobre un automóvil



Fuente: ANOTHER INDIAN GEEK. F1 Basics – Downforce & Drag. [En línea] 15 de Abril de 2021. [Citado el: 30 de Enero de 2022.] disponible en: <https://anotherindiangeek.com/2021/04/15/f1-basics-downforce-drag/>.

La ecuación que se emplea para calcular la fuerza “*Lift o Downforce*” es la siguiente:

²⁰ FERNÁNDEZ OSMA. Op. Cit.

$$L = \frac{1}{2} \rho A C_L V^2$$

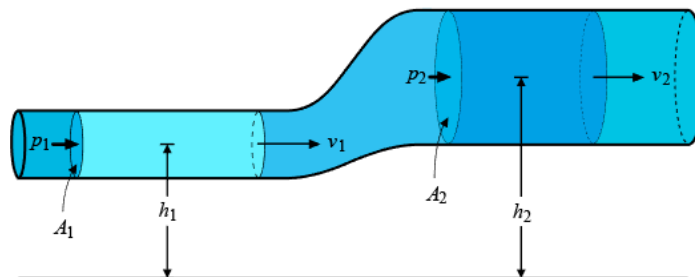
Donde,

L es el “Lift” (o “Downforce” en negativo), ρ es la densidad del aire, A es el área frontal del vehículo, V es la velocidad a la que circula y C_L es el coeficiente de sustentación: varía según el ángulo de ataque, la forma del ala, qué tan rápido va el automóvil, etc.

4.2.5 Principio de Bernoulli.

El principio de Bernoulli presenta la base en la que se fundamenta el comportamiento aerodinámico de cualquier vehículo terrestre. En la teoría, dicho principio sólo se puede aplicar a fluidos ideales, es decir, sin viscosidad. Sin embargo, en la práctica, se puede aplicar a flujos incompresibles (de densidad constante) con caudal constante que sí que presenten una cierta viscosidad, como es el caso del aire que rodea a un monoplaza de Fórmula 1 en movimiento.²¹

Figura 9. Teorema de Bernoulli



Fuente: MANNY Max. Bernoullis Law Derivation diagram. [En línea] 06 de Octubre de 2007. [Citado el: 29 de Enero de 2022.] disponible en: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BernoullisLawDerivationDiagram.svg>.

²¹ FERNÁNDEZ OSMA, Mario. El principio de Bernoulli, la base de la aerodinámica. [En línea] 03 de Septiembre de 2019. [Citado el: 29 de Enero de 2022.] disponible en: <https://www.aerodinamicaf1.com/2019/09/el-principio-de-bernoulli/>.

El teorema de Bernoulli se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{1}{2}mv^2 + mgh + pV = cte$$

Donde:

v es la velocidad de flujo del fluido en la sección considerada.

V es el volumen.

g es la constante de gravedad.

h es la altura desde una cota de referencia.

p es la presión a lo largo de la línea de corriente del fluido (p minúscula).

ρ es la densidad del fluido.

Tabla 1. Descripción de la energía en la ecuación de Bernoulli

| | | |
|---|---|-------------------|
| Energía cinética (hidrodinámica) | Energía que posee el fluido debido a su movimiento. | $\frac{1}{2}mv^2$ |
| Energía potencial | Energía debida a la altitud del fluido. | mgh |
| Energía de flujo (hidrostática) | Energía Debida a la presión a la que está sometido el fluido. | pV |

Normalmente, cuando se aplica la ecuación de Bernoulli al estudio aerodinámico de un monoplaza, la energía potencial se puede despreciar, quedando la ecuación simplificada.

$$\frac{\rho v^2}{2} + p = cte$$

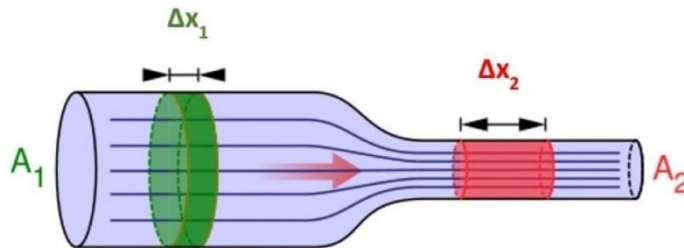
4.2.6 Principio de continuidad

El principio de continuidad es una de las leyes fundamentales que se emplea en el análisis y evaluación de los flujos uniformes. De este principio, y la ecuación general, se deriva el hecho de que la masa

siempre se conserva en los sistemas de fluidos. Independiente de la complejidad en que tenga la dirección del tubo o la tubería donde se encuentra.

Si existe un flujo constante en un canal determinado, y el principio de conservación de la masa se aplica al sistema, existirá una continuidad del flujo sobre este.²²

Figura 10. Esquema de la continuidad de un fluido



Fuente: ZAPATA, Fanny. *Ecuación de continuidad*. [En línea] 19 de Abril de 2021. [Citado el: 30 de Enero de 2022.] disponible en: <https://www.lifeder.com/ecuacion-de-continuidad/>.

Para fluidos compresibles:

$$M = \rho Av$$

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 ; M = cte$$

O, en el caso de fluidos incompresibles:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 ; \rho = cte$$

Av representa el volumen de fluido que pasa a través de un tubo por segundo y se llama tasa de flujo volumétrico o caudal Q .

²² PRINCIPIO DE. Principio de continuidad. [En línea] 19 de Diciembre de 2019. [Citado el: 30 de Enero de 2022.] disponible en: <https://www.principiode.com/principio-de-continuidad/>.

$$Q = Av$$

Donde:

Q es el flujo volumétrico.

ρ es la densidad del fluido.

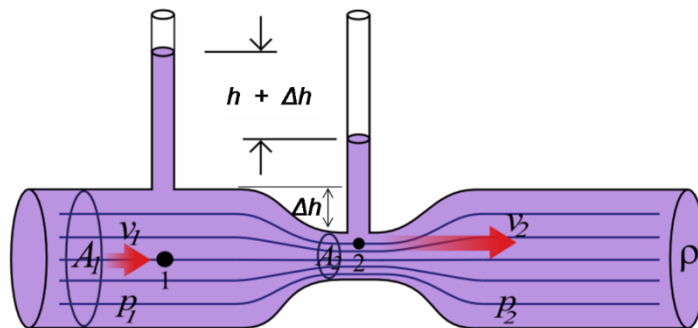
A es el área de la sección transversal.

v es la velocidad de flujo.

M es la masa de fluido.

4.2.7 Efecto Venturi. El efecto Venturi se basa en el Principio de Bernoulli y el principio de la continuidad de la masa y explica que, en un conducto cerrado, la presión disminuye cuando aumenta la velocidad al pasar por una sección más estrecha.

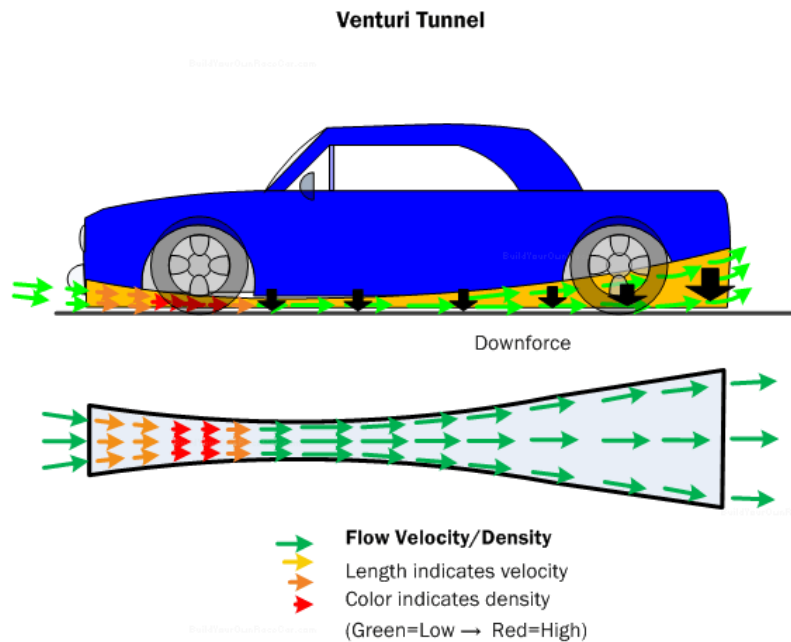
Figura 11. Esquema del efecto Venturi



Fuente: HAPPY APPLE. Venturi fixed. [En línea] 19 de Mayo de 2006. [Citado el: 30 de Enero de 2022.] disponible en: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Venturifixed2.PNG>.

“En ciertas ocasiones, cuando el aumento de la velocidad es muy grande, la presión disminuye mucho, y provoca que se produzca una aspiración, la cual tiene ciertas aplicaciones en la automoción y automovilismo”.²³

Figura 12. Efecto Venturi en un automóvil



Fuente: FREEPNG Car Venturi efecto difusor Downforce Clip art - teoría del flujo. [En línea] [Citado el: 30 de Enero de 2022.] disponible en: <https://www.freepng.es/png-kev5ol/>.

En ese sentido, el efecto Venturi favorece la creación de carga aerodinámica en un auto ya que produce una succión de aire que empuja el vehículo hacia abajo, es decir hacia el asfalto. “Además, gracias al efecto suelo producido, los fondos planos y difusores pueden funcionar sin problema ayudando al auto a disminuir su presión conforme la velocidad aumente, provocando muchísimo “*Downforce*” y prácticamente nada de “*Drag*”²⁴.

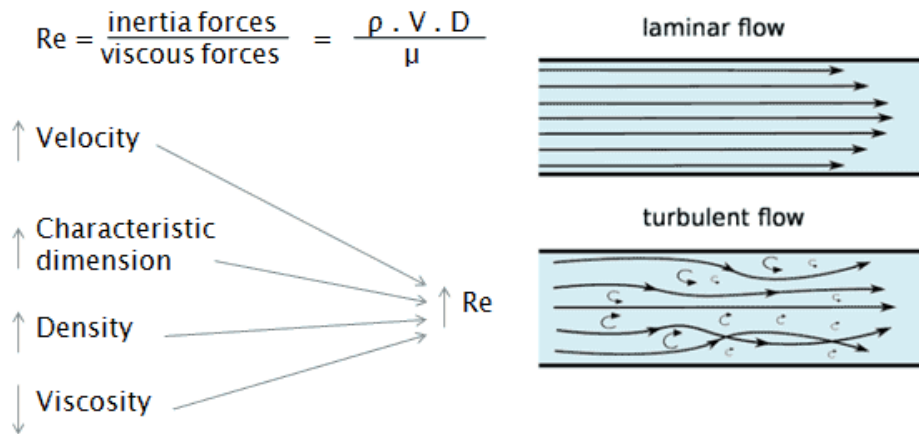
²³ ORIOL. El Efecto Venturi en la Fórmula 1. [En línea] 10 de Agosto de 2018. [Citado el: 30 de Enero de 2022.] disponible en: <https://www.racingatmosphere.com/aerodinamica/efecto-venturi/>

²⁴ Ibíd.

4.2.8 Número de Reynolds. Es un número adimensional compuesto por las características físicas del flujo. Un número creciente de Reynolds indica una turbulencia creciente del flujo.

El número de Reynolds es la relación de fuerzas de inercia a fuerzas viscosas y es un parámetro conveniente para predecir si una condición de flujo será laminar o turbulento. Se puede interpretar que cuando las fuerzas viscosas son dominantes (flujo lento, baja Re) son suficientes para mantener todas las partículas de fluido en línea, entonces el flujo es laminar. Incluso Re muy bajo indica movimiento de arrastre viscoso, donde los efectos de inercia son insignificantes. Cuando las fuerzas de inercia dominan sobre las fuerzas viscosas (cuando el fluido fluye más rápido y Re es más grande), el flujo es turbulento.²⁵

Figura 13. Comportamiento del número de Reynolds dependiendo del tipo de fluido



Fuente: CONNOR, Nick. ¿Qué es el número de Reynolds? – Definición. [En línea] 20 de enero de 2020. [Citado el: 30 de enero de 2022.] disponible en: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-numero-de-reynolds-definicion/>.

El número de Reynolds se define como:

²⁵ CONNOR, Nick. ¿Qué es el número de Reynolds? – Definición. [En línea] 20 de Enero de 2020. [Citado el: 30 de Enero de 2022.] disponible en: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-numero-de-reynolds-definicion/>.

$$Re_D = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu}$$

donde:

V es la velocidad del flujo,

D es una dimensión lineal característica (longitud recorrida del fluido; diámetro hidráulico, etc.)

ρ densidad del fluido (kg / m^3),

μ viscosidad dinámica (Pa.s),

ν viscosidad cinemática (m^2 / s); $\nu = \mu / \rho$.

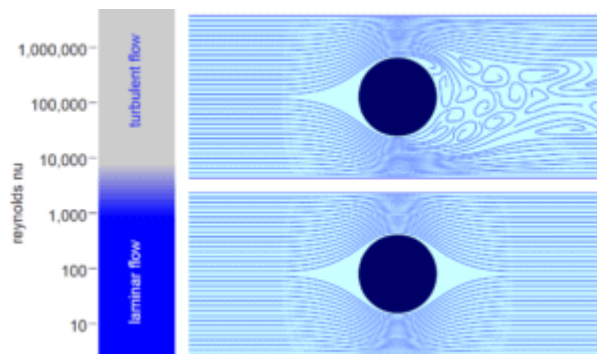
Ahora bien,

$Re < 2000 \rightarrow$ Flujo laminar

$2000 \leq Re \leq 4000 \rightarrow$ Flujo transitorio

$Re > 4000 \rightarrow$ Flujo turbulento

Figura 14. Régimen del número de Reynolds



Fuente: CONNOR, Nick. ¿Qué es el número de Reynolds? – Definición. [En línea] 20 de enero de 2020. [Citado el: 30 de enero de 2022.] disponible en: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-numero-de-reynolds-definicion/>

4.2.9 Flujos de aire.

- **Interior:** Se presenta por dos necesidades críticas: la refrigeración del motor y la aireación del habitáculo de pasajeros manteniendo en este caso una temperatura interior constante, con independencia de la velocidad del vehículo y la temperatura exterior.
- **Exterior:**

este flujo de aire actúa sobre la superficie exterior produciendo zonas de presión, depresión y rozamiento e influyendo no solo en el avance final del vehículo por la resistencia aerodinámica generada, sino también por los esfuerzos que se generan sobre las llantas y a elevadas velocidades sobre la estabilidad direccional del mismo.²⁶

- **Laminar:** es un flujo ordenado, en el que el fluido se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse. Cuanto mayor sea el flujo laminar, menor será la resistencia aerodinámica.
- **Turbulento:** “es un flujo caótico, aparecerá una gran mezcla entre las distintas capas de fluido y el movimiento vendrá dominado por la aparición de vórtices (o remolinos)”.²⁷

4.2.10 Parámetros aerodinámicos de un automóvil.

C_x: “El c_x es lo que se conoce como coeficiente de resistencia aerodinámica. Es la expresión de la resistencia que ofrece un cuerpo a moverse dentro de un fluido por razón de su forma”²⁸.

²⁶ ISKANDAR, Fraija B. 2006. Estudio de la aerodinámica en los vehículos. s.l. : Prospectiva Vol. 4. 1692-8261. [en línea], 2006. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/4962/496251108011.pdf>

²⁷ FERNÁNDEZ OSMA, Mario. Flujo laminar y turbulento. [En línea] 07 de Octubre de 2019 [Citado el: 22 de enero de 2022] <https://www.aerodinamicaf1.com/2019/10/flujo-laminar-y-turbulento/>

²⁸ HELLOAUTO. C_x. Glosario helloauto. [En línea] [Citado el: 04 de junio de 2021] disponible en: <https://helloauto.com/glosario/cx>.

Cz: “Es el coeficiente que se refiere a la sustentación y que, en los coches, al contrario que en las aeronaves, se busca que sea negativa para mantenerlos pegados al suelo”²⁹. Simplificando es el coeficiente que permite mantener un valor de Fuerza vertical.

Resistencia aerodinámica Total: “Es la resultante de la fuerza que experimenta o sufre un cuerpo (cualquiera se éste) que se va moviendo atravesando el aire en la dirección de la velocidad relativa entre el mismo aire y el cuerpo propiamente dicho”³⁰.

Arrastre por Fricción: “Es la Fuerza generada por la interacción y contacto de un cuerpo rígido y un fluido, es un efecto de tipo superficial también llamado efecto piel ocasionado por la viscosidad del fluido y la rugosidad de la superficie”³¹.

Arrastre por Presión: “El arrastre de forma conocido también como arrastre de presión surge debido a la forma y el tamaño del objeto. El arrastre de presión es proporcional a la diferencia entre las presiones que actúan en la parte frontal y posterior del cuerpo sumergido, y el área frontal”³².

²⁹ CURRO, San Miguel. Cortando el viento: la importancia de la aerodinámica en los coches. Autocasión. [En línea] 19 de febrero de 2020. [Citado el: 04 de junio de 2021.] disponible en: <https://www.autocasion.com/actualidad/reportajes/importancia-aerodinamica-coche-cx-cy-czs#:~:text=Las%20fuerzas%20que%20act%C3%BAan%20sobre,que%20se%20refiere%20a%20la>

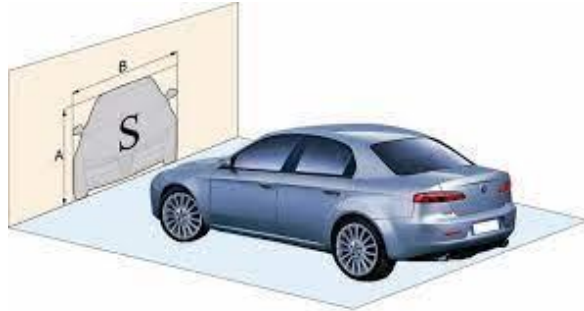
³⁰ DEFINICIÓN ABC. Definición de Resistencia Aerodinámica. [En línea] septiembre de 2008. [Citado el: 04 de junio de 2021.] disponible en: <https://www.definicionabc.com/motor/resistencia-aerodinamica.php>

³¹ ROSAS, Carlos. Arrastre y Sustentación. [En línea] [Citado el: 04 de junio de 2021.] <https://sites.google.com/site/0902carlosr/arrastre-y-sustentacin>

³² CONNOR, Nick. Qué es el arrastre – Resistencia al aire y a los fluidos – Definición. [En línea] 06 de enero de 2020. [Citado el: 04 de junio de 2021.] disponible en: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-arrastre-resistencia-al-aire-y-a-los-fluidos-definicion/#:~:text=Arrastre%20de%20presi%C3%B3n-,El%20arrastre%20de%20forma%20conocido%20tambi%C3%A9n%20como%20arrastre%20de%20presi%C3%B3n,sumergido%20y%20e>

Superficie frontal (S): Es el área proyectada en un plano perpendicular al plano longitudinal del auto en el cual se marca la silueta frontal o posterior del auto.

Figura 15. Superficie frontal de un automóvil



Fuente: OLIVARES, José. Estudio aerodinámico aplicado en el campo de la automoción. 2011, pág. 16.

Cx.S: Es la multiplicación del valor Cx por la superficie frontal del vehículo (S) y considera el tamaño y forma del vehículo. Cuanto más grande sea la superficie frontal de un auto, mayor será la capa de aire que deba atravesar, utilizando por tanto más fuerza.

4.2.11 Ecuación Navier Stokes

Estas ecuaciones determinan el comportamiento de los llamados fluidos newtonianos. Un fluido newtoniano es aquel cuya resistencia a deformaciones (viscosidad) puede considerarse constante en el tiempo. El ejemplo más socorrido es el agua (viscosidad nula), aunque otros fluidos habituales en nuestro quehacer diario, bajo condiciones normales de presión y temperatura, se comportan como newtonianos, como el aire, algunos aceites, etc.³³

³³ POBLACIÓN SÁEZ, Alfonso Jesús. Las ecuaciones que nadie ha conseguido resolver y que valen un millón de dólares. [En línea] 09 de Mayo de 2017. [Citado el: 01 de Febrero de 2022.] disponible en: https://www.abc.es/ciencia/abci-navier-stokes-ecuaciones-nadie-conseguido-resolver-y-valen-millon-dolares-201705021028_noticia.html

Figura 16. Términos de la ecuación general de Navier Stokes

$$\rho \left(\underbrace{\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}}_{\text{Unsteady acceleration}} + \underbrace{\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}}_{\text{Convective acceleration}} \right) = \underbrace{-\nabla p}_{\text{Pressure gradient}} + \underbrace{\mu \nabla^2 \mathbf{v}}_{\text{Viscosity}} + \underbrace{\mathbf{f}}_{\text{Other forces}}$$

Fuente: STATIC WIKIPEDIA Ecuaciones de Navier-Stokes [en línea] 2008 disponible en:

https://www.classicistranieri.com/wikipediaforschoolses/wp/n/Navier%25E2%2580%2593Stokes_equations.htm

En coordenadas cartesianas la ecuación se describe de la siguiente forma:

Figura 17. Ecuación de Navier Stokes en coordenadas cartesianas

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z$$

Fuente: STATIC WIKIPEDIA Ecuaciones de Navier-Stokes [en línea] 2008 disponible en:

https://www.classicistranieri.com/wikipediaforschoolses/wp/n/Navier%25E2%2580%2593Stokes_equations.htm

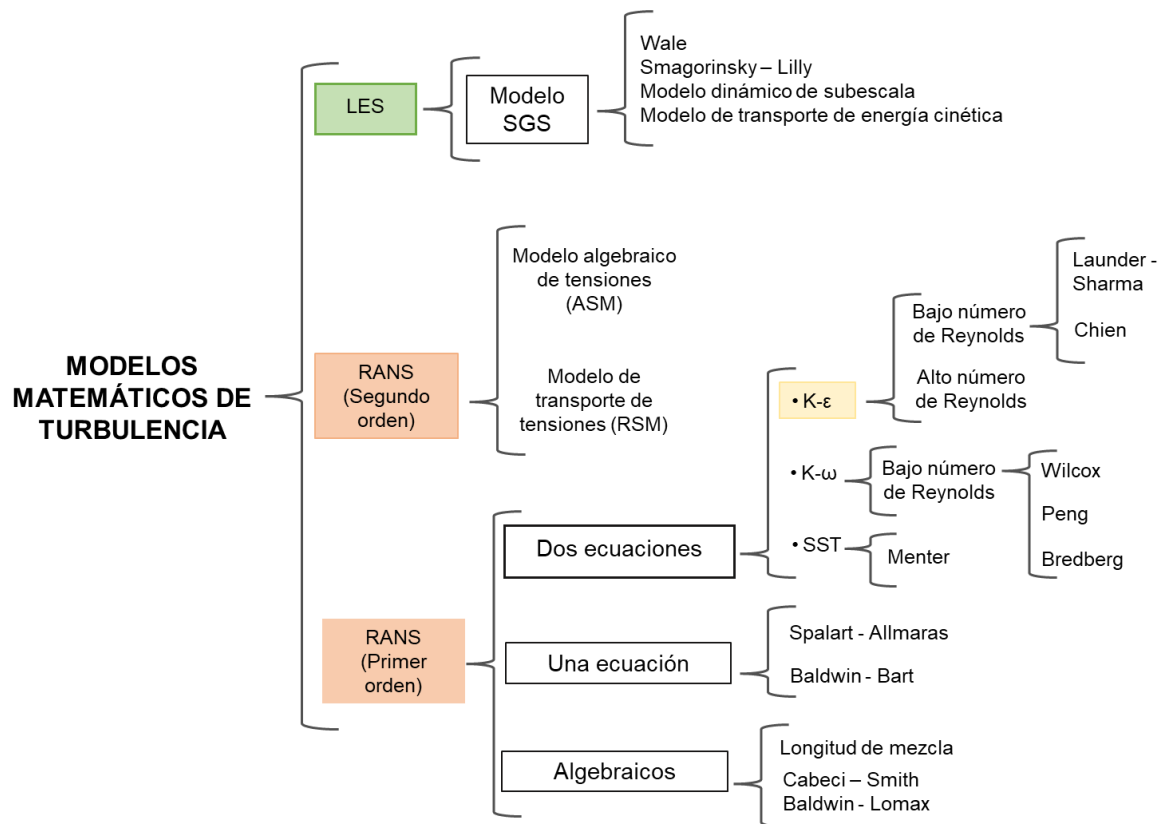
4.2.12 Modelos de turbulencia

Muchos códigos CFD comerciales y de código abierto implementan varios métodos de cierre para el término de aceleración convectiva no lineal de las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS) promediadas por Reynolds.

Ahora bien, el propósito de las simulaciones es guiar el refinamiento de la forma del cuerpo para minimizar las fuerzas de arrastre aerodinámicas.³⁴

Sin embargo, no existe un modelo perfecto de turbulencia pues todo depende de distintos parámetros como el número de Reynolds, si el flujo está separado, los gradientes de presión, el espesor de la capa límite, etc. Por lo que, a continuación, se describen 4 modelos más comúnmente utilizados.

Figura 18. Jerarquía de los modelos de turbulencia



Fuente: Elaboración por autores con información tomada de: ARBEJ, Miguel. *Tema 3: MODELOS MATEMÁTICOS DE TURBULENCIA*. [Documento]

³⁴ GESSLER, Paul. ¿Qué modelos de turbulencia son adecuados para el análisis de CFD en una carrocería aerodinámica? Qastack. [En línea] [Citado el: 28 de Enero de 2022.] disponible en: <https://qastack.mx/engineering/336/which-turbulence-models-are-suitable-for-cfd-analysis-on-a-streamlined-vehicle-body>.

4.2.12.1 Modelo de la longitud de mezcla de Prandtl.

Es un modelo que utiliza simplemente ecuaciones algebraicas para relacionar las tensiones de Reynolds y los flujos turbulentos de calor con valores medios de las magnitudes fluidas, y está basado en una interpretación del movimiento de agitación turbulenta en la que se establece una analogía con el movimiento de agitación molecular.³⁵

En otras palabras, “Representa la distancia media, perpendicular al flujo, a lo largo de la cual una partícula pierde su cantidad de movimiento extra y adquiere la velocidad media que existe en la nueva posición”.³⁶

4.2.12.2 Modelo K- ϵ .

Fue desarrollado originalmente para mejorar el modelo de longitud de mezcla y para evitar la prescripción algebraica de la longitud de escala turbulenta en flujos complejos. Genera resultados razonablemente buenos en flujos de superficie libre, con bajos gradientes de presión. Requiere funciones de amortiguamiento de pared y un mallado fino en las cercanías de esta.³⁷

4.2.12.3 Modelo K- ω .

Tiene una estabilidad numérica superior que el modelo k – ϵ , principalmente en la capa viscosa cercana a la superficie. Es un modelo de ecuaciones de transporte. No requiere funciones de amortiguamiento de pared explícitas. En la región logarítmica, el

³⁵ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ, Julio. Modelo basado en la longitud de mezcla de Prandtl. [En línea] 2000, 2001. [Citado el: 28 de Enero de 2022.] disponible en: <https://www2.uned.es/ing-fluidos/IntroMF/node76.html#:~:text=Prandtl%20postul%C3%B3%20que%20en%20flujos,de%20las%20capas%20%C3%ADmite%20turbulentas..>

³⁶ ARIAS PARADA, Alejandro y CEDIÉL URREA, Marcio Nicolas. 2019. Estudio práctico de la aerodinámica en un automóvil deportivo utilizando el programa de dinámica de fluidos computacional Flow de Solidworks. Santander, [Trabajo de Grado] Bucaramanga: Unidades Tecnológicas De Santander. pág. 28, [En línea]. 2019 disponible en: <http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1371/2R-DC-95.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

³⁷ ARBEJ, Miguel. Tema 3: Modelos matemáticos de turbulencia. [En línea]. disponible en: <https://es.scribd.com/presentation/342534991/Tema-3-Modelos-de-Turbulencia>

modelo da buenas aproximaciones con información experimental, para flujos con leves gradientes de presión adversa.³⁸

4.2.13 CAD. CAD es el diseño asistido por Computadora en el cual se utilizan softwares que permiten digitalizar modelos 2D y 3D, parametrizar los modelos y trabajar con superficies como es el caso de SolidWorks el cual es utilizado para el diseño de la carrocería y un chasis básico.

Figura 19. CAD 3D

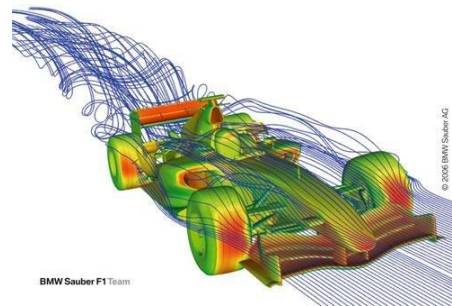


Fuente: SOLIDWORKS DISCIPLINAS. *Dassault Systèmes*. [En línea] [Citado el: 24 de mayo de 2021.] disponible en: <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/solidworks/disciplinas/>.

4.2.14 CFD. El estudio de la mecánica de fluidos se puede desarrollar a través de softwares CFD (Computational Fluid Dynamics) este tipo de herramientas nos permiten simular condiciones de fluidos, visualización de líneas de corriente, campos de presiones, entre otras variables de gran significado en el estudio de la mecánica de fluidos. que permiten entender el comportamiento del fluido como de las superficies en contacto, permitiendo así la optimización y mejoras de los modelos.

³⁸ *Ibíd.*

Figura 20. Simulación CFD de un coche de fórmula 1



Fuente: BREVER, Jared. Researchgate. [En línea] 12 de julio de 2012. [Citado el: 24 de mayo de 2021.] disponible en: https://www.researchgate.net/figure/CFD-Simulation-of-a-Formula-1-car-17_fig9_268223531.

4.2.14.1 ANSYS 2020 R2.

Ansys es un ecosistema de programas CAE para diseño, análisis y simulación de partes por elementos finitos FEA, incluye las fases de preparación de meshing o malleo, ejecución y post proceso, el programa ejecuta análisis de piezas sometidas a fenómenos físicos usadas en ingeniería y diseño mecánico, puede resolver problemas físicos sometidos a esfuerzos térmicos, fluidos, vibración y aplicaciones específicas, brevemente se describen sus módulos principales por disciplina.³⁹

³⁹ 3DC AD PORTAL. ANSYS. [En línea] [Citado el: 1 de Febrero de 2022.] disponible en: <https://www.3dcadportal.com/ansys.html>.

5. DISEÑO AERODINÁMICO Y DE FORMA DE LA CARROCERÍA

Para la fase de diseño aerodinámico y de forma se siguió parte de la metodología explicada en el libro: *H-Point: los fundamentos del diseño y embalaje de automóviles* (“*H-Point: The Fundamentals of Car Design and Packaging*”) (Stuart Macey & Geoff Wardle, 2009).

En ese sentido, el libro presenta el siguiente proceso para la creación del concepto de diseño de una carrocería.

Figura 21. Diagrama sobre el concepto de diseño de una carrocería



Fuente: Elaboración por autores con información tomada de: CURB. *H-Point: los fundamentos del diseño y embalaje de automóviles*. *Curb*. [En línea] [Citado el: 01 de Junio de 2021.] Disponible en: <https://thecurbshop.com/products/h-point-the-fundamentals-of-car-design-packaging-2nd-edition>.

Nota: en la sección **Anexo A** se encuentra de forma detallada el paso a paso de la ideación y diseño de la forma de la carrocería.

5.1 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LA LEPTOPHIS AHAETULLA

Para el desarrollo de la fase de diseño aerodinámico y de forma es importante tener en cuenta ciertas consideraciones o características claves de la biónica de la serpiente en cuestión.

Para ello, a través de la siguiente tabla se presentan las características físicas más representativas de la serpiente que se tendrán en cuenta a la hora de realizar los respectivos bocetos.

Tabla 2. Definición de características físicas principales de la Leptophis

| CARACTERÍSTICAS FÍSICAS PRINCIPALES DE LA LEPTOPHIS AHAETULLA |
|---|
| A. Franja lateral negra que va del extremo del ojo a la comisura de la boca o en otros casos hasta el cuello. Las escamas dorsales de la cabeza son verdes césped, sin puntos negros y sin márgenes negros. |
| B. Cuerpo delgado y comprimido lateralmente. |
| C. Hocico algo trunco. |
| D. Cola larga y delgada. |
| E. Diente sólidos, lisos, cortantes y cortos. |
| F. Lengua azul verdoso. |

Figura 22. Collage de fotos correspondiente a la tabla 3.



Fuente: Elaboración por autores con información tomada de: PUCE. Galería de imágenes *Leptophis Ahaetulla*. *Bioweb.bio*. [En línea] [Citado el: 14 de junio de 2021.] disponible en: <https://bioweb.bio/galeria/FotosEspecimenes/Leptophis%20ahaetulla/1/35/Espec%20C3%ADmenes%20QCAZ%20En%20vida>.

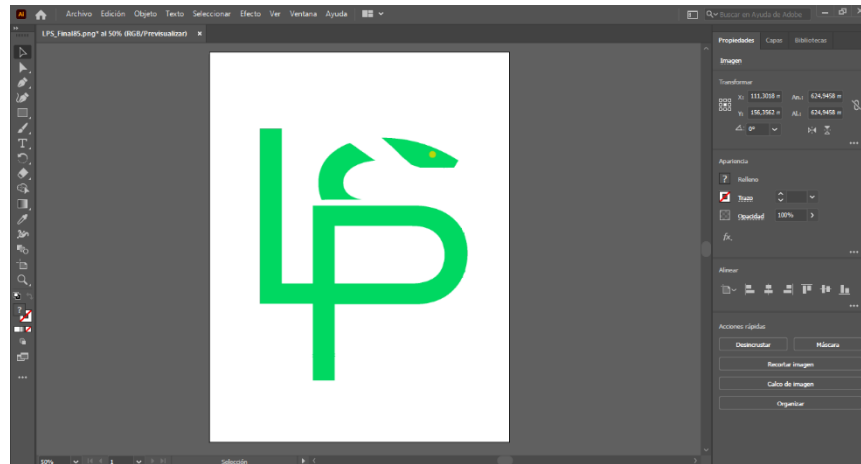
En el collage anterior se evidencian gráficamente las características descritas inicialmente en la tabla 2. No obstante, en la sección **Anexo A** se amplía la anterior información.

5.2 CREACIÓN DE UN CONCEPTO DE VALOR (LOGO)

Dentro del proyecto también se propuso la idea de crear un logo para dar más identidad al concepto de valor del automóvil, por lo tanto, basado en la biónica de la

Leptophis se utilizó el programa de Adobe Illustrator 2021, donde se buscó dar involucrar distintas formas y colores característicos de la serpiente con el nombre científico de esta y a su vez la cualidad de automóvil eléctrico.

Figura 23. Diseño del logo en Illustrator



El logo del automóvil representa la abreviación “LPS” que significa “Leptophis” y hace alusión al nombre científico de la serpiente, la cual es parte fundamental del concepto de diseño de la forma de la carrocería, a continuación, se describe la propuesta final del logo.

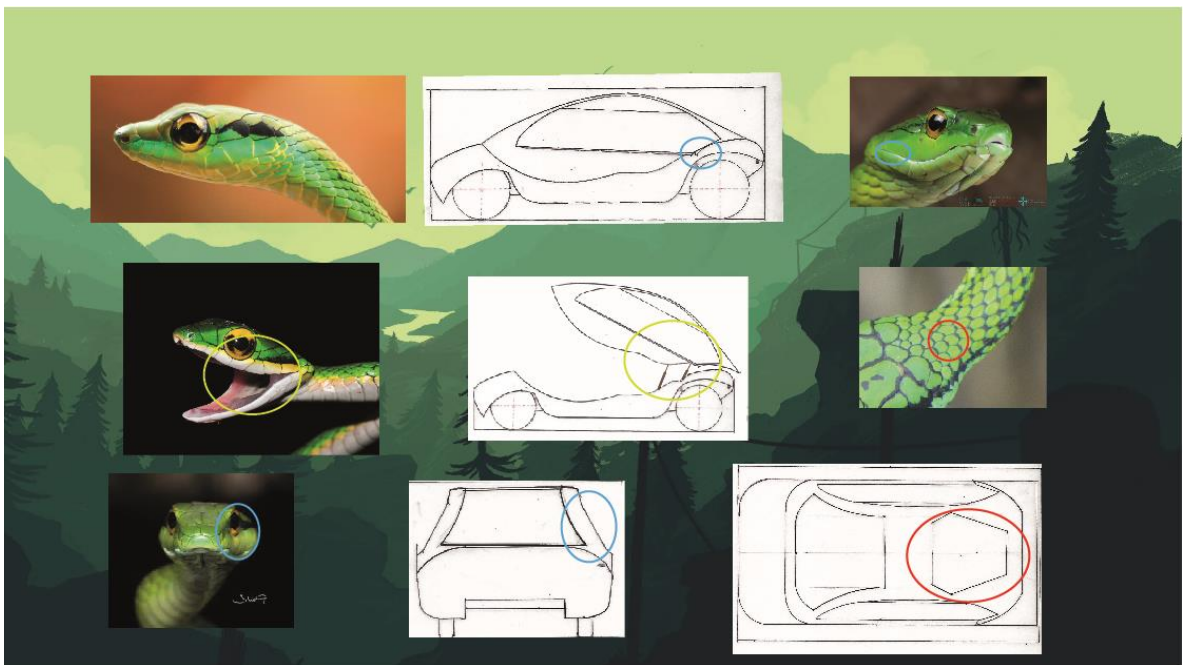
Figura 24. Logo del proyecto



5.3 CARACTERÍSTICAS DE LA LEPTOPHIS EN CROQUIS INICIALES

A continuación, se presenta un collage de los croquis con la incorporación de ciertas características de la serpiente “Leptophis” previamente estudiadas y revisadas en la sección 5.1 de este documento, con el fin de tener una visión más cercana al modelo en SolidWorks al que se plantea llegar.

Figura 25. Collage con croquis iniciales involucrando algunas características de la Leptophis



Fuente: Elaboración por autores con información tomada de: PUCE. Galería de imágenes Leptophis Ahaetulla. *Bioweb.bio*. [En línea] [Citado el: 10 de febrero de 2022.]<https://bioweb.bio/galeria/FotosEspecimenes/Leptophis%20ahaetulla/1/35/Espec%C3%ADmenes%20QCAZ%20En%20vida>.

5.4 PARÁMETROS DE DISEÑO FINALES

El planteamiento de los parámetros de diseño es uno de los pilares fundamentales para darle forma al diseño conceptual del auto, ya que no solo se da un dimensionamiento detallado si no que va de la mano con la distribución de espacios previamente planteados para cumplir con la funcionalidad de la carrocería.

5.4.1 Dimensionamiento del vehículo. Para el dimensionamiento del auto se realizó un estudio de algunas propuestas del mercado actuales (**Ver Anexo A**), de manera que las medidas fueran acordes con un vehículo compacto pero que siguiera todos los lineamientos hasta el momento definidos.

Tabla 3. Definición de dimensiones del vehículo

| DIMENSIONES DEL VEHÍCULO | | |
|---------------------------|------------|------|
| PARÁMETRO | MEDIDA | COTA |
| Batalla | 2153 [mm] | A1 |
| Vía delantera | 1184 [mm] | A2 |
| Vía trasera | 1340 [mm] | A3 |
| Módulo delantero | 464 [mm] | A4 |
| Módulo trasero | 410 [mm] | A5 |
| Distancia lateral (Total) | 3028 [mm] | A6 |
| Distancia Mínima al suelo | 150 [mm] | A7 |
| Altura Máxima | 1150 [mm] | A8 |
| Ancho sin espejos | 1470 [mm] | A9 |
| Ancho Total | 1520 [mm] | A10 |
| RIN | #13" | N/A |
| Llanta | 125/80 R13 | N/A |

5.4.2 Bocetos digitalizados. Se realizó la digitalización de los bocetos preliminares del auto con el fin de tener más claras las distancias y en conjunto con la tabla anterior observar las cotas en las diferentes vistas del automóvil para facilitar el proceso de modelado en SolidWorks.

Figura 26. Vista lateral vehículo

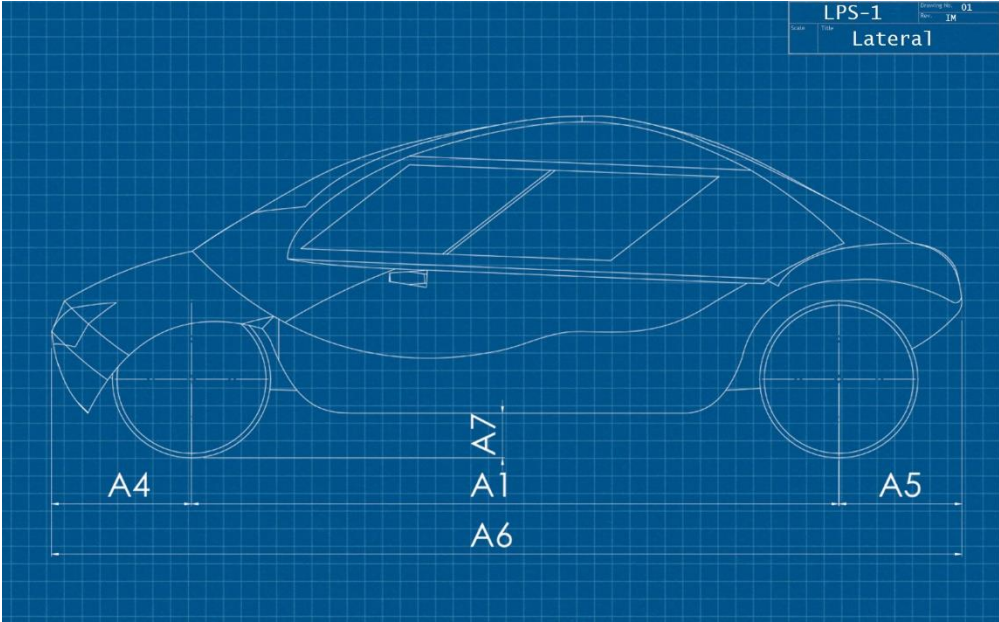


Figura 27. Vista frontal del vehículo

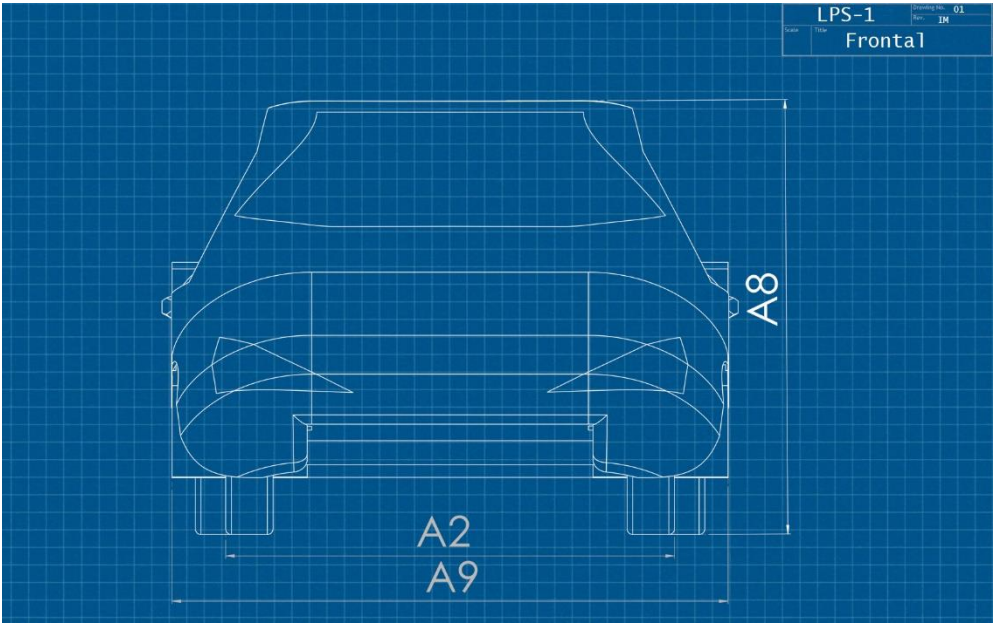


Figura 28. Vista posterior del vehículo

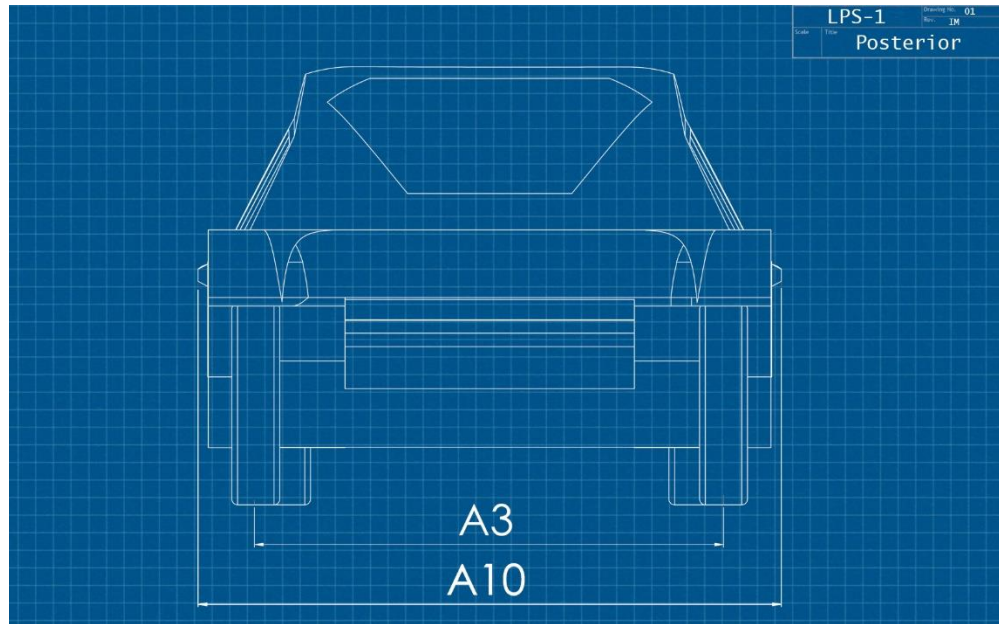
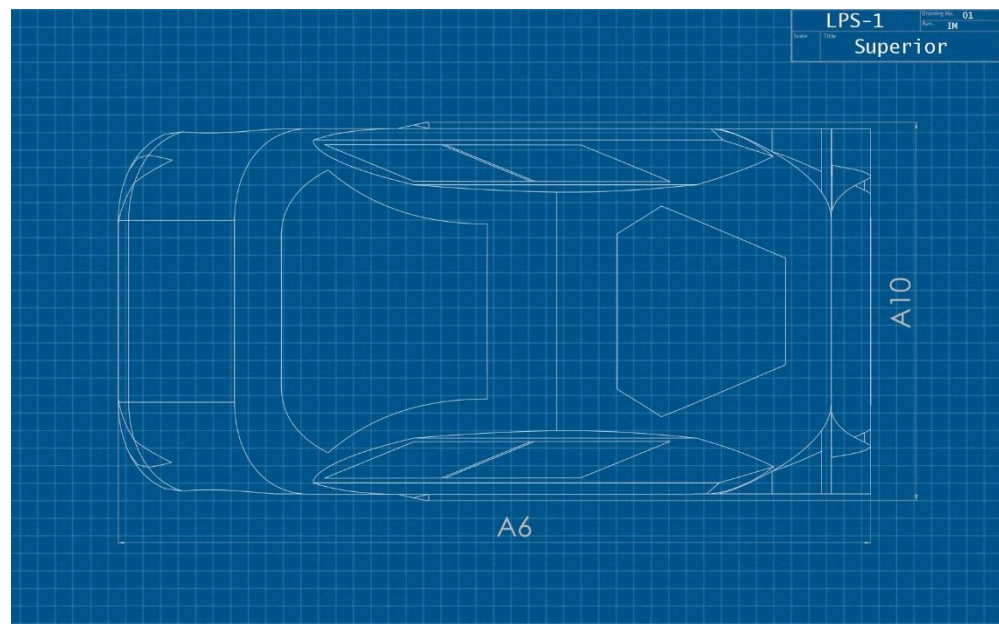


Figura 29. Vista superior del vehículo



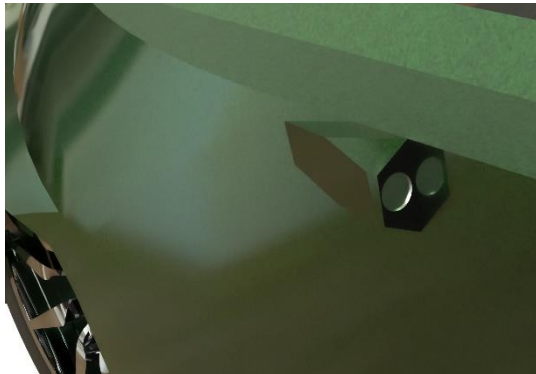
Ahora bien, los resultados de la matriz QFD demostraron que hay cuatro ítems fundamentales que permiten tener una base sólida de lo que se quiere y se busca en el automóvil:

1. Baja Resistencia aerodinámica.
2. Diseño Estético.
3. Apoyo Aerodinámico (sustentación (-)).
4. Diseño estructural.

En el caso de disminuir la resistencia aerodinámica, se debe tener en cuenta dos variables fundamentales, la forma y el área superficial frontal del auto.

Ahora bien, al ser un auto eléctrico y con el fin no solo de hacer más llamativa su forma sino también más funcional y novedosa se pensó en la implementación de cámaras laterales en remplazo de los espejos, ayudando a tener una superficie frontal más reducida.

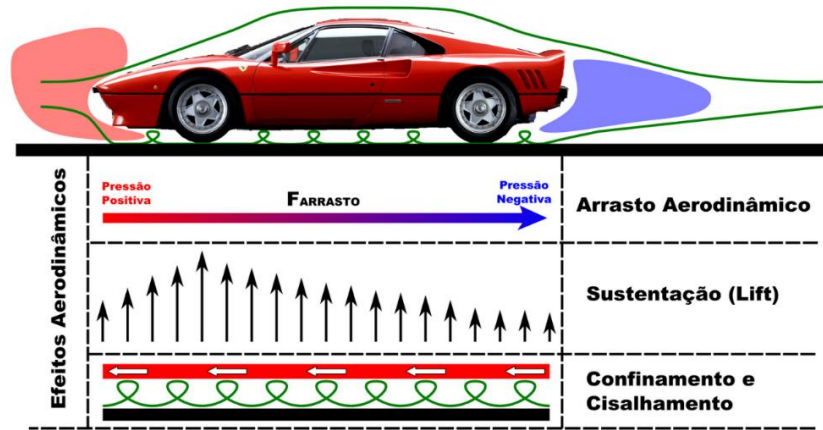
Figura 30. Espejo retrovisor en forma de cámara lateral



En cuanto a la altura desde el suelo se tuvo presente que el automóvil está diseñado para las calles de las ciudades colombianas, por ende, es necesario tener una altura suficiente para el correcto desempeño del vehículo en carretera.

Por otra parte, el módulo posterior del auto debe tener una longitud lo suficientemente larga para evitar la separación del aire y la turbulencia que normalmente existe en esta sección.

Figura 31. Efectos aerodinámicos en un vehículo



Fuente: ENCICLOPEDIA GLOBAL. Aerodinâmica | Princípios Teóricos e Experimentais. [En línea] [Citado el: 9 de Agosto de 2021.] disponible en: <http://www.megatimes.com.br/2014/05/aerodinamica-principios-teoricos-e.html>.

Notas de Diseño o Consideraciones:

Con los cuatro ítems de la matriz QFD (**Ver Anexo A**), el concepto de carrocería tipo coupé y la metodología del libro presentada al principio de la fase 5 se da forma a la idea del automóvil que contemple un bajo coeficiente de arrastre y un diseño elegante y deportivo.

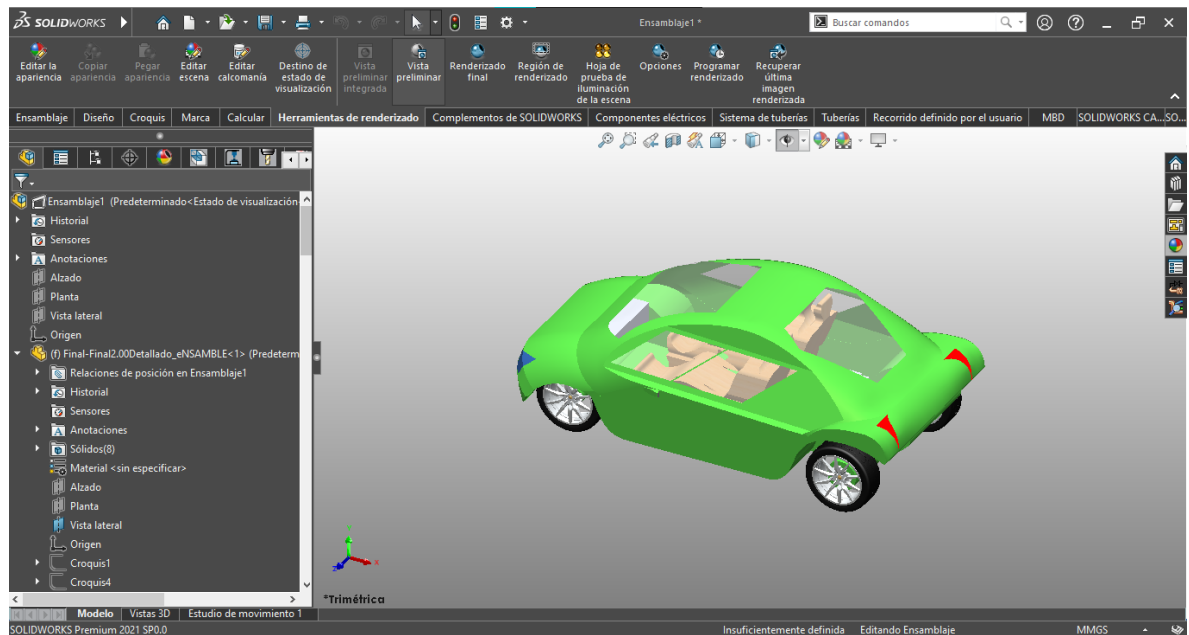
Tabla 4. Consideraciones finales

| CONSIDERACIONES | |
|-------------------|-------------|
| Parámetro | Descripción |
| Carrocería | 2 volúmenes |
| Número de puertas | 1 |
| Número de plazas | 2 |

5.5 MODELADO EN SOLIDWORKS

En este apartado se lleva a cabo todo el modelado de la carrocería, se hace uso del programa de diseño SolidWorks donde a través de diferentes herramientas se lleva la idea de los bocetos digitalizados en 2D a la concepción 3D del auto.

Figura 32. Modelo realizado en el programa SolidWorks



5.6 DISTRIBUCIÓN DE ESPACIOS DEL VEHÍCULO

Dentro del vehículo se tienen distintos componentes y elementos que conforman no solo el habitáculo de pasajeros sino también toda la parte motriz del automóvil, por ello a continuación se describen los principales elementos que se tuvieron en cuenta para la ideación del modelo de carrocería.

Tabla 5. Características de los principales componentes del vehículo

| COMPONENTES PRINCIPALES DEL VEHÍCULO | UBICACIÓN EN EL VEHÍCULO | TAMAÑO APROXIMADO |
|--------------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Paquete de baterías | Módulo delantero | 0,0444 m ³ |
| Motor | Módulo trasero | 0,0672 m ³ |
| Controlador | Módulo central | 0,012 m ³ |
| Inversor | Módulo central | 0,012 m ³ |

Nota: Los componentes que aporten mayor masa se ubicaron de forma equidistante al punto central del auto para ayudar con la estabilidad del centro de gravedad de este. Además, el habitáculo de pasajeros se pensó para albergar personas con una estatura promedio de 1,75 [m].

5.6.1 Distribución espacial en el modelo 3D. Teniendo en cuenta la distribución de espacios en el vehículo se realiza una visualización en 3D de los componentes principales de este.

Figura 33. Vista isométrica de la carrocería con la distribución de elementos.

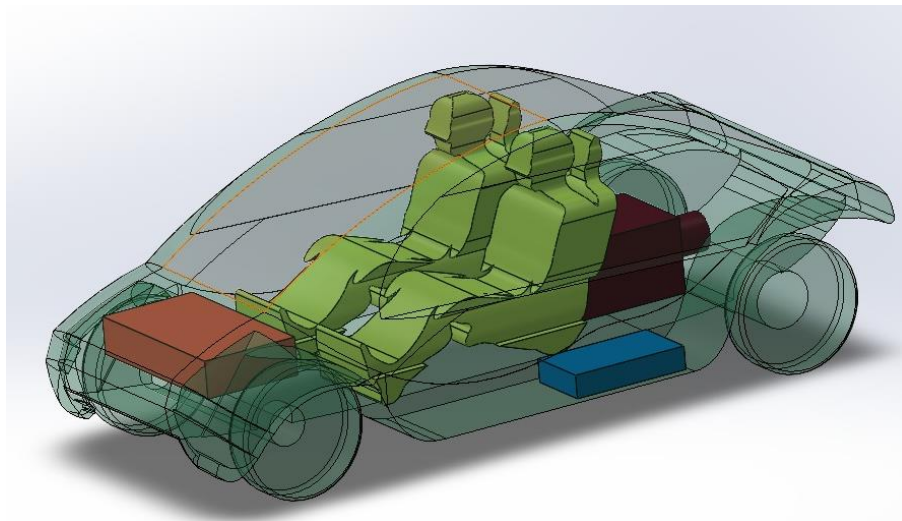


Figura 34. Distribución de espacial de elementos del vehículo (vista superior)

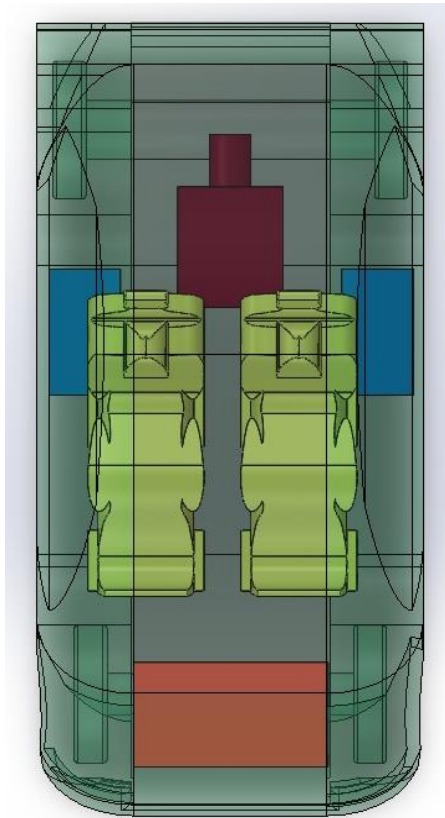
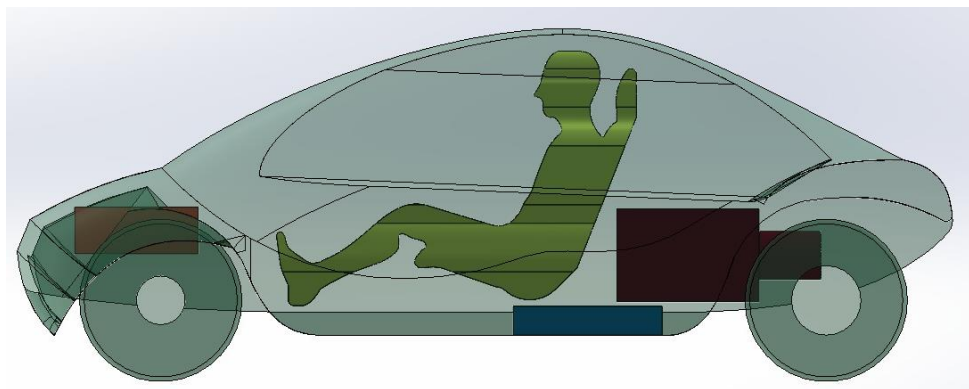


Figura 35. Distribución de espacio de elementos del vehículo (vista lateral)



5.6.2 Modelo final detallado. A continuación, se presenta el modelo de carrocería detallado realizado en el programa SolidWorks. Para ver en detalle la ideación y concepción del diseño (**Ver Anexo A**).

Figura 36. Renderizado del modelo detallado de carrocería (Vista isométrica)

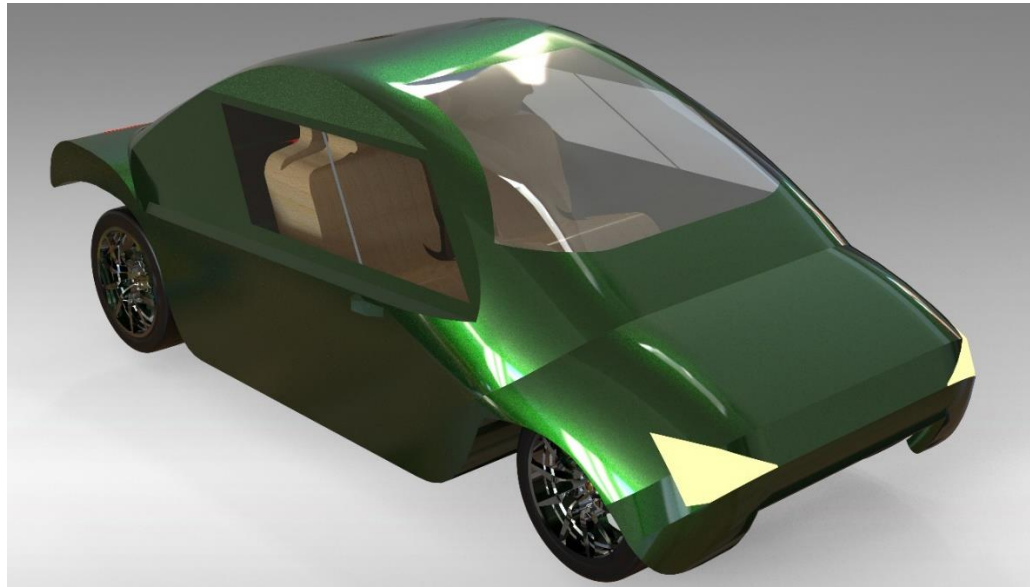


Figura 37. Renderizado del modelo en un ambiente exterior



Figura 38. Renderizado del modelo detallado de carrocería (Vista frontal)

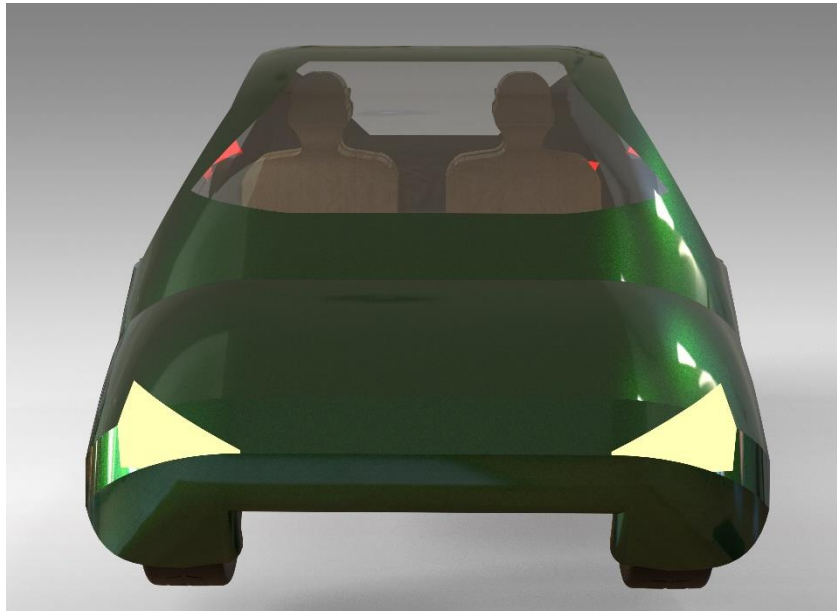


Figura 39. Renderizado del modelo detallado de carrocería (Vista superior)

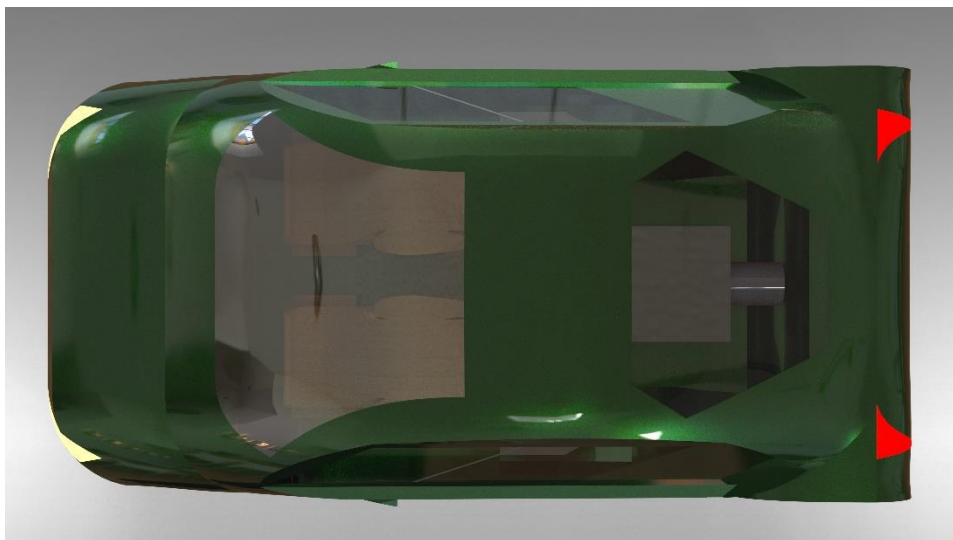
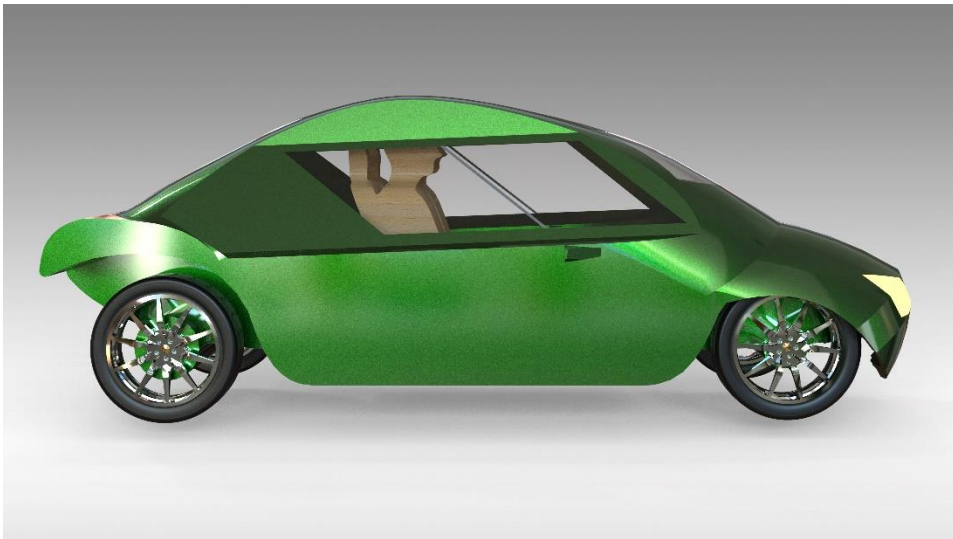


Figura 40. Renderizado del modelo detallado de carrocería (Vista posterior)



Figura 41. Renderizado del modelo detallado de carrocería (Vista Lateral)

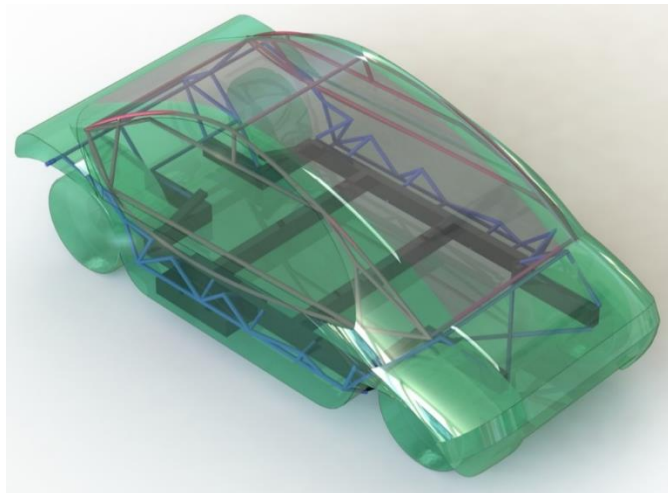


6. DISTRIBUCIÓN ESTRUCTURAL (CHASIS BÁSICO)

Para la distribución estructural se diseñó un chasis o bastidor basado en la distribución de espacios realizada en la fase anterior del proyecto “Fase de diseño aerodinámico y de forma” más específicamente en el apartado 5.6 de este documento. En ese sentido, el objetivo de este bastidor es que sostenga no solo la carrocería planteada sino también todas las partes del automóvil.

Ahora bien, existen distintos tipos de chasis, no obstante, para fines del enfoque principal de este proyecto en el diseño de una carrocería y no de un bastidor, se propone la siguiente estructura aclarando que es una configuración básica que carece de cualquier estudio de cargas (vivas, muertas, de giro, de frenado, etc.) que pueda sufrir la carrocería y el automóvil en general. Sin embargo, sí que es una alternativa de diseño y forma que da pie a futuros estudios de esta para ver si es la mejor opción de sostenimiento para la carrocería diseñada.

Figura 42. Renderizado de la carrocería con la propuesta de chasis (Vista isométrica)



Nota: El chasis se encuentra representado por la configuración tubular (color azul y rojo) y los perfiles en color negro.

Figura 43. Renderizado del chasis (Vista lateral)

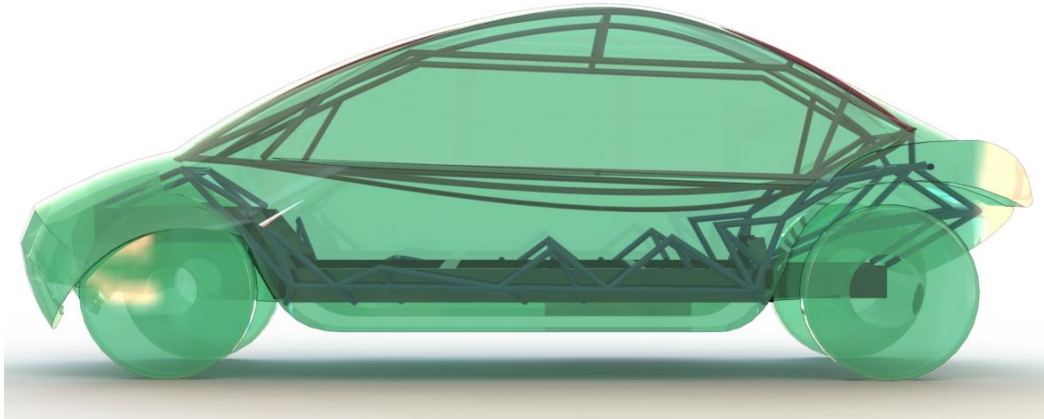
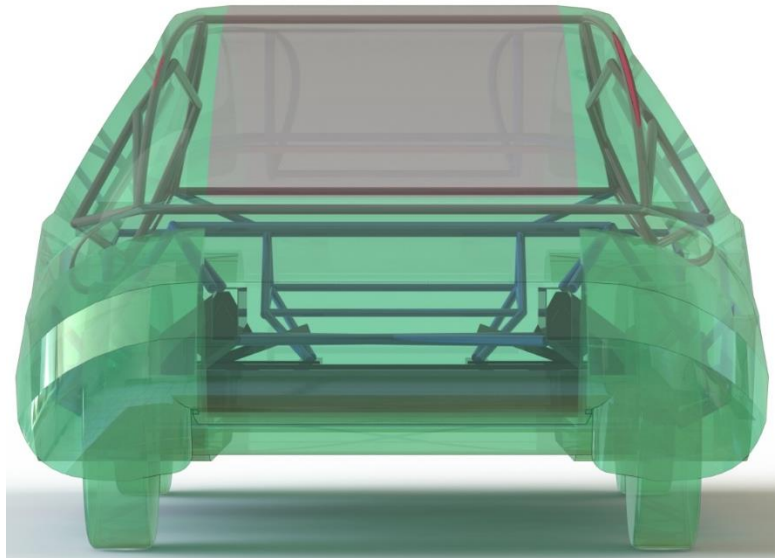


Figura 44. Renderizado del chasis (Vista frontal)



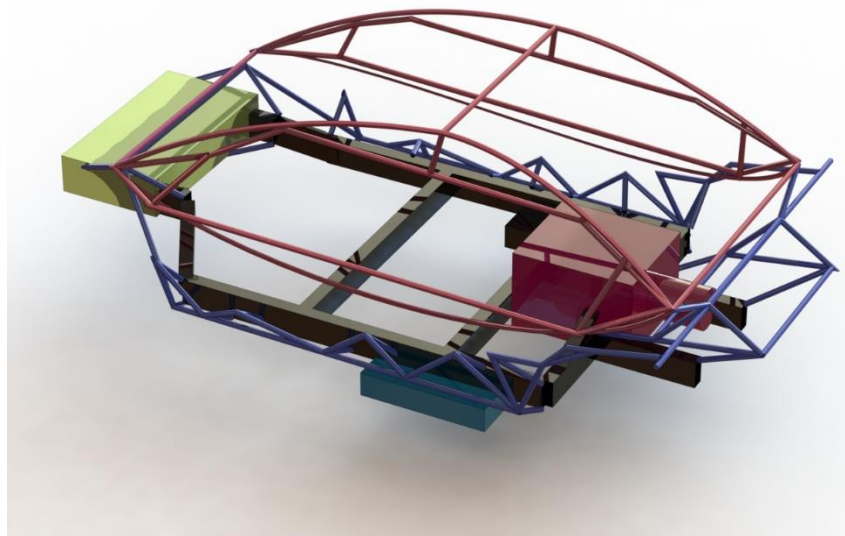
En este caso el diseño que se planteo es uno donde sea una sola pieza, en otras palabras, es un chasis monocasco o autoportante, que básicamente significa que

va unido al habitáculo del automóvil y de igual forma a la puntera que soporta el motor.

El chasis planteado se divide elementos estructurales principalmente demarcados de la siguiente forma (Ver figura 45):

- Color negro para la estructura base.
- El color azul es el recubrimiento estructural.
- El color rojo es la estructura que soporta la puerta.

Figura 45. Renderizado chasis con visualización de espacios del auto

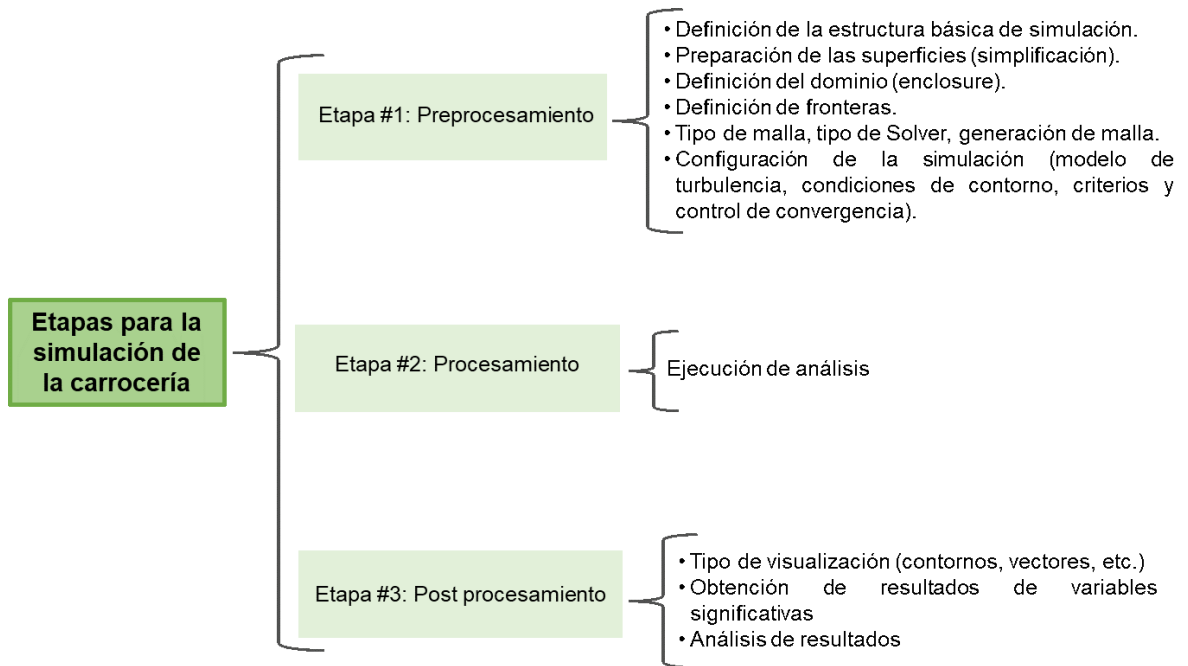


7. SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN AERODINÁMICA (CFD) DE LA CARROCERÍA

7.1 DIAGRAMA DE LA ETAPAS DE SIMULACIÓN EN ANSYS 2020 R2

En el desarrollo de la simulación en Ansys se tuvo en cuenta ciertas etapas que se describen a continuación.

Figura 46. Diagrama etapas de simulación en ANSYS



Para conocer el proceso detallado de simulación de la carrocería se adjunta en el **Anexo B** toda la descripción del paso a paso y consideraciones tomadas en cuenta.

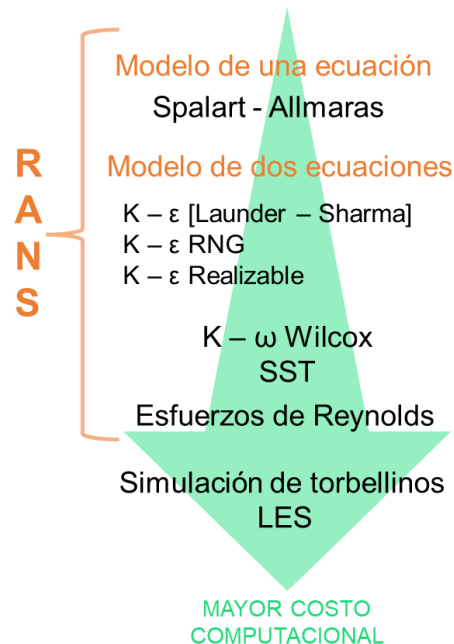
7.2 ECUACIONES DEL FENÓMENO FÍSICO

La ecuación de Navier-Stokes es el modelo matemático que permite estudiar el comportamiento dinámico de los fluidos, esta ecuación no cuenta con una solución

analítica por el momento, sin embargo, se puede discretizar generando soluciones particulares. A estas variaciones de la ecuación de Navier-Stokes se les conoce como modelos de turbulencia los cuales permiten dar soluciones aproximadas a estos fenómenos físicos.

Los modelos de turbulencia tipo RANS (Ver figura 18 & 47) son modelos que promedian la velocidad de las partículas del fluido durante todo el espacio de tiempo que ocurre el fenómeno. Dentro de esta clasificación de modelos encontramos el modelo K- ϵ , que según revisiones bibliográficas (también adjuntadas en los antecedentes teóricos de este documento), es el modelo más adecuado para la aplicación de la aerodinámica de la carrocería diseñada por su facilidad en el tiempo de iteración respecto a otros modelos existentes y la adaptación de condiciones de simulación.

Figura 47. Jerarquía de los modelos de turbulencia según su costo computacional



Fuente: Elaboración por autores con información tomada de: ARBEJ, Miguel. *Tema 3: MODELOS MATEMÁTICOS DE TURBULENCIA*. [Documento]

7.3 MODELO K-ε

El modelo K-ε es un modelo de dos ecuaciones (Ver figura 47) las cuales se relacionan con la energía cinética de turbulencia (K) y la disipación de energía cinética de turbulencia (ε). Estas dos ecuaciones permiten dar solución a los fenómenos físicos relacionados con la turbulencia manera muy precisa.

Energía cinética turbulenta (K):

d

La ecuación generalizada permite estudiar el comportamiento del fluido tanto en régimen transitorio como en régimen estacionario.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{u}_i k) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k + G_k - \rho \varepsilon - Y_M$$

Amplificando la ecuación anterior;

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u} k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \bar{v} k)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \bar{w} k)}{\partial z} = \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial w} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial w} \right] + P_k + G_k - \rho \varepsilon - Y_M \end{aligned}$$

La anterior ecuación es la que describe la energía cinética de turbulencia de la carrocería planteada en este proyecto.

Disipación de la energía cinética turbulenta (ε):

Como segunda ecuación se tiene la disipación de la energía cinética de turbulencia (ε) la cual tiene mayor número términos empíricos, sin embargo, este modelo posee una solución muy precisa.

La ecuación general de la disipación de la energía de cinética de turbulencia permite estudiar el modelo tanto en estado transitorio como en estado estacionario.

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho\bar{u}_i\varepsilon) = \nabla\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\nabla\varepsilon\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}[P_k + C_{3\varepsilon}G_k] - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}$$

Al realizar la amplificación de la ecuación de disipación de energía cinética de turbulencia (ε) :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{u}\varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v}\varepsilon)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho\bar{w}\varepsilon)}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial z}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}[P_k + C_{3\varepsilon}G_k] \\ - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned}$$

Dónde,

P_k : Representa la generación de la energía cinética turbulenta debido al gradiente de velocidad.

G_k : Representa la generación de la energía cinética turbulenta debido a las fuerzas de empuje.

μ_t : es la viscosidad turbulenta.

Σ_k : Número de Prandtl turbulento para la ecuación de k

σ_ε : Números de Prandtl turbulento para la ecuación de ε

$$P_k = -\rho\mu_t \left[2\left(\frac{\partial\bar{u}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\bar{v}}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial\bar{w}}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial\bar{w}}{\partial z}\right)^2 \right]$$

$$G_k = -\beta g_i \frac{\mu_t}{\sigma_\theta} \frac{\partial\bar{T}}{\partial y}$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Y_M : Representa la contribución de fluctuación de la dilatación en la turbulencia compresible debido a la tasa de disipación.

$$Y_M = 2\rho\varepsilon M_t^2$$

M_t : Es el número de Mach turbulento

$$M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}}$$

a : Es la velocidad del sonido

Tabla 6. Coeficientes del modelo K-épsilon

| COEFICIENTES MODELO K-E | | | | | |
|-------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|--|----------------------------|
| $C_\mu = 0.09$ | $C_{1\varepsilon} = 1.44$ | $C_{2\varepsilon} = 1.92$ | $\sigma_\varepsilon = 1.3$ | $C_{3\varepsilon} = \tanh\left \frac{\bar{v}}{\bar{u}}\right $ | $\sigma_\varepsilon = 1.0$ |

Fuente: Rodriguez, N. Tesis. 2009, pág. 10. Disponible en: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/19406/Capitulo3.pdf>

Nota: Se elimina el término asociado al estado transitorio ya que en la simulación se busca obtener el coeficiente de arrastre en estado estacionario, sin contar además que este término genera un costo computacional más elevado.

7.4 PARÁMETROS ATMOSFÉRICOS DE SIMULACIÓN

La evaluación de la carrocería se debe realizar bajo ciertos parámetros teniendo en cuenta cada condición y requerimiento establecido en la matriz QFD (**Ver Anexo A**). Por lo tanto, se describen las situaciones más adversas a las que el vehículo pueda estar expuesto, es decir, condiciones climáticas.

Dentro de estas condiciones climáticas se utilizan parámetros como presión, altitud, temperatura y velocidad del viento en la ciudad de trabajo, Bucaramanga.

Tabla 7. Parámetros atmosféricos de la simulación

| PARÁMETROS ATMOSFÉRICOS | VALOR |
|-------------------------|------------|
| Presión atmosférica | 100 [kPa] |
| Temperatura | 20 [°C] |
| Altitud | 959 [m] |
| Velocidad del Viento | 9,5 [Km/h] |
| Velocidad del Auto | 85 [Km/h] |

“La Presión atmosférica en Bucaramanga se encuentra alrededor de 88.39 [kPa]”.⁴⁰ Sin embargo, para realizar los análisis, este parámetro se normaliza a 100[kPa] de manera que se logren evidenciar mejor los efectos aerodinámicos.

“La temperatura promedio mínima en Bucaramanga es de 20 [°C]”.⁴¹ La relación entre la presión atmosférica y la temperatura nos permite encontrar la densidad del aire la cual para efectos de estudio se desea sobrevaluar por ende se tomó el promedio de la temperatura más baja en la ciudad de Bucaramanga.

⁴⁰ REAL PRONOSTICO. Real Pronostico. Tiempo en Bucaramanga . [En línea] 9 de Agosto de 2021. [Citado el: 9 de Agosto de 2021.] disponible en: [https://rp5.ru/Tiempo_en_Bucaramanga,_Palonegro_\(aeropuerto\)](https://rp5.ru/Tiempo_en_Bucaramanga,_Palonegro_(aeropuerto)).

⁴¹ WEATHER SPARK. El clima promedio en Bucaramanga. [En línea] 2021. [Citado el: 12 de Julio de 2021.] Disponible en: <https://es.weatherspark.com/y/24381/Clima-promedio-en-Bucaramanga-Colombia-durante-todo-el-año>.

La altitud es el parámetro del cual se desprende la presión atmosférica, esta tiene un valor relevante en los efectos aerodinámicos, pero la altitud en si no es un parámetro muy significativo para los efectos aerodinámicos ya que se tiene la presión atmosférica, sin embargo, se anota este parámetro con efectos ilustrativos del sitio.⁴²

La velocidad del viento representa un parámetro importante en el estudio aerodinámico del LPS-1 ya que a través de ella se puede hallar la velocidad relativa a la que se mueve el auto respecto a las partículas de aire de alrededor del vehículo. “La velocidad del aire obtenida en la tabla N°7 es el valor promedio desde enero del 2020 a junio del 2021”.⁴³

La velocidad del LPS-1 es uno de los parámetros más relevantes ya que para objeto de estudio se tiene que la velocidad máxima en carreteras nacionales de vía sencilla es de 90 [Km/h] y de vías dobles es de 120[Km/h] se estimó que una velocidad a la que podría ir el auto en una carretera nacional de vía sencilla (Bucaramanga-Floridablanca) es de 85[Km/h].

7.5 CONDICIONES DE SIMULACIÓN

Tabla 8. Condiciones de simulación (Setup) en Ansys de la carrocería

| CONDICIONES DE SIMULACIÓN (SETUP) | |
|--|-------------------------------------|
| 1. | Modelo de turbulencia K- ϵ |
| 2. | Output; Average static P=0 |
| 3. | Opening; Opening pres P=0 |

⁴² THE WEATHER CHANNEL . Bucaramanga, Santander, Colombia [En línea] 2021. [Citado el: 9 de Junio de 2021.] disponible en: <https://weather.com/weather/today/l/7.13,-73.00?par=google>.

⁴³ WEATHER ONLINE. Velocidad del Viento. [En línea] Enero de 2020. Disponible en: <https://www.woespana.es/weather/maps/city?FMM=1&FYY=2020&LMM=12&LYY=2021&WMO=80094&CONT=samk®ION=0021&LAND=CO&ART=WST&R=0&NOREGION=0&LEVEL=162&LANG=es&MOD=tab>

| | |
|----|---|
| 4. | Input; Intensidad de turbulencia en la entrada del 5% |
| 5. | Wall; Free Slip Wall |
| 6. | Tipo de análisis; CFD |
| 7. | Tipo de solver; CFX |
| 8. | Orden del elemento; lineal |

Dimensiones del dominio de la simulación:

Tabla 9. Dominio de simulación

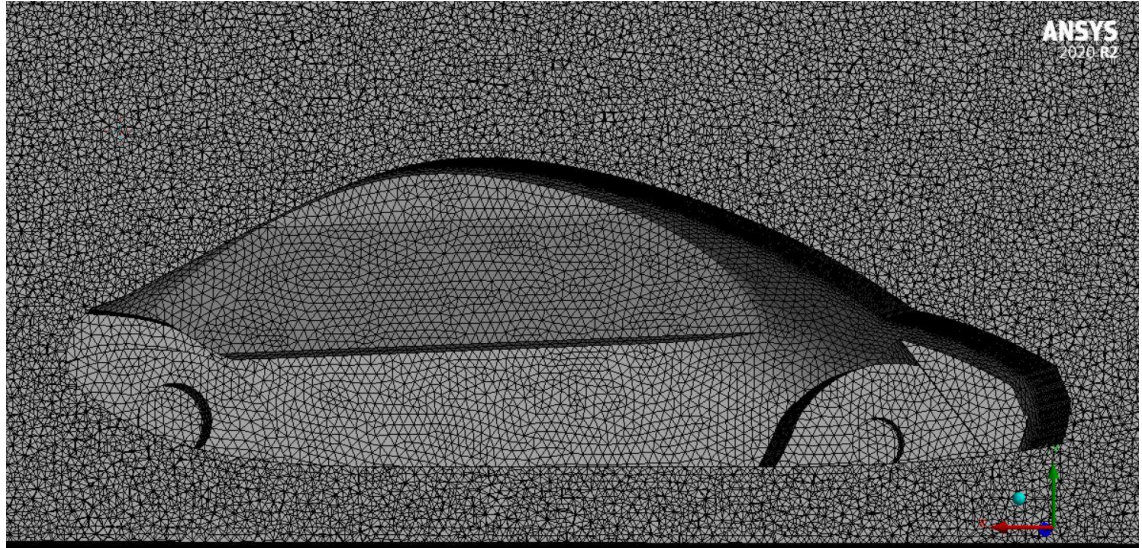
| DOMINIO |
|---|
| Largo; 8128 [mm] |
| Alto; 3350 [mm] |
| Ancho; 3720 [mm] |
| Volumen total; 101,29 [m ³] |

7.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.6.1 Análisis de malla. Para obtener los parámetros finales es necesario llevar a cabo un análisis y tratamiento de los datos obtenidos en cada simulación de manera que se pueda independizar el resultado final, apartando errores de truncamiento, de malla, entre otros.

7.6.1.1 Malla sin refinamiento. La malla sin refinamiento permite ver todo el dominio y la interfaz sólido - fluido con el mismo tamaño de elementos, lo cual deja el dominio más homogéneo, sin embargo, no se enfoca en las áreas de interés donde ocurren fenómenos superficiales (separación de la capa límite) relacionados con el contorno del vehículo.

Figura 48. Mallado sin refinamiento

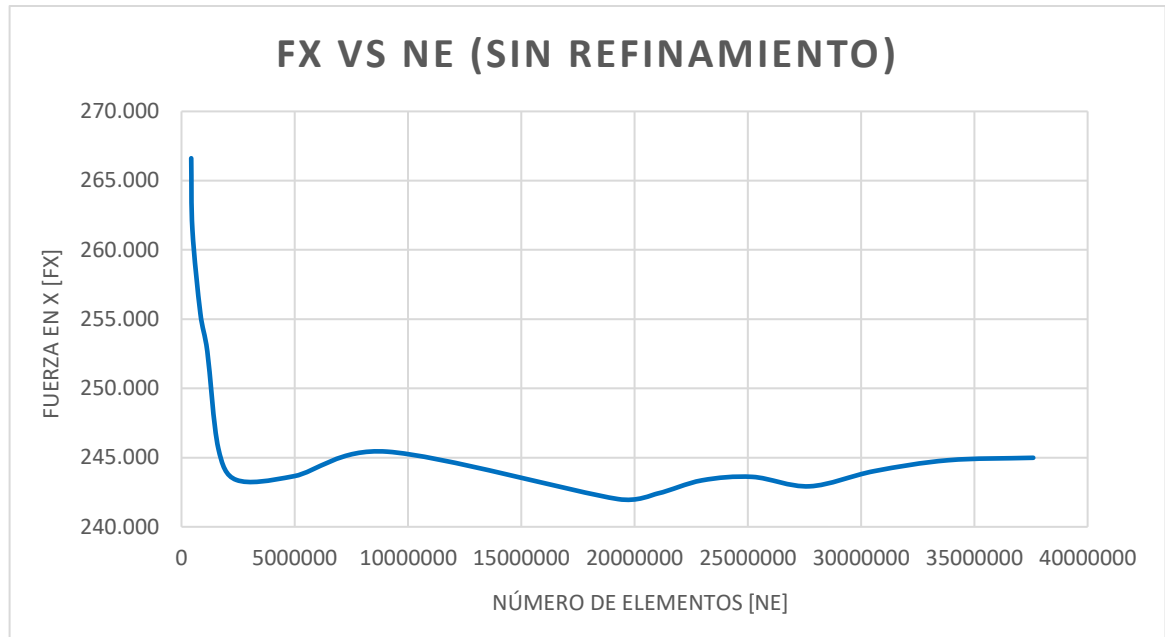


Por otra parte, la malla sin refinamiento tiene un mayor costo computacional en relación a la estabilidad de los resultados ya que los fenómenos de transporte y turbulencia ocurren en la interfaz cercana a la superficie de interés.

En la siguiente gráfica (Ver figura 49) se evidencia como el comportamiento de la fuerza en x fluctúa entre las diferentes cantidades de números de elementos al no tener un refinamiento en la superficie, es decir, fue necesario utilizar hasta 35 millones de elementos y aun así no se llegó a una convergencia fija.

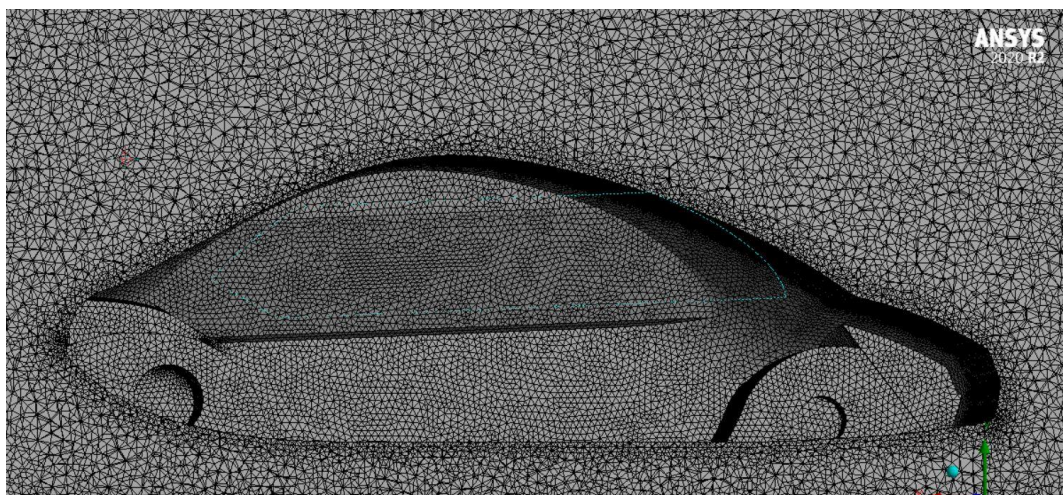
Nota: Los datos de la figura 49 se adjuntan al final del **Anexo B** en la tabla N°12.

Figura 49. Fuerza en X Vs Número de elementos para una malla sin refinamiento



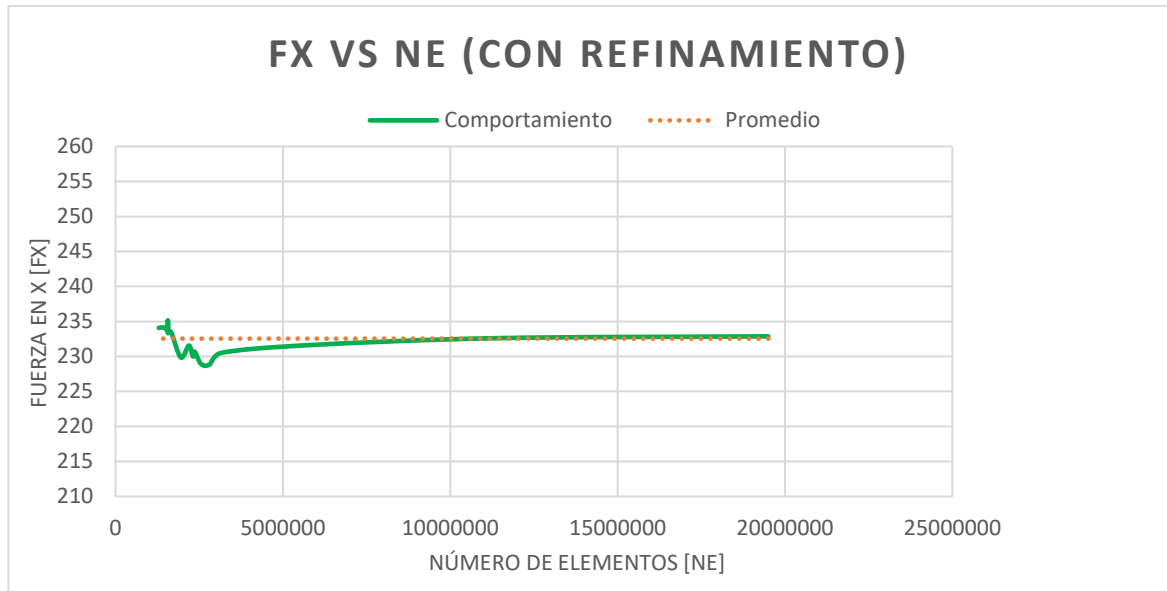
7.6.1.2 Malla con refinamiento. Ahora bien, una malla con refinamiento permite reducir el costo computacional asociado a la ineficiencia de simular zonas de poca relevancia como lo que ocurre en las zonas alejadas a la superficie del automóvil.

Figura 50. Mallado con refinamiento



En ese sentido, como se observa en la gráfica, a pesar de la reducción del número de elementos, el parámetro de salida (fuerza en x) no fluctúa de gran manera, sino que converge en un valor.

Figura 51. Fuerza en X Vs Número de elementos para una malla con refinamiento

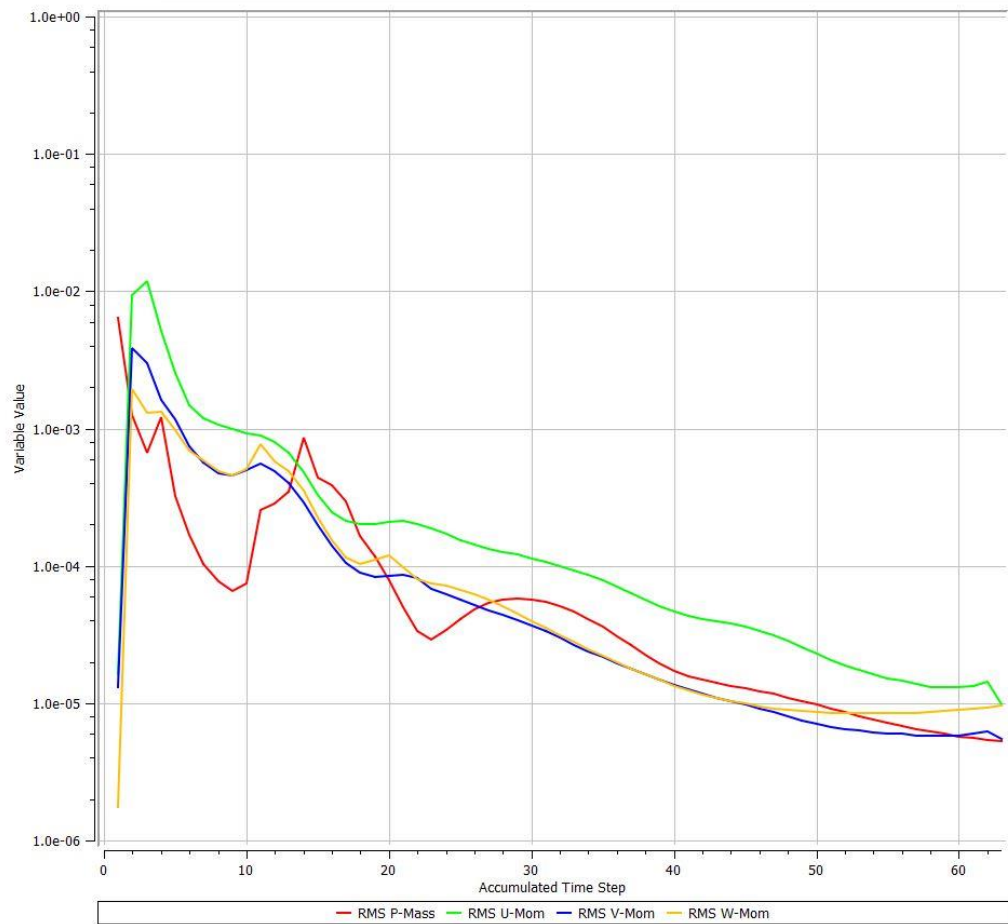


Nota: Los datos de la figura 51 se adjuntan al final del **Anexo B** en la tabla N°13.

7.6.2 Control de convergencia. Los volúmenes finitos permiten discretizar las ecuaciones que rigen los fenómenos asociados a mecánica de fluidos. Esta discretización se realiza aplicando estas propiedades a cada uno de los volúmenes finitos que se encuentran dentro del dominio con el fin de dar de solución a las ecuaciones diferenciales numéricamente, la diferencia entre el valor real y el valor aproximado es el residuo, este residuo es un valor fijo para cada elemento.

Una manera de cuantificar el residuo para la solución total del dominio es aplicar el valor RMS (Root Mean Square) dando así el control de convergencia, el cual se obtiene realizando iteraciones hasta llegar al valor definido, en este caso 1×10^{-5} .

Figura 52. RMS – convergencia de la simulación



7.7 RESULTADOS

Con la simulación se obtienen las siguientes gráficas donde se presenta el comportamiento de la velocidad y la presión dinámica en todo el dominio de estudio.

En primer lugar, se presenta la presión dinámica, un parámetro que depende de factores como la velocidad del vehículo y la densidad del fluido, en este caso el aire. En la figura 53 se pueden visualizar zonas de alta y baja presión, las zonas de alta presión se presentan en la zona frontal y en la zona posterior, a su vez existe una

zona de baja presión en la parte inferior del auto debido a una configuración que reduce la sección haciendo que el aire vaya a mayor velocidad en esta zona, esta configuración geométrica se realizó para amplificar el Downforce o fuerza de sustentación negativa.

Figura 53. Visualización de la presión dinámica (vista lateral)

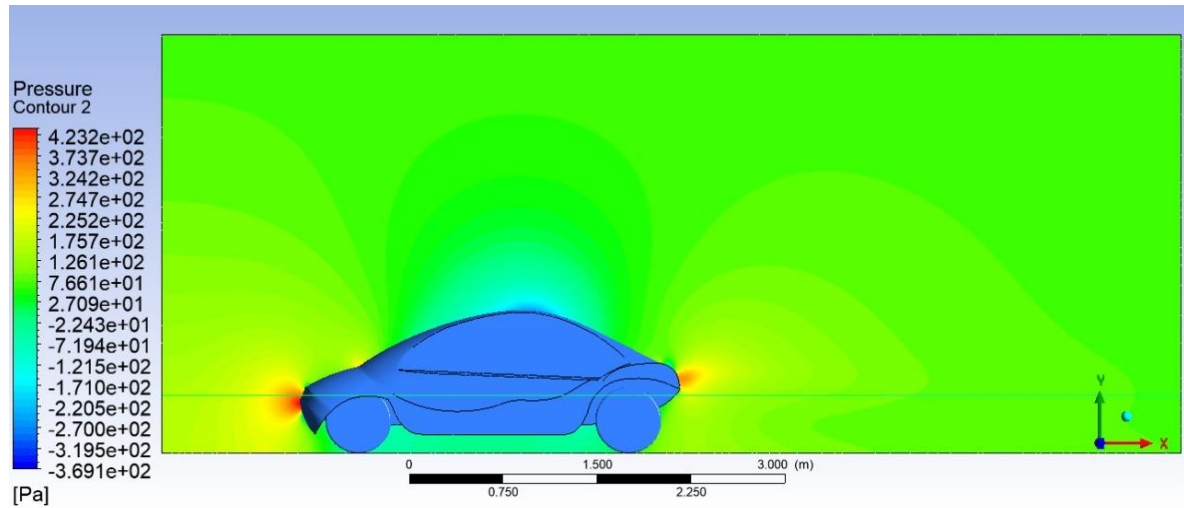
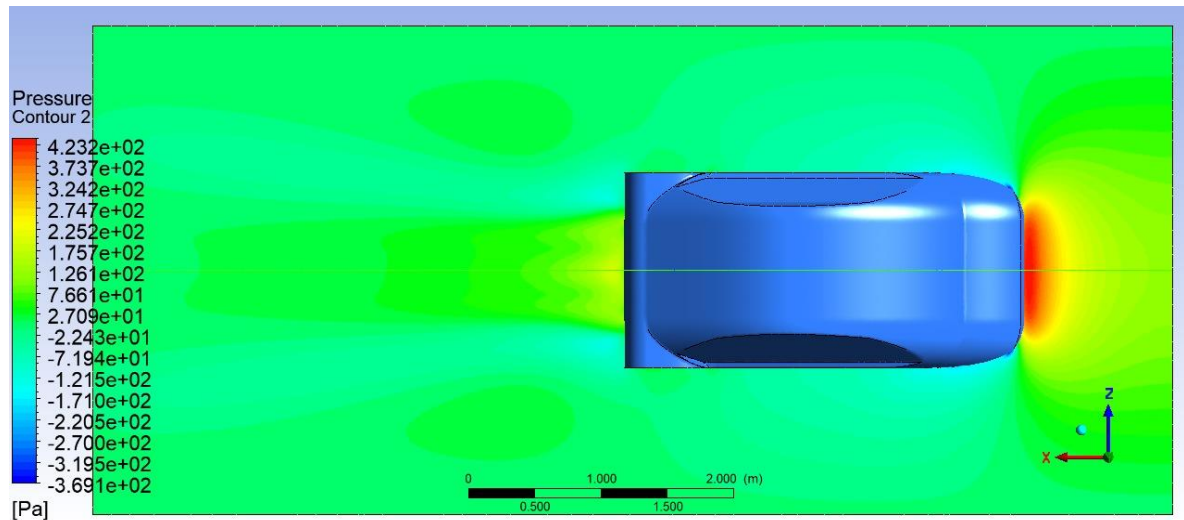
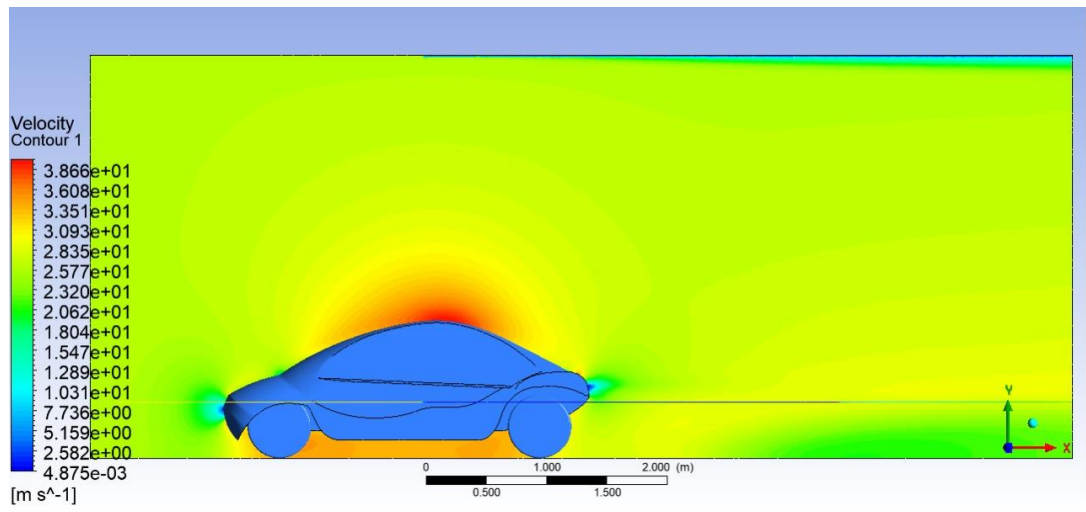


Figura 54. Visualización de la presión dinámica (vista superior)



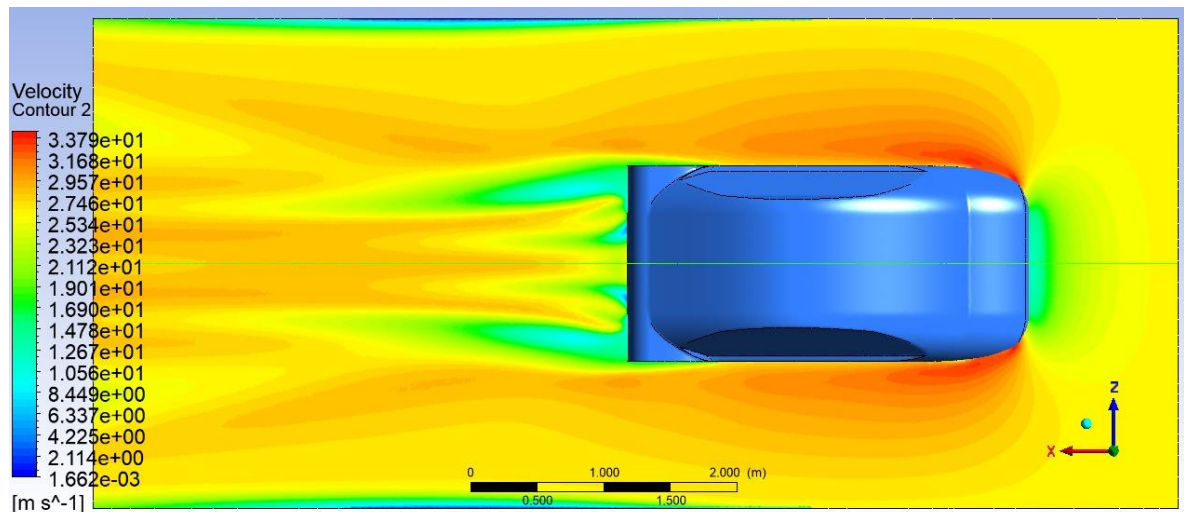
Ahora bien, la interpretación del factor velocidad está directamente relacionado a la forma de la carrocería y por consiguiente a la trayectoria que debe seguir el aire para bordear la superficie de la geometría.

Figura 55. Visualización de la velocidad (vista lateral)



Fragmentos como la parte posterior del auto son de gran importancia ya que rellenar el vacío que deja el vehículo al pasar consiste es todo un reto porque justo en esta zona se genera la mayor cantidad de vórtices y turbulencia.

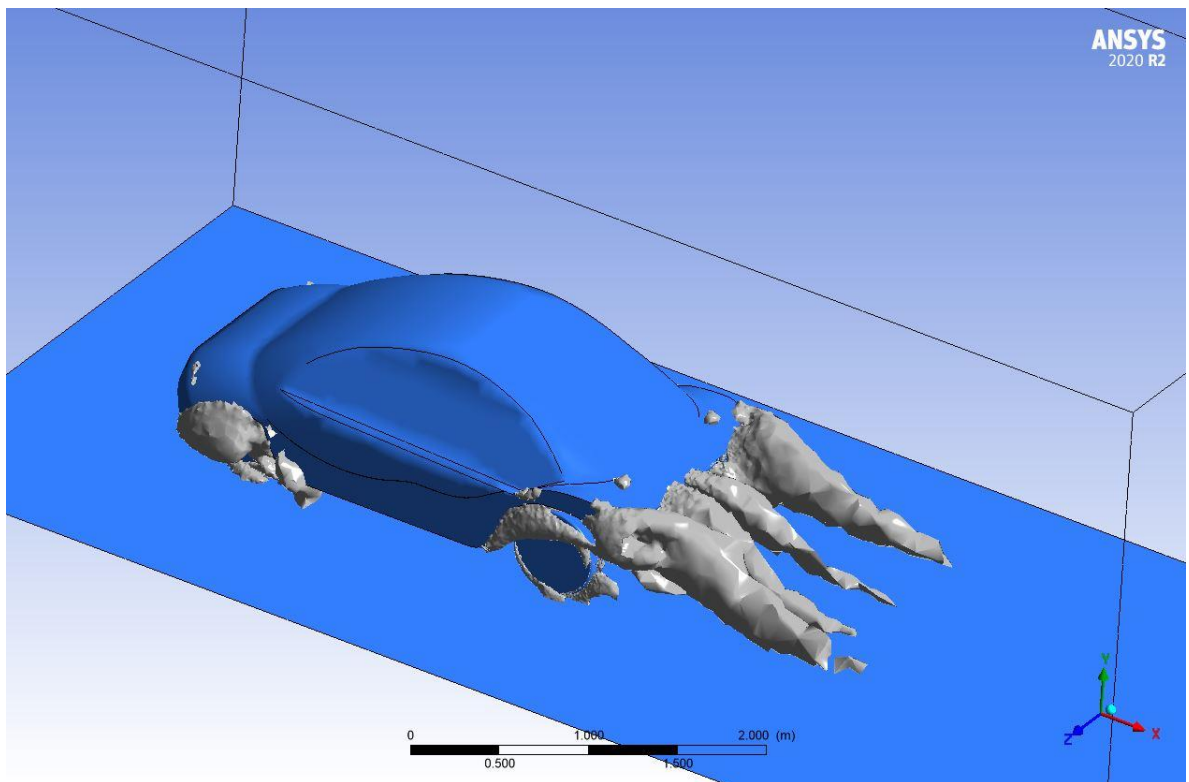
Figura 56. Visualización de la velocidad (vista superior)



Vórtices:

En la figura 57 se observan las diferentes vorticidades que el vehículo presenta, esto se debe a que terminando la geometría del auto se pueden encontrar aristas muy pronunciadas o ángulos de ataque muy grandes, estas vorticidades son un factor de pérdida de energía lo que indica que están relacionadas con la fuerza de arrastre a la cual se verá sometida el vehículo.

Figura 57. Vórtices del modelo de carrocería



En todos los diseños y simulación siempre se buscó reducir la vorticidad en la parte trasera de auto, por lo tanto, la mejor manera es intentar unir las líneas de corriente del aire de tal manera que no existan choques entre los vectores de velocidad si no que estos se unan de forma paralela.

7.7.1 Parámetros aerodinámicos de la carrocería.

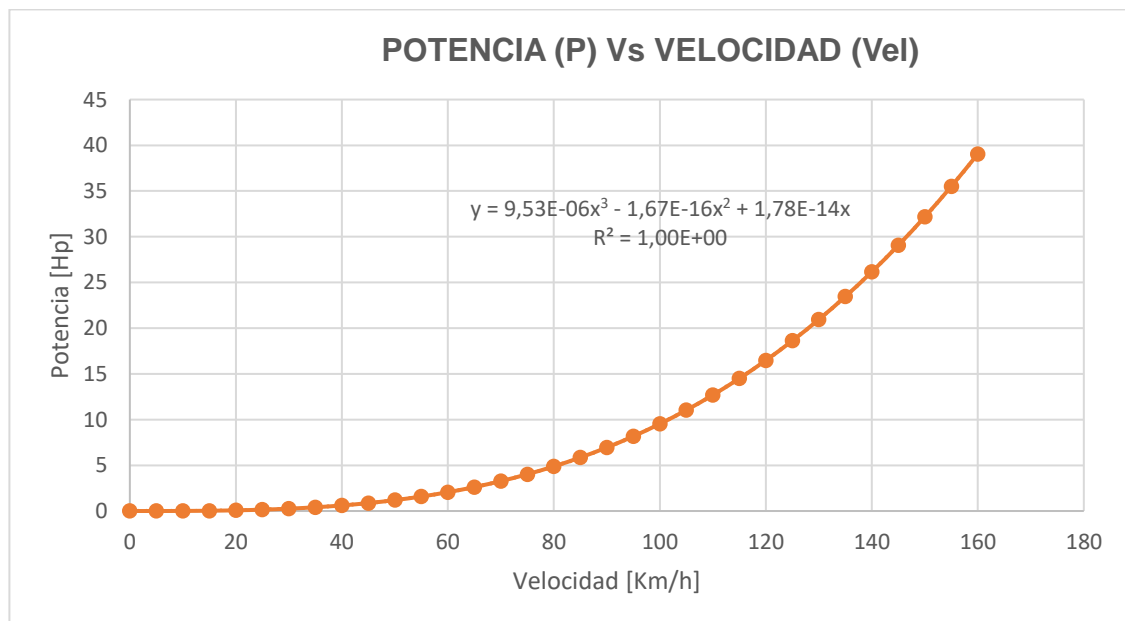
Tabla 10. Parámetros obtenidos en la simulación

| PARÁMETROS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN |
|---|
| $C_x = 0,39$ |
| $C_z = 0,18$ |
| Fuerza de Arrastre = 231 [N] @ 85 [km/h] |
| Potencia Requerida = 6,9 [hp] @ 85 [km/h] |

Nota: La simulación se realizó teniendo en cuenta el concepto de velocidad relativa entre los dos cuerpos (en este caso, el aire y el vehículo), es decir, que la suma entre las dos velocidades da la velocidad del aire para simulación.

7.7.1.1 Curva Potencia vs Velocidad (P - V). La forma en la que se puede evidenciar mayormente el ahorro de potencia obtenido por la aerodinámica del vehículo es un diagrama de Potencia vs Velocidad, el cual se construye al realizar operaciones con los anteriores datos.

Figura 58. Gráfica Potencia Vs Velocidad



Los resultados previamente descritos representan una alternativa correspondiente al diseño de carrocería planteado en este proyecto, sin embargo, se brinda la oportunidad de mejorar y optimizar estos informes en futuros estudios a través del siguiente código QR en el que se puede acceder a los archivos CAD y CAE presentados en este trabajo de investigación.

Figura 59. Código QR para la visualización y descarga de datos (CFD) y elementos (CAD) del proyecto



8. CONCLUSIONES

- La forma y contorno de la carrocería juegan un papel muy importante en la autonomía del vehículo, ya que existen fuerzas aerodinámicas (drag y Downforce) aplicadas al automóvil que son ocasionadas debido a cargas de presión y fricción entre la superficie del auto y el fluido de contacto en este caso, aire.
- En el estudio aerodinámico de un vehículo, las herramientas CAE son una gran alternativa en relación a su costo - beneficio, ya que permiten realizar todas las proyecciones de los parámetros aerodinámicos de manera más eficiente. La cuantificación de estas cargas puede ayudar a replantear formas y elementos asociados a la carrocería del automóvil. Por otro lado, los modelos matemáticos actuales de turbulencia representan un costo computacional elevado por lo que la buena selección de estos para desarrollar la simulación, dan pie a una ventaja competitiva en la industria simplificando los tiempos que existen el proceso de diseño.
- A través del software Ansys se logró determinar que el coeficiente de arrastre aerodinámico correspondiente a la propuesta de diseño de la carrocería planteada es de 0,39; lo cual significa que se encuentra dentro del promedio de C_x en vehículos actualmente hallados en el mercado y representa un buen valor teniendo en cuenta los parámetros y requerimientos de diseño estudiados y aplicados a este diseño, no obstante es una alternativa que se deja abierta para la mejora y optimización en futuros estudios del tema.
- En el análisis aerodinámico se determinó que el automóvil desplazándose a una velocidad de 85 [km/h] requiere de una potencia de 6,9 [hp] indicando

que el diseño es muy aerodinámico y que no ejerce mucha oposición al movimiento en comparación a los estudios y bibliografía investigada del tema.

- Por otra parte, el diseño básico del chasis permite no solo visualizar de manera clara las trayectorias de los diferentes perfiles estructurales si no que, a su vez permite corregir los posibles recorridos que generan errores con elementos estructurales móviles. Si bien, en este trabajo no se realizó el análisis de cargas para el chasis si se presenta una propuesta en cuanto a la forma que este componente puede tener ofreciendo la posibilidad de realizar un estudio estructural apropiado y definir las cargas que actúan en cada elemento.

9. RECOMENDACIONES

- Utilizar la propuesta actual como punto de partida para una optimización del modelo en pro de obtener mejores resultados en el futuro. Y, además, buscar la relación que existe entre la potencia consumida (provocada al atravesar el aire) y la de otros componentes (mecánicos) para obtener el consumo energético de las baterías (Amper/hora) y la autonomía del vehículo en carretera.
- Someter el modelo a pruebas de turbulencia realizando un estudio mediante el uso de túneles de viento a escala de forma que se obtengan datos más precisos de las distintas geometrías de carrocería y se logre realizar una comparación entre los resultados del software CAE y la simulación a escala.
- Hacer uso de herramientas CAD para realizar el modelado de componentes del automóvil y a su vez, software CFD para los distintos análisis aerodinámicos de la carrocería.
- Para optimizar y disminuir costos computacionales se recomienda simular solo una parte de la geometría si no se cuenta con un buen equipo o soporte informático, de forma que permita al programa simplificar cálculos y arrojar datos precisos.
- Analizar la implicación en el rendimiento aerodinámico de los coeficientes de resistencia lateral (C_y) y de resistencia vertical o sustentación (C_z), datos que pueden ayudar a visualizar el comportamiento y eficiencia de las presiones

aplicadas a estas geometrías. No obstante, se aclara que en este proyecto se revisó el parámetro Cz pero de manera muy general.

BIBLIOGRAFÍA

3DC AD PORTAL. ANSYS. [En línea] [Citado el: 1 de Febrero de 2022.] disponible en: <https://www.3dcadportal.com/ansys.html>.

ARBEJ, Miguel. Tema 3: Modelos matemáticos de turbulencia. [En línea]. disponible en: <https://es.scribd.com/presentation/342534991/Tema-3-Modelos-de-Turbulencia>

ARIAS PARADA, Alejandro y CEDIEL URREA, Marcio Nicolas. 2019. Estudio práctico de la aerodinámica en un automóvil deportivo utilizando el programa de dinámica de fluidos computacional Flow de Solidworks. Santander, [Trabajo de Grado] Bucaramanga: Unidades Tecnológicas De Santander. pág. 28, [En línea]. 2019 disponible en: <http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1371/2R-DC-95.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

AYALA, David. Aerodinámica conceptos básicos. [En línea] [Citado el: 19 de enero de 2022.] disponible en: <https://motorgiga.com/el-automovil-a-fondo/aerodinamica-conceptos-basicos/gmx-niv199-con387137.htm>.

BLANCO, Julian. 2019. *Aerodinámica del vehículo*. [En línea] 19 de agosto de 2019. [Citado el: 22 de julio de 2021.] disponible en: <https://mecatronic.blogspot.com/2019/08/aerodinamica-del-vehiculo.html>.

CERPA Rafael; NIETO CRUZ Eduardo Alfredo; LONDOÑO Lina. Estudio de los modelos de turbulencia aplicados a la aerodinámica externa de un automóvil mediante software de dinámica computacional de fluidos [en línea] 2016 disponible en: https://www.researchgate.net/publication/314869722_Estudio_de_los_modelos_de

turbulencia_aplicados_a_la_aerodinamica_externa_de_un_automovil_mediante_software_de_dinamica_computacional_de_fluidos

CONNOR, Nick. ¿Qué es el número de Reynolds? – Definición. [En línea] 20 de Enero de 2020. [Citado el: 30 de Enero de 2022.] disponible en: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-numero-de-reynolds-definicion/>.

CONNOR, Nick. Qué es el arrastre – Resistencia al aire y a los fluidos – Definición. [En línea] 06 de enero de 2020. [Citado el: 04 de junio de 2021.] disponible en: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-arrastre-resistencia-al-aire-y-a-los-fluidos-definicion/#:~:text=Arrastre%20de%20presi%C3%B3n-,El%20arrastre%20de%20forma%20conocido%20tambi%C3%A9n%20como%20arrastre%20de%20presi%C3%B3n,sumergido%2C%20y%20e>

CUNALATA CUNALATA, Carlos Wilfrido y TERÁN VACA, Jorge Santiago. Diseño y construcción del bastidor y carrocería, de un vehículo eléctrico biplaza plegable, usando Software CAD-CAE y manufactura ecuatoriana. [Repositorio Institucional de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE]. [En línea] agosto de 2014. [Citado el: 27 de mayo de 2021.] <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/8845>.

CURB. H-Point: los fundamentos del diseño y embalaje de automóviles. Curb. [En línea] [Citado el: 01 de Junio de 2021] disponible en: <https://thecurbshop.com/products/h-point-the-fundamentals-of-car-design-packaging-2nd-edition>.

CURRO, San Miguel. Cortando el viento: la importancia de la aerodinámica en los coches. Autocasión. [En línea] 19 de febrero de 2020. [Citado el: 04 de junio de 2021.] disponible en: <https://www.autocasion.com/actualidad/reportajes/importancia-aerodinamica-coche-cx-cy->

HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ, Julio. Modelo basado en la longitud de mezcla de Prandtl. [En línea] 2000, 2001. [Citado el: 28 de Enero de 2022.] disponible en: <https://www2.uned.es/ing-fluidos/IntroMF/node76.html#:~:text=Prandtl%20postul%C3%B3%20que%20en%20flujos,de%20las%20capas%20l%C3%ADmite%20turbulentas..>

INFOBAE. La intención de compra de carros eléctricos en Colombia se incrementó en más del 90% en 2020. Infobae. [en línea] 2021. Disponible en: <https://www.infobae.com/america/colombia/2021/01/06/la-intencion-de-compra-de-carros-electricos-en-colombia-se-incremento-en-mas-del-90-en-2020/#:~:text=La%20intenci%C3%B3n%20de%20compra%20de,del%2090%25%20en%202020%20%2D%20Infobae>

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE RECURSOS BIOLÓGICOS ALEXANDER VON HUMBOLDT. Serpientes de los andes colombianos. Bogotá [en línea] disponible en: <http://www.bio-nica.info/Biblioteca/RodriguezSerpientesColombia.pdf>
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE RECURSOS BIOLÓGICOS ALEXANDER VON HUMBOLDT. Op. Cit.

ISKANDAR, Fraija B. 2006. Estudio de la aerodinámica en los vehículos. s.l. : Prospectiva Vol. 4. 1692-8261. [en línea], 2006. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/4962/496251108011.pdf>

MINTRANSPORTE. El Ministerio de Transporte se compromete con la Calidad del Aire. [en línea] 2018. Disponible en: <https://www.mintransporte.gov.co/asuntosambientales/publicaciones/5719/el-ministerio-de-transporte-se-compromete-con-la-calidad-del-aire/>

MOTOR. ¿Qué es la carrocería? Tipos y características. [En línea] [Citado el: 08 de junio de 2021] disponible en: <https://www.motor.es/que-es/carroceria>

ORIOLO. El Efecto Venturi en la Fórmula 1. [En línea] 10 de Agosto de 2018. [Citado el: 30 de Enero de 2022.] disponible en: <https://www.racingatmosphere.com/aerodinamica/efecto-venturi/>

PAUTA SOLANO, Juan Fernando y SÁNCHEZ RAMÍREZ, Miguel Leonardo. Diseño y construcción de la carrocería de un vehículo de competencia tipo formula SAE. [Tesis. Ingeniero mecánico automotriz] Cuenca: Universidad Politecnica Salesiana. [En línea] noviembre de 2014. [Citado el: 22 de mayo de 2021] disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7183/1/UPS-CT004048.pdf>

POBLACIÓN SÁEZ, Alfonso Jesús. Las ecuaciones que nadie ha conseguido resolver y que valen un millón de dólares. [En línea] 09 de Mayo de 2017. [Citado el: 01 de Febrero de 2022.] disponible en: https://www.abc.es/ciencia/abci-navier-stokes-ecuaciones-nadie-conseguido-resolver-y-valen-millon-dolares-201705021028_noticia.html

PRINCIPIO DE. Principio de continuidad. [En línea] 19 de Diciembre de 2019. [Citado el: 30 de Enero de 2022.] disponible en: <https://www.principiode.com/principio-de-continuidad/>.

REAL PRONOSTICO. Real Pronostico. Tiempo en Bucaramanga . [En línea] 9 de Agosto de 2021. [Citado el: 9 de Agosto de 2021.] disponible en: [https://rp5.ru/Tiempo_en_Bucaramanga,_Palonegro_\(aeropuerto\)](https://rp5.ru/Tiempo_en_Bucaramanga,_Palonegro_(aeropuerto)).

ROSAS, Carlos. Arrastre y Sustentación. [En línea] [Citado el: 04 de junio de 2021.] <https://sites.google.com/site/0902carlosr/arrastre-y-sustentacin>

SARMIENTO, Mariluz. La relación entre la biónica y el diseño para los criterios de forma y función. Facultad de diseño y comunicación de la Universidad de Palermo.

[En línea] [Citado el: 24 de mayo de 2021] disponible en:
https://fido.palermo.edu/servicios_dyc/publicacionesdc/cuadernos/detalle_articulo

SCIENCEDIRECT. Aerodinámica de los vehículos de carretera: De la mecánica de fluidos a la ingeniería de vehículos. [en línea] disponible en:
<https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2191/book/9780750612678/aerodynamics-of-road-vehicles>

THE WEATHER CHANNEL . Bucaramanga, Santander, Colombia [En línea] 2021. [Citado el: 9 de Junio de 2021.] disponible en:
<https://weather.com/weather/today/l/7.13,-73.00?par=google>.

UNION OF CONCERNED SCIENTISTS. Carros, camiones, buses y la contaminación del aire. El sector transporte es uno de los mayores contaminantes del aire en Estados Unidos. UCSUSA. [en línea] 2017. Disponible en:
<https://es.ucsusa.org/resources/carros-camiones-buses-contaminacion#:~:text=Los%20carros%2C%20camiones%20y%20buses,global%20en%20los%20Estados%20Unidos>.

VANGUARDIA. Así ha crecido el parque automotor en el área metropolitana de Bucaramanga. Vanguardia. [en línea] 2018. Disponible en:
<https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/asi-ha-crecido-el-parque-automotor-en-el-area-metropolitana-de-bucaramanga-ABVL445775>

WEATHER ONLINE. Velocidad del Viento. [En línea] Enero de 2020. Disponible en:
<https://www.woespana.es/weather/maps/city?FMM=1&FYY=2020&LMM=12&LYY=2021&WMO=80094&CONT=samk®ION=0021&LAND=CO&ART=WST&R=0&NOREGION=0&LEVEL=162&LANG=es&MOD=tab>

WEATHER SPARK. El clima promedio en Bucaramanga. [En línea] 2021. [Citado el: 12 de Julio de 2021.] Disponible en: <https://es.weatherspark.com/y/24381/Clima-promedio-en-Bucaramanga-Colombia-durante-todo-el-año>.

WONG, Jo Yung. MECH E., F. I.; Theory of Ground Vehicles. New York : John Wiley & Sons, Inc, págs. 209-210. [en línea] 2001. Disponible en: http://160592857366.free.fr/joe/ebooks/Automotive%20engineering%20books/Theory_of_ground_vehicles.pdf

YUMPU. Guía de tutoriales de ANSYS FLUEN. [En línea] 2013. [Citado el: 01 de junio de 2021.] disponible en: <https://www.yumpu.com/en/document/view/2459518/ansys-fluent-tutorial-guide>

ANEXOS

Anexo A. Diseño aerodinámico y de forma de la carrocería

Para la creación del concepto de diseño de la carrocería presentada en este proyecto de investigación se utilizó la metodología a continuación descrita y tomada como base del libro: *H-Point: los fundamentos del diseño y embalaje de automóviles* ("*H-Point: The Fundamentals of Car Design and Packaging*") (Stuart Macey & Geoff Wardle, 2009).

Planificación e investigación de productos.

En primer lugar, se revisaron algunos modelos ya presentes en el mercado para tener una idea del enfoque de los autos eléctricos compactos del momento, así como de las medidas y distribuciones de estos.

Entre los modelos destacados se encuentra el Renault Twizy, un auto bastante llamativo por su peculiar forma y tamaño ultra compacto, este cuenta con una capacidad de transporte de 2 pasajeros, ubicados uno delante del otro o posición "tándem". También posee un pequeño baúl en la parte trasera del vehículo, así como otros pequeños espacios dentro del habitáculo de pasajeros.

Figura 60. Renault Twizy



Fuente: RENAULT Twizy [en línea] disponible en:
<https://www.renault.com.co/electricos/twizy.html>

Por otra parte, otro vehículo del momento es el Auteco Zhidou D2S, un cuadriciclo biplaza, solo que en este caso y a diferencia del Renault Twizy, sus pasajeros se ubican uno al lado del otro.

También posee espacios para baúl y compartimientos pequeños.

Figura 61. Zhidou D2S



Fuente: AUTEKO MOBILITY Cuadriciclo eléctrico Zhidou [en línea] disponible en:
<https://www.autecomobility.com/cuadriciclo-electrico-zhidou-d2s/p>

Objetivos funcionales.

En el despliegue de los objetivos funcionales se busca transformar las demandas o requerimientos del consumidor en funciones que aporten no solo calidad, sino que cumplan con las especificaciones técnicas para el diseño óptimo de la carrocería.

Requerimientos del consumidor:

- Autonomía
- Alta seguridad
- Bajo ruido
- Buen aspecto (Exterior)
- Buena potencia de arranque
- Buen manejo y confort
- Alta velocidad punta
- Capacidad de pasajeros
- Capacidad de baúl
- Buena iluminación y distribución visual (Óptica)

Especificaciones técnicas:

- Resistencia aerodinámica
- Apoyo aerodinámico
- Diseño estético
- Diseño estructural
- Peso reducido
- Tamaño amplio
- Campo visual desde el habitáculo
- Insonorización habitáculo

Matriz de calidad QFD.

La matriz de calidad se construye a partir de los requerimientos previamente descritos y de las especificaciones técnicas del diseño donde a través de la identificación de la prioridad y una evaluación de estos parámetros se busca conocer los puntos principales, en este caso: la resistencia aerodinámica, diseño estético, apoyo aerodinámico y diseño estructural.

Figura 62. Matriz de calidad con los requerimientos y especificaciones técnicas

| REQUERIMIENTOS | PRIORIDAD | ESPECIFICACIONES TÉCNICAS | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----------|---------------------------|------------|--------------------|------------|-----------------|------------|--------------------|------------|---------------|------------|---------------|-----------|----------------------------------|------------|---------------------------|-----------|
| | | RESISTENCIA AERODINÁMICA | | APOYO AERODINÁMICO | | DISEÑO ESTÉTICO | | DISEÑO ESTRUCTURAL | | PESO REDUCIDO | | TAMAÑO AMPLIO | | CAMPO VISUAL DESDE EL HABITÁCULO | | INSONORIZACIÓN HABITÁCULO | |
| | | Dato | Ponderado | Dato | Ponderado | Dato | Ponderado | Dato | Ponderado | Dato | Ponderado | Dato | Ponderado | Dato | Ponderado | Dato | Ponderado |
| Autonomía | 10 | 9 | 90 | 3 | 30 | 1 | 0 | 1 | 10 | 3 | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Alta seguridad | 9 | 3 | 27 | 3 | 27 | 1 | 0 | 9 | 81 | 1 | 9 | 0 | 0 | 9 | 81 | 0 | 0 |
| Bajo ruido | 3 | 3 | 9 | 1 | 3 | 1 | 3 | 3 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 9 | 27 |
| Buen aspecto (Exterior) | 8 | 1 | 8 | 0 | 0 | 9 | 72 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 24 | 1 | 8 | 1 | 8 |
| Buena potencia de arranque | 6 | 9 | 54 | 3 | 18 | 3 | 18 | 0 | 0 | 9 | 54 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Buen manejo y confort | 7 | 3 | 21 | 9 | 63 | 3 | 21 | 3 | 21 | 3 | 21 | 3 | 21 | 3 | 21 | 3 | 21 |
| Alta velocidad punta | 5 | 9 | 45 | 3 | 15 | 1 | 5 | 1 | 5 | 3 | 15 | 0 | 0 | 3 | 15 | 0 | 0 |
| Capacidad de pasajeros | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Capacidad de baúl | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 9 | 18 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Buena iluminación y distribución visual (Óptica) | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 36 | 3 | 12 | 1 | 4 | 3 | 12 | 3 | 12 | 0 | 0 |
| TOTALES | | | 254 | | 156 | | 160 | | 143 | | 136 | | 84 | | 140 | | 56 |
| ORDEN IMPORT. | | 1 | | 3 | | 2 | | 4 | | 6 | | 7 | | 5 | | 8 | |

Análisis de alternativas de carrocerías.

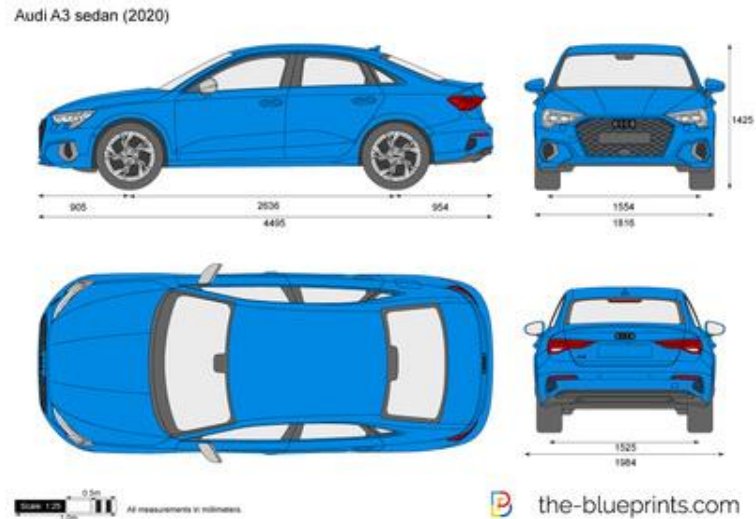
En este análisis se revisan tres tipos de carrocería: sedán, coupé y SUV, de tal forma que se seleccione la mejor opción dentro de los requerimientos y especificaciones previamente definidas.

Alternativa 1: Carrocería tipo sedán.

La carrocería tipo sedán es una carrocería ejecutiva y familiar normalmente de tres volúmenes, 5 puertas, que permite un mayor espacio tanto del maletero como en los asientos traseros; posee un voladizo delantero más corto e implementan tracción delantera permitiendo un manejo suave pensado para sitios urbanos a bajas velocidades.

Este tipo de carrocerías poseen un buen coeficiente de arrastre, aunque al ser algo más altos que otras carrocerías posee mayor área frontal lo cual en últimas se ve reflejado en un aumento porcentual de la resistencia total, este tipo de autos maneja coeficientes de arrastre bajos, los sedanes actualmente representan un gran porcentaje de los autos en circulación.

Figura 63. Diferentes vistas de una carrocería tipo sedán



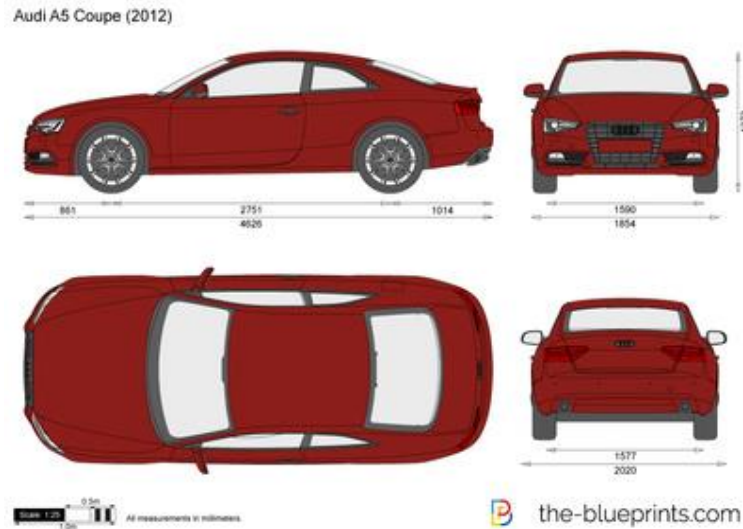
Fuente: THE-BLUEPRINTS. Audi A3 sedán. [En línea] 2020. [Citado el: 01 de junio de 2021.] disponible en: https://www.the-blueprints.com/vectordrawings/show/19755/audi_a3_sedan/

Alternativa 2: Carrocería tipo coupé.

La carrocería tipo coupé es sinónimo de un auto deportivo y agresivo que concibe un manejo más confortable a altas velocidades, es un auto que permite mayor velocidad punta y aceleraciones altas ya que posee coeficientes de arrastre aerodinámico más bajos que la mayoría de los autos.

Es un vehículo dos volúmenes, tres puertas y normalmente este tipo de autos no implementan plazas traseras, aunque existen modelos que si lo incorporan como lo es el caso del AUDI A5 2012 que puede ser un auto flexible llegando a ser familiar; las carrocerías coupé tienen una voladizo delantero mayor lo cual refleja mayormente tracción trasera.

Figura 64. Vistas de una carrocería tipo coupé



Fuente: THE BLUEPRINTS. Audi A5 Coupe. [En línea] 2012. [Citado el: 01 de junio de 2021.] disponible en: https://www.the-blueprints.com/vectordrawings/show/4046/audi_a5_coupe/

Alternativa 3: Carrocería tipo SUV.

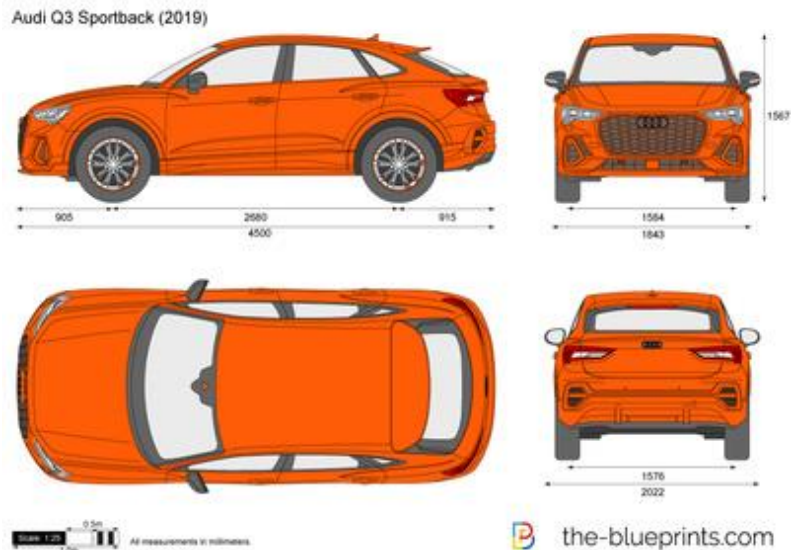
La carrocería SUV es una carrocería mucho más robusta fabricada en monocasco de 5 puertas y 5 puestos normalmente, aunque se encuentran SUV con 7 puestos.

Las SUV son vehículos utilitarios deportivos muy flexibles diseñados para vías urbanas o rurales que poseen una gran tamaño y capacidad de maletero o pasajeros, este tipo de vehículos al poseer gran dimensionamiento requieren un motor con mayor potencia tanto para romper la propia inercia a la rodadura como para romper la resistencia del aire ya que poseen mayor área frontal.

Simplificando la implementación de una carrocería tipo SUV no altera positivamente a la autonomía del vehículo, aunque es una muy buena alternativa cuando se

comparan autos de igual tamaño ya que la SUV poseen un concepto deportivo donde sus dos volúmenes están muy marcados por líneas muy aerodinámicas.

Figura 65. Vistas de una carrocería tipo SUV



Fuente: THE-BLUEPRINTS. Audi Q3 Sportback. [En línea] 2019. [Citado el: 01 de junio de 2021.] disponible en: https://www.the-blueprints.com/vectordrawings/show/18468/audi_q3_sportback/

Evaluación de alternativas para la carrocería.

Para la evaluación de las tres alternativas de carrocería descritas anteriormente fue necesario utilizar los 4 ítems más importantes encontrados en la matriz de calidad y asignando a cada uno de ellos un porcentaje de prioridad según la puntuación obtenida en el QFD, esto con el fin de encontrar el diseño que cumpla con el alcance del proyecto y los objetivos de este.

La alternativa con mayor puntuación según la Tabla 2. fue un diseño de carrocería tipo coupé con una puntuación de 4.47 la cual nos permite enfocar el diseño a un

auto mucho más ligero y deportivo que pueda mantener una autonomía mucho mayor.

Figura 66. Evaluación de las alternativas de carrocería estudiadas

| | PRIORIDAD % | CARROCERÍA SEDÁN | | CARROCERÍA COUPÉ | | CARROCERÍA SUV | |
|--------------------------|-------------|------------------|------|------------------|------|----------------|-------|
| RESISTENCIA AERODINÁMICA | 36% | 4,5 | 1,62 | 5 | 1,8 | 4,2 | 1,512 |
| DISEÑO ESTÉTICO | 22% | 4,0 | 0,88 | 4,5 | 0,99 | 3,8 | 0,836 |
| APOYO AERODINÁMICO | 22% | 4 | 0,88 | 4 | 0,88 | 3,8 | 0,836 |
| DISEÑO ESTRUCTURAL | 20% | 4 | 0,8 | 4 | 0,8 | 4,5 | 0,9 |
| | TOTAL | | 4,18 | | 4,47 | | 4,084 |

Especificación de la alternativa seleccionada.

- Carrocería tipo coupé.

La carrocería tipo coupé nos permite aumentar significativamente la aerodinámica del vehículo, aumentando sustancialmente la autonomía de este, además de que le brinda al automóvil un estilo estético muy deportivo y agresivo que incentive la adquisición de este tipo de auto pensado para una zona urbana, pero que de igual forma cumple con el concepto de automóvil de uso diario.

Diseño e ideación de la forma.

Con todos los anteriores parámetros estudiados se plantean entonces algunos bocetos que contemplen un análisis del volumen y forma de la carrocería basada en la biónica de la Leptophis.

Figura 67. Boceto del modelo final del automóvil (Vista superior)

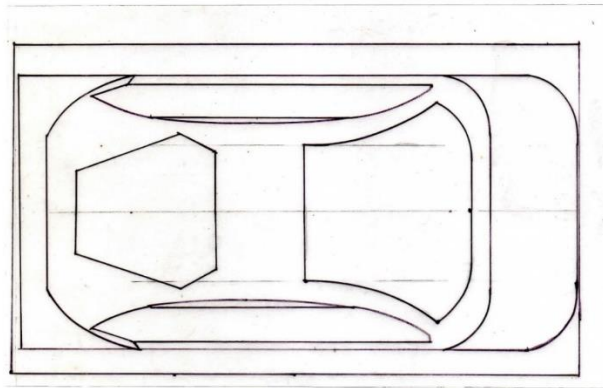


Figura 68. Boceto del modelo final del automóvil (Vista lateral)

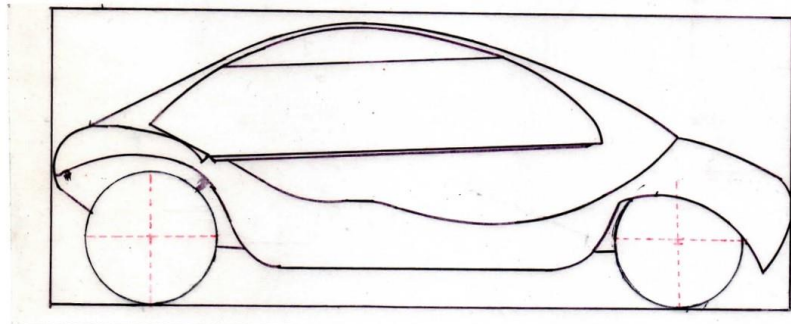
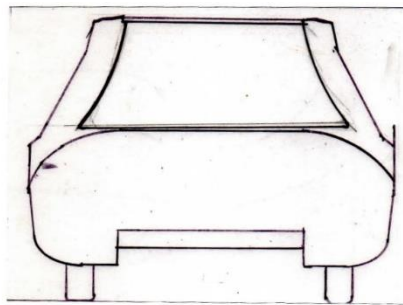


Figura 69. Boceto del modelo final del automóvil (Vista frontal)



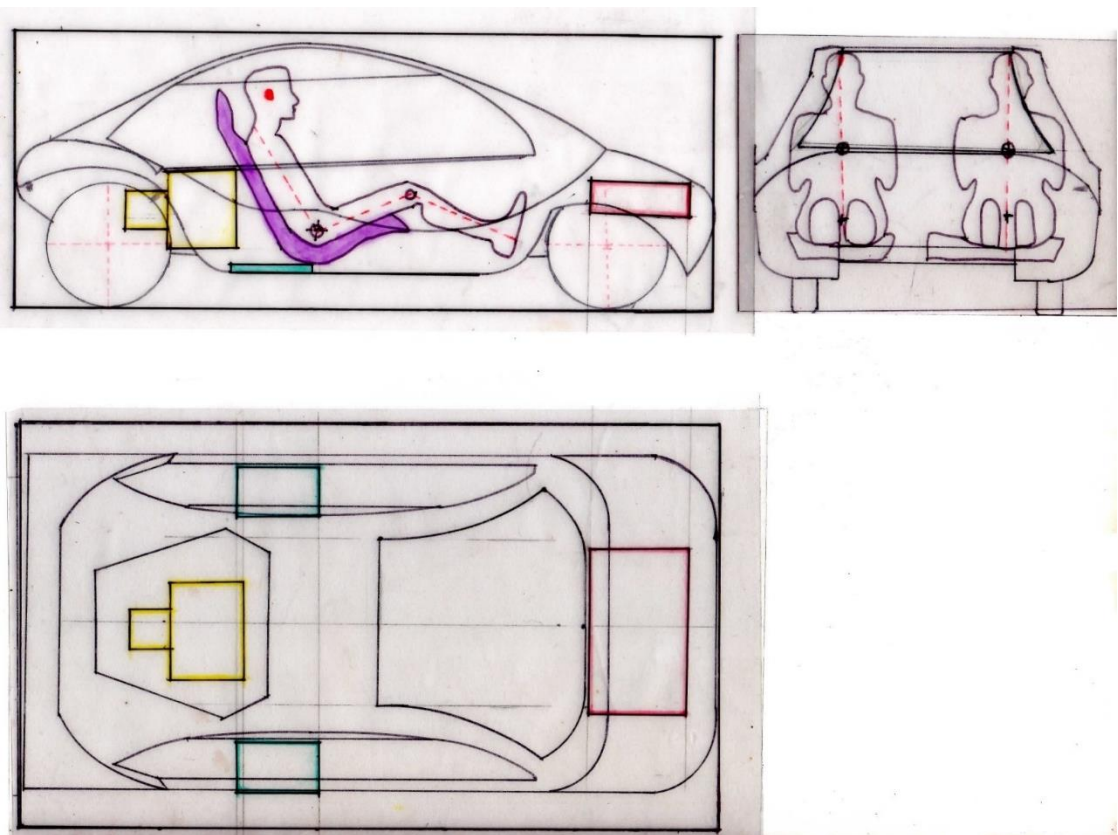
Evaluación de proporciones.

Figura 70. Ergonomía de la ubicación de una persona dentro del auto



Fuente: CURB. H-Point: los fundamentos del diseño y embalaje de automóviles. [En línea] [Citado el: 01 de Junio de 2021.] disponible en: <https://thecurbshop.com/products/h-point-the-fundamentals-of-car-design-packaging-2nd-edition>.

Figura 71. Boceto de la ubicación de elementos y componentes dentro del auto



NOTA: la selección del número de puertas se realizó al revisar el uso y eficiencia energética que conlleva la fabricación de estas, por eso se escogió la opción de 1 sola puerta frontal más un compartimiento de baúl.

Desarrollo del modelo y diseño avanzado.

Se desarrollaron 3 modelos en SolidWorks donde se buscó implementar a través de cada uno no solo la biónica de la serpiente sino también la efectividad en la aerodinámica.

No obstante, para efecto de simplificación del documento solamente se adjuntan los modelos diseñados en SolidWorks (Ver figura 72 & 73) más no todo el proceso de concepción sino solamente para el modelo final (Ver figura 74).

Figura 72. Modelo #1 diseñado en SolidWorks y simulado en Ansys.

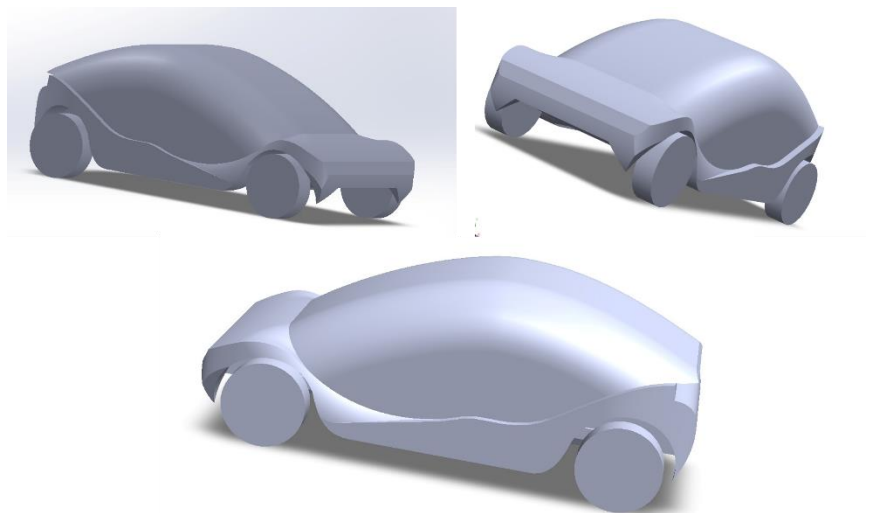
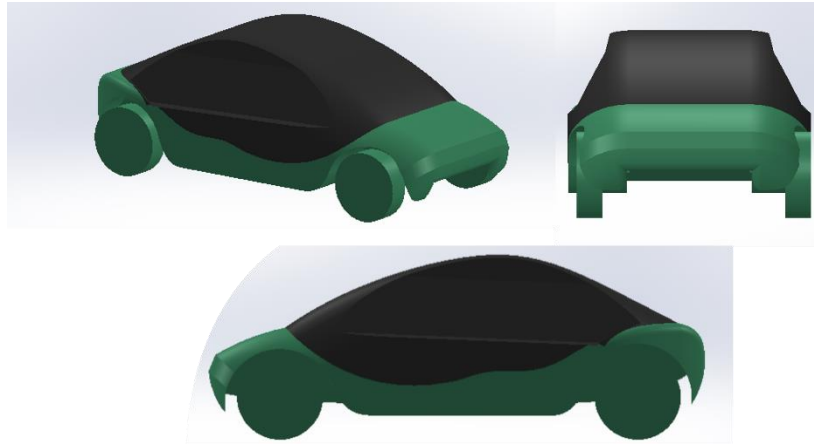


Figura 73. Modelo #2 diseñado en SolidWorks y simulado en Ansys.



Modelo final.

Figura 74. Croquis modelo de carrocería final

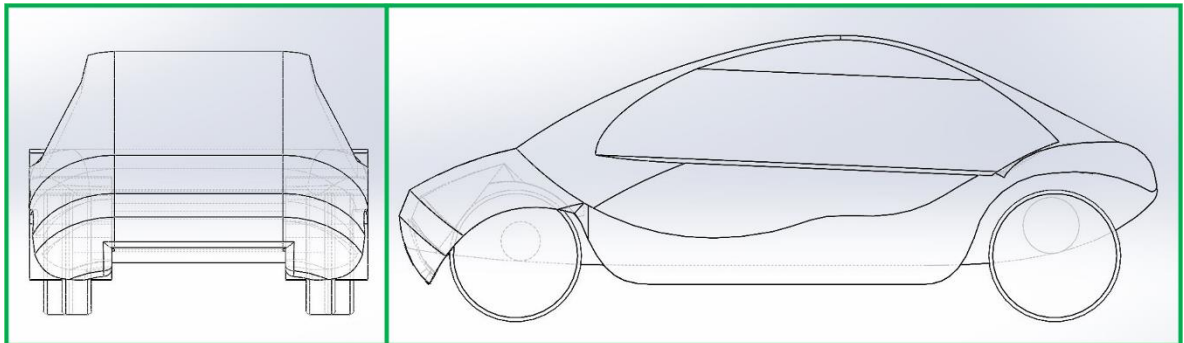


Figura 75. Modelado en SolidWorks de la carrocería (Vista isométrica frontal)

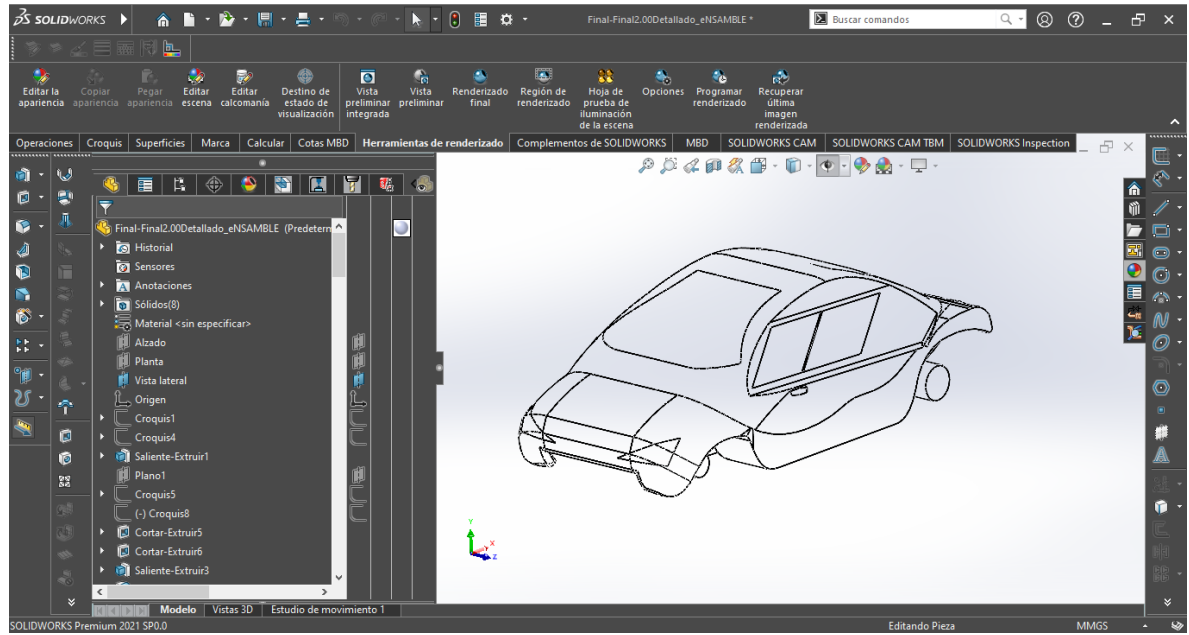


Figura 76. Modelado en SolidWorks de la carrocería (Vista isométrica posterior)

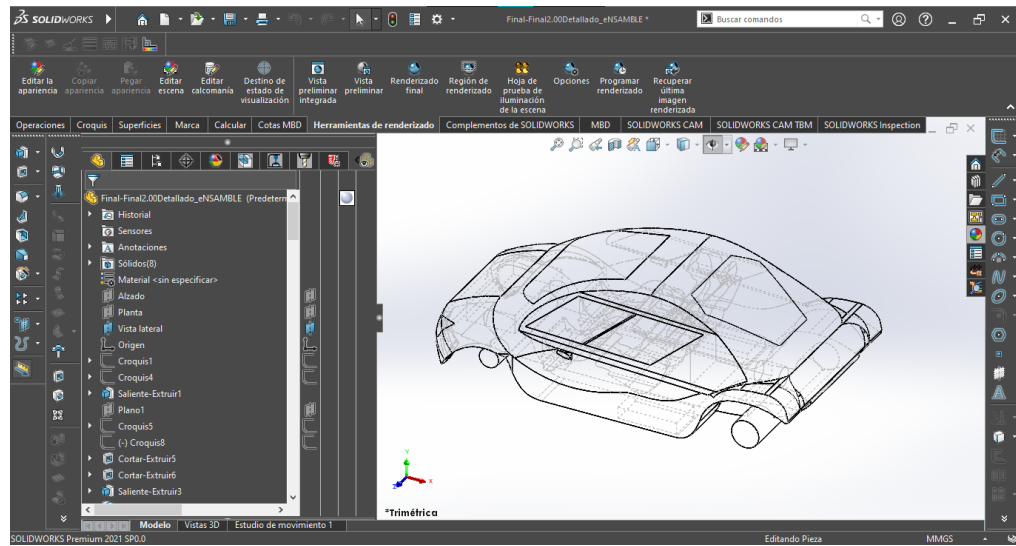


Figura 77. Modelado de detalles de la carrocería

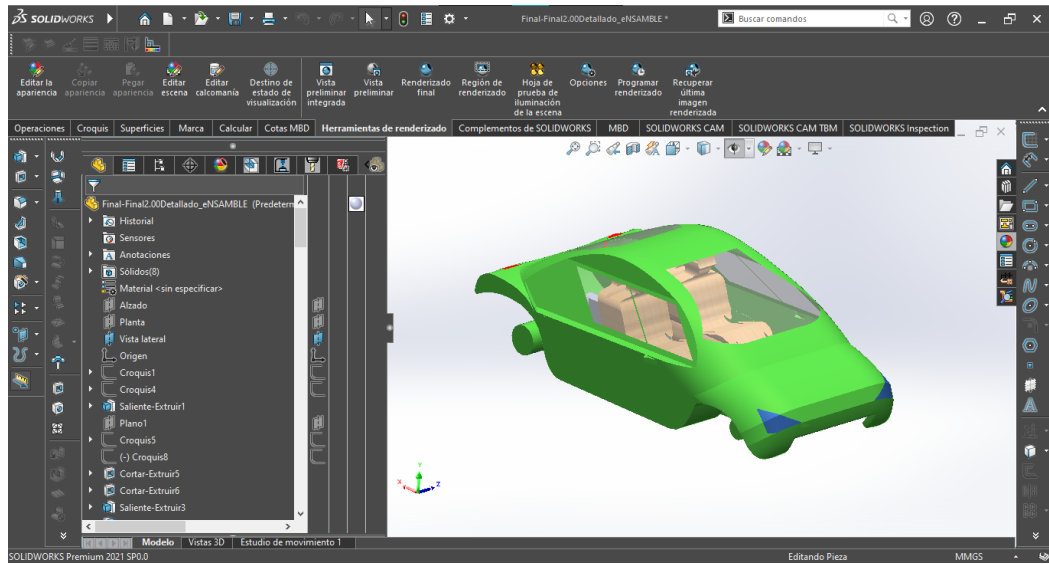
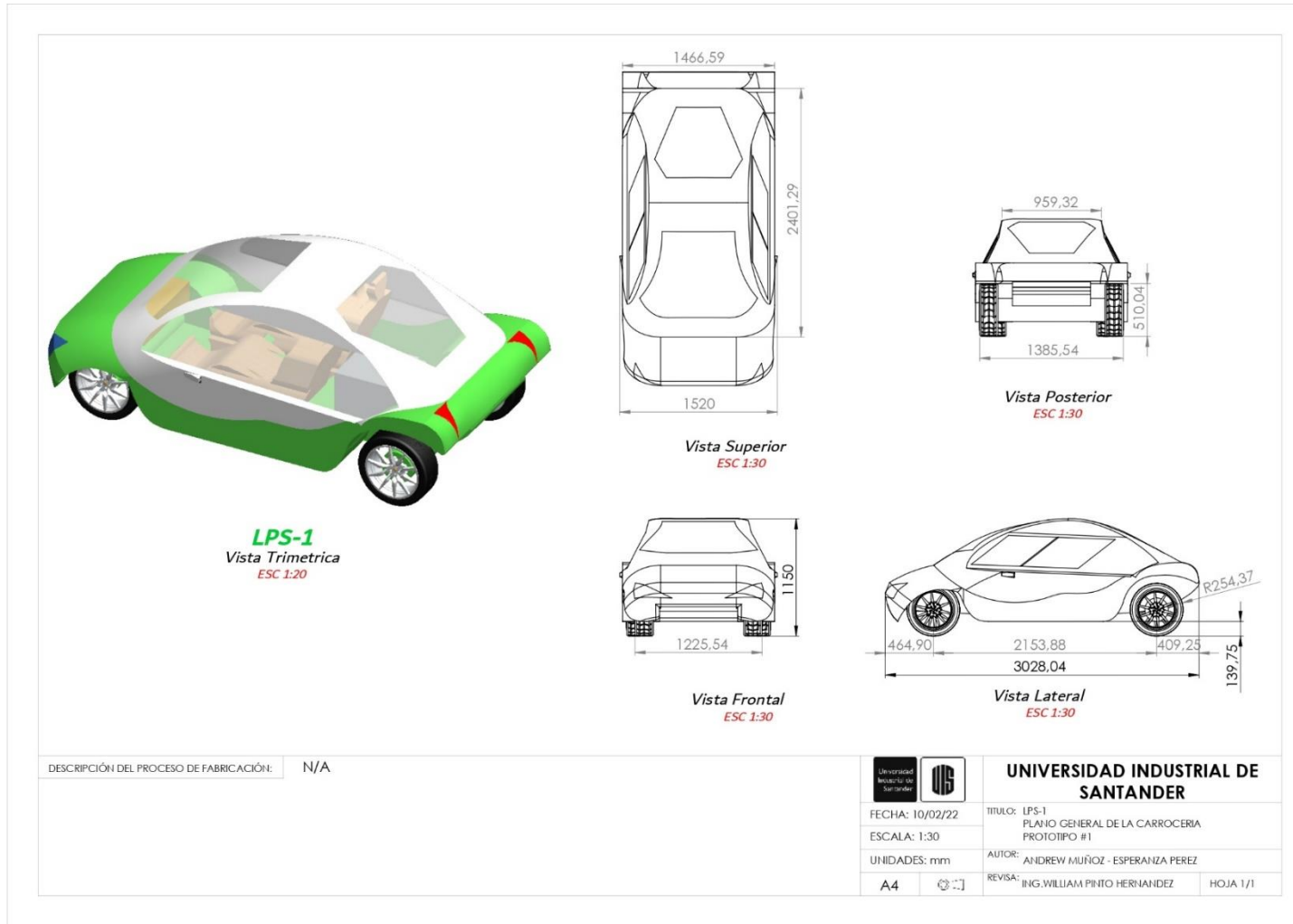


Figura 78. Plano general de la carrocería final



Anexo B. Simulación y Evaluación Aerodinámica (CFD) de la carrocería

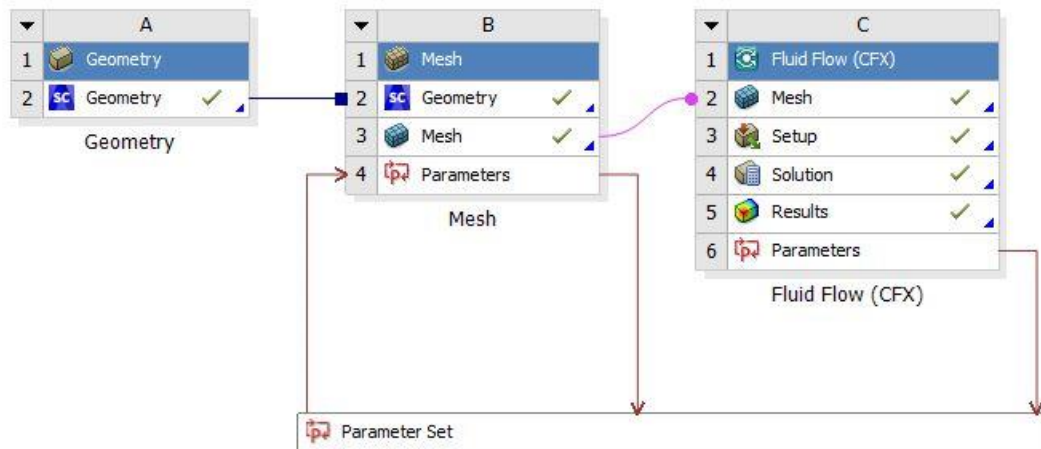
A continuación, se describe el paso a paso llevado a cabo en la realización de la simulación mediante el software Ansys de la carrocería modelada.

ETAPA DE PREPROCESAMIENTO

Definición de la estructura básica de la simulación.

En primer lugar, se plantea la estructura básica del algoritmo de simulación dentro de la interfaz de Ansys, para ello se divide en tres etapas las cuales se describen en la siguiente imagen.

Figura 79. Esquema de la estructura de simulación en ANSYS



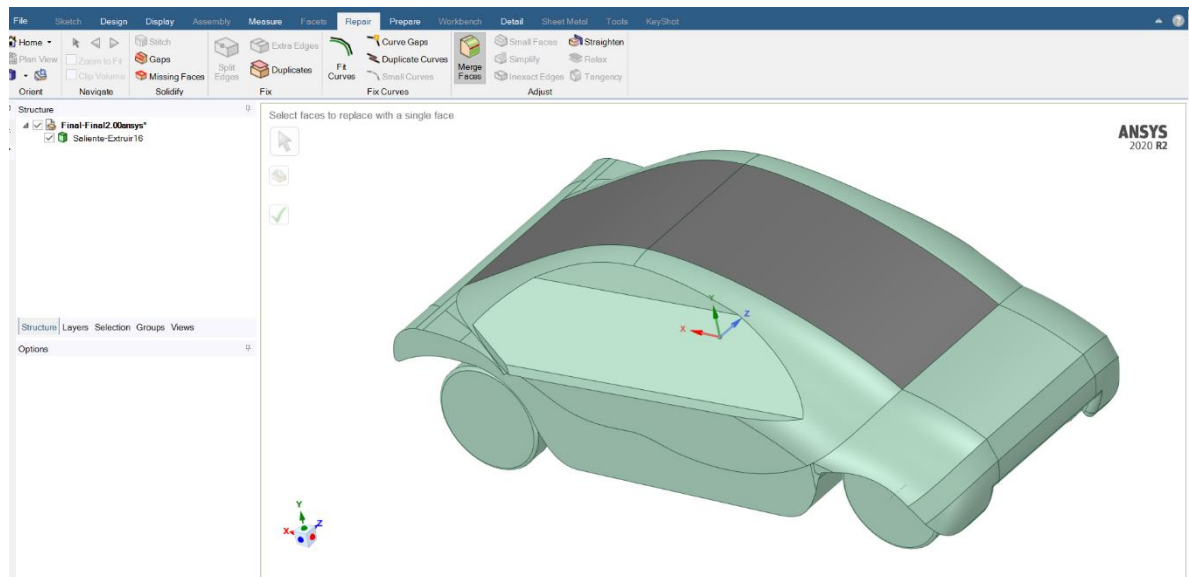
La **etapa A** consiste en la importación de la geometría del modelo desde SolidWorks y través de la extensión (.step) donde se realiza la preparación de la superficie para la simulación. A continuación, se lleva a cabo la **etapa B** que consiste en la configuración de los parámetros de mallado y definición de fronteras. Finalmente se

realiza el “Setup”, las condiciones de frontera y ejecución de la simulación en la **etapa C** para obtener los diferentes resultados. En paralelo a la última etapa se lleva a cabo una parametrización del tamaño y número de los elementos y fuerza en X para poder realizar entonces un análisis de malla.

Preparación de las superficies (simplificación).

La preparación de las superficies de la geometría consiste en realizar una simplificación de las áreas del modelo de manera que el número total de superficies disminuya permitiendo al programa realizar la implementación del mallado de forma más sencilla con polígonos regulares.

Figura 80. Geometría del modelo sin simplificar



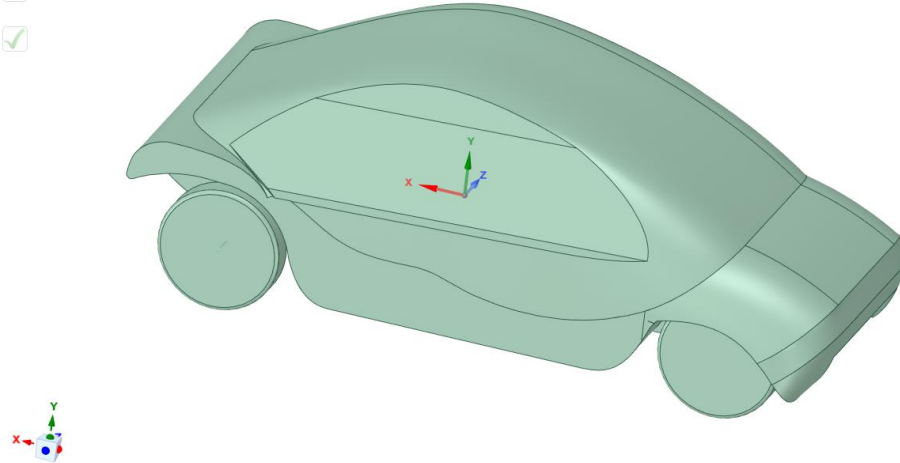
Como se observa en la anterior imagen el modelo presenta distintas superficies que a la hora de crear la malla genera problemas para la correcta implementación de la misma. Mientras que la imagen que se adjunta a continuación (Ver figura 81) evidencia un modelo con áreas más simplificadas facilitando la continuación del proceso de simulación.

Figura 81. Geometría simplificada

Select faces to replace with a single face



ANSYS
2020 R2

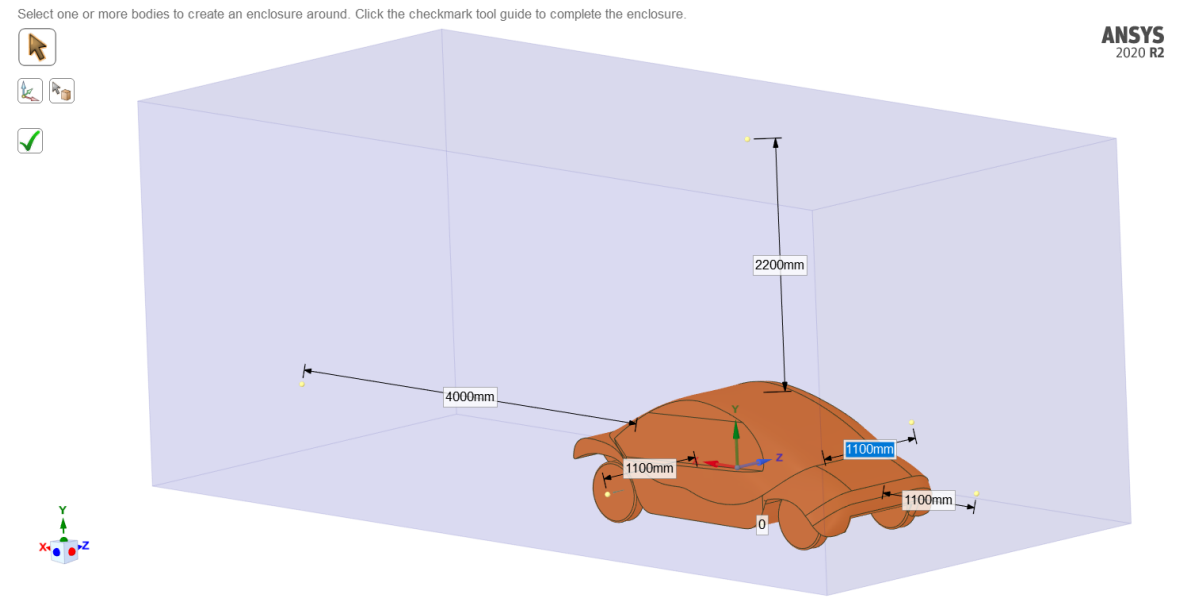


Definición del dominio.

El siguiente paso es definir el dominio de simulación, es decir, el espacio que representa el túnel de viento, dentro de este se desarrollan todos los fenómenos físicos relacionados con la aerodinámica del vehículo (Lift, Downforce, vortex, drag, entre otros).

En ese sentido, el dominio se estipuló de tal forma que se respetara el espacio suficiente para estudiar de manera clara todas las interacciones (fluido -sólido) que ocurren en la cercanía del vehículo.

Figura 82. Dominio establecido para la simulación



Definición de fronteras.

Ahora bien, antes de generar el mallado es importante definir las fronteras de contorno, las cuales serán de gran ayuda a la hora de refinar áreas importantes y tener un mejor control de estas en el apartado de “Setup” y ejecución del análisis.

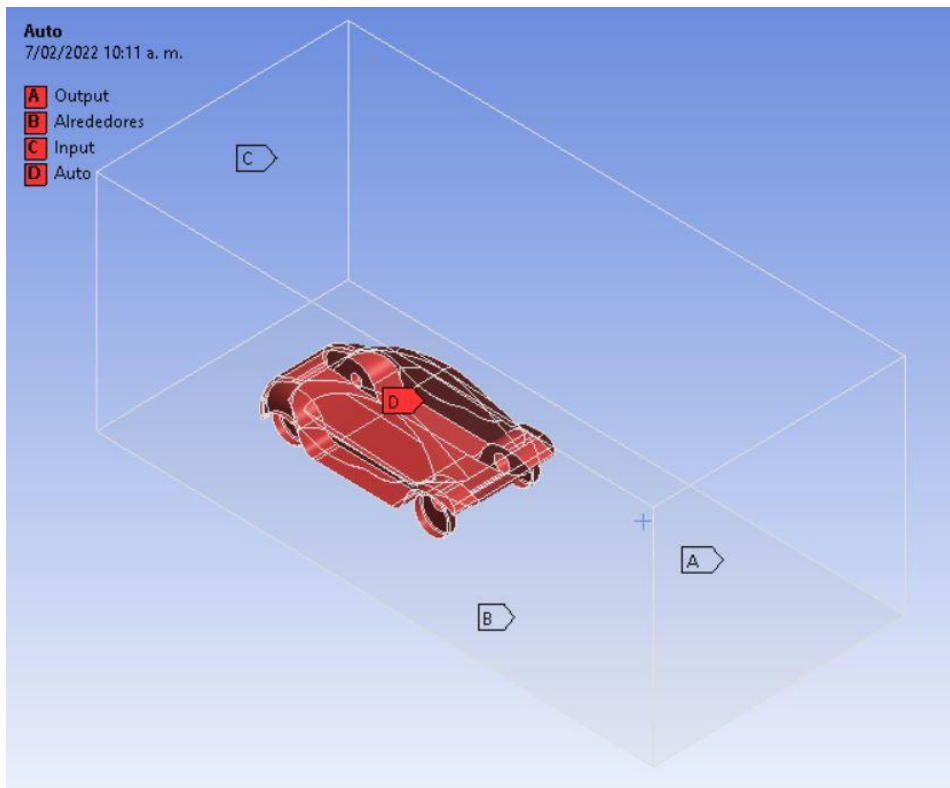
Fronteras:

Tabla 11. Definición de fronteras

| Indicativo | Superficie | Descripción |
|------------|-----------------|---|
| A | Output (Salida) | Representa lo que sucede en la salida del aire luego de interactuar con el vehículo. |
| B | Alrededores | Representa las condiciones de contorno a los lados del automóvil. |
| C | Input (Entrada) | Representa lo que sucede en la entrada del aire antes y en el momento de chocar contra la superficie de la carrocería del vehículo. |

| Indicativo | Superficie | Descripción |
|------------|------------|---|
| D | Auto | Es la condición que muestra la superficie del vehículo como una pared en la que se llevó a cabo el análisis aerodinámico. |

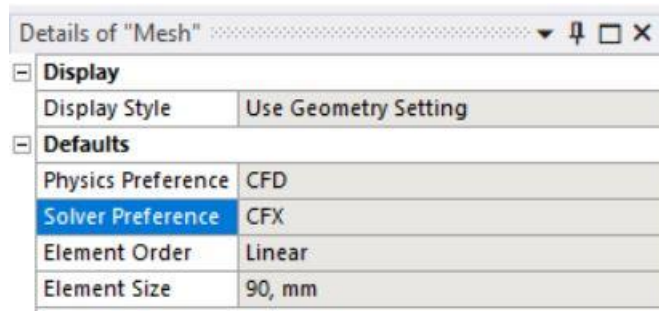
Figura 83. Visualización de fronteras del automóvil



Tipo de malla, tipo de solver, generación de malla.

Para generar el mallado se debe tener en cuenta qué tipo de análisis se va a realizar (CFD, FEA, entre otros); en este caso se realizó un análisis CFD. La Suite de Ansys cuenta con dos componentes principales para realizar este tipo de análisis (CFX & Fluent). Por lo tanto, para facilidad del usuario, a la hora de realizar el estudio se seleccionó el solver CFX ya que su interfaz es más amigable y los recursos computacionales van más acordes al tipo de investigación.

Figura 84. Detalles de la malla de simulación



Por otro lado, el tamaño de los elementos representa el nivel de detalle con el que se desea contar a la hora de realizar la simulación, en ese sentido, entre más pequeño sean los elementos, se obtendrá un valor más aproximado al exacto en la solución. Para este caso se parametriza esta variable o el número de elementos que pueda poseer la malla.

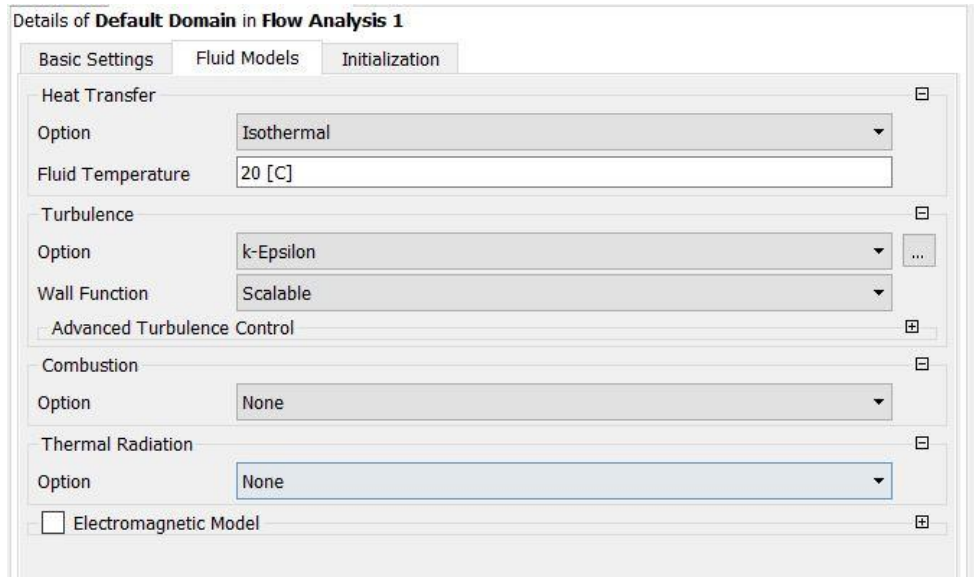
Configuración de la simulación (modelo de turbulencia, condiciones de contorno, criterios y control de convergencia).

- **Modelo de turbulencia:**

Se selecciona el modelo K-épsilon ya que este permite simular el comportamiento de los vórtices que se pueden generar por el paso del aire sobre la geometría de la superficie diseñada sin implicar mayores recursos computacionales, además, como se observó en el marco teórico y descripción del modelo con sus ecuaciones es el más adecuado dentro de los estudiados.

A su vez, en este apartado se selecciona en el ambiente de simulación, las líneas isoterma de manera que la temperatura del fluido sea de 20°C acorde con los parámetros atmosféricos establecidos en la tabla 6 de la sección (Parámetros de simulación) para el desarrollo del análisis.

Figura 85. Detalles para la simulación



- **Condiciones de contorno:**

En el “**Input**” se estipula la velocidad, el tipo de fluido y la turbulencia inicial con la que entra el aire al dominio. La superficie de salida “**Output**” como la de “**Alrededores**” son superficies que estarán a la misma presión atmosférica.

Por otra parte, el auto (“**Wall**”) se configura como “**Free slip**” ya que en este análisis realizado no se tuvo en cuenta la rugosidad de la superficie para efectos de simplificación del estudio.

Figura 86. Condiciones de contorno

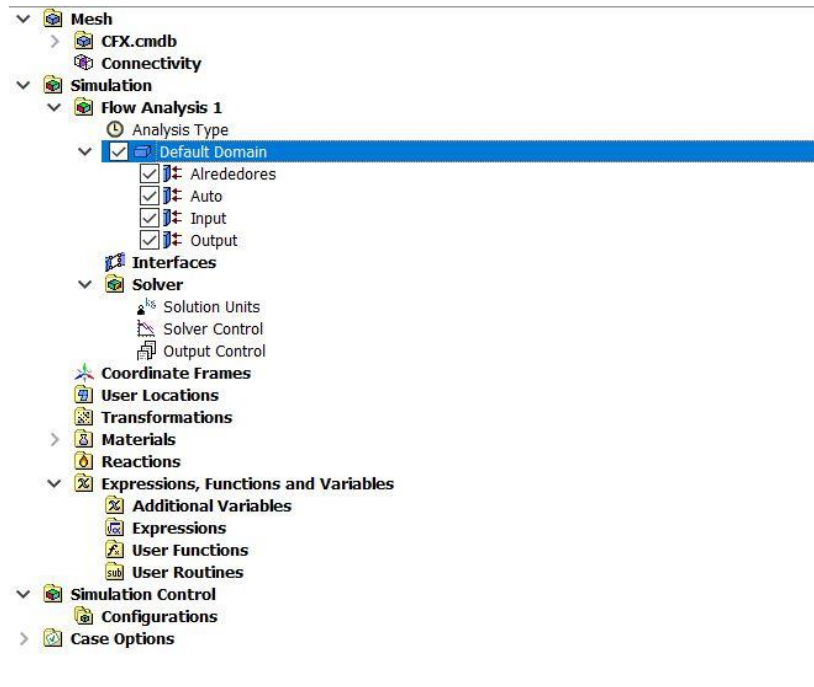
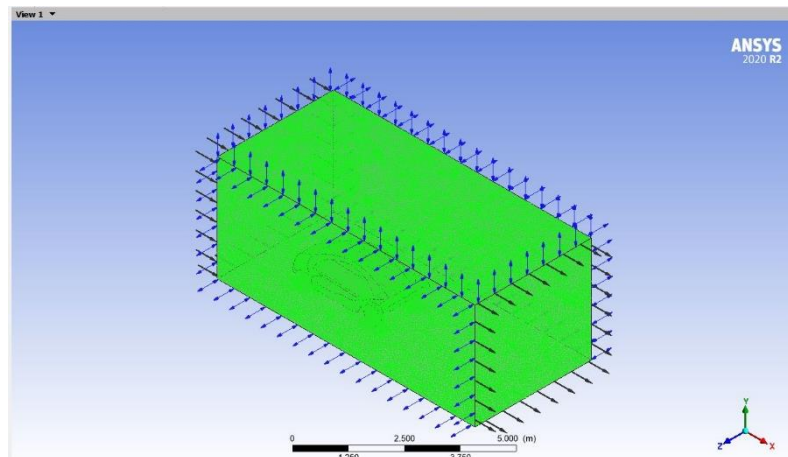


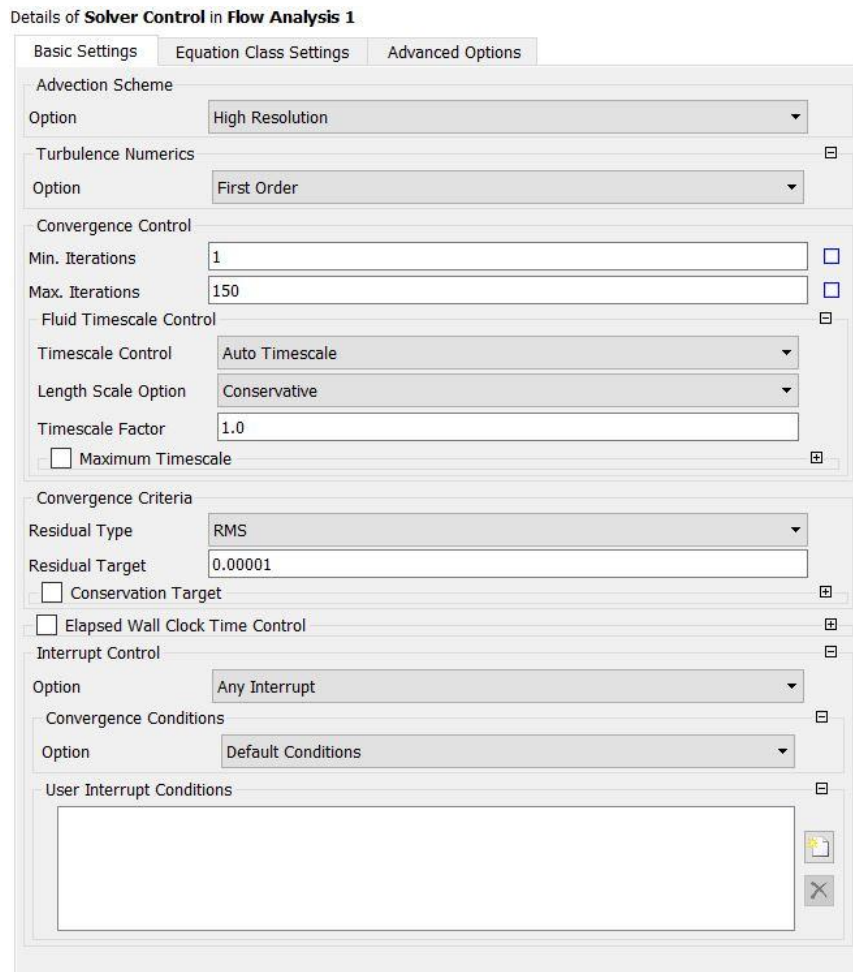
Figura 87. Visualización de la zona de estudio



- **Control de convergencia:**

En este control se estipula (el residuo), es decir, la media cuadrática (RMS) de convergencia para cada uno de los momentos y la masa. Esto permite controlar la precisión del proceso de iteración siendo así más exacto con la respuesta.

Figura 88. Detalles del control del solver



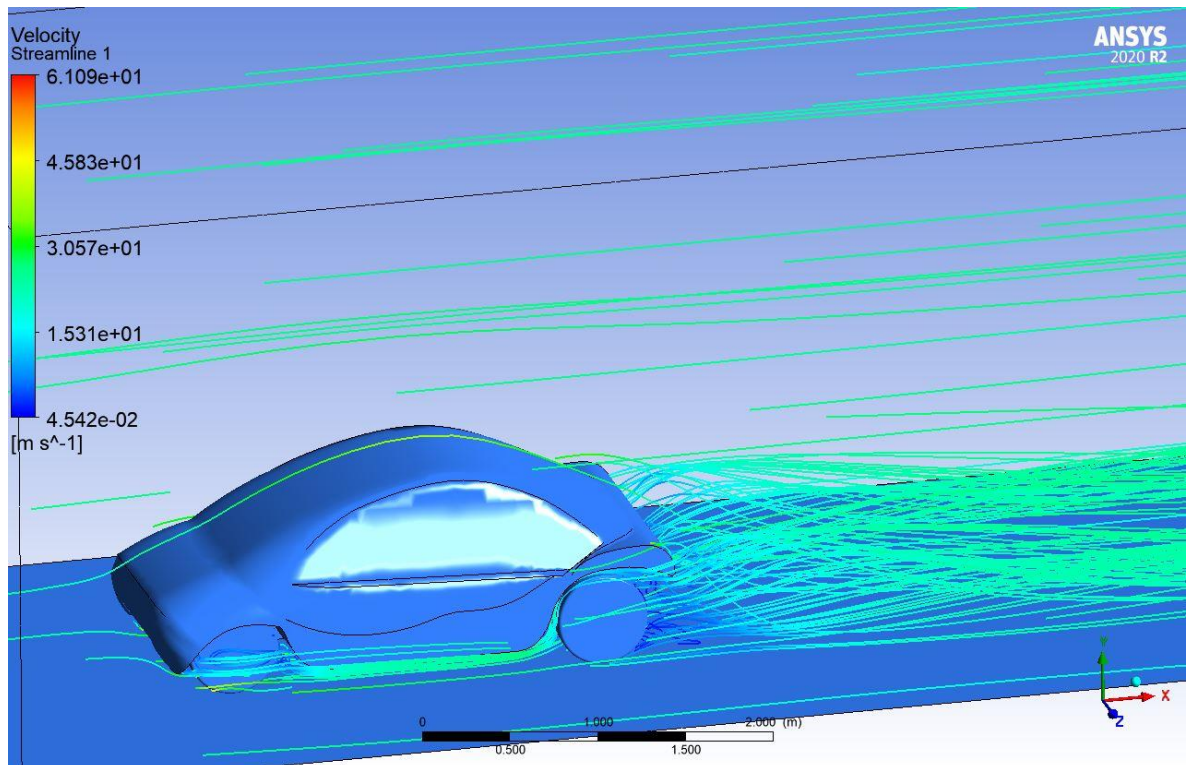
ETAPA DE PROCESAMIENTO

Ejecución de análisis.

Se lleva a cabo la ejecución del análisis teniendo en cuenta todos los criterios previamente descritos en el anexo B “ETAPA DE PREPROCESAMIENTO”. Es importante recalcar que los recursos computacionales necesarios para la realización de un análisis como el descrito es bastante elevado por lo que es recomendable que el equipo en el que se realice el análisis cuente con maquinaria en términos de hardware suficiente para soportar la carga de simulación.

ETAPA DE POST- PROCESAMIENTO

Figura 89. Líneas de velocidad sobre la carrocería



OBTENCIÓN DE RESULTADOS DE VARIABLES SIGNIFICATIVAS.

Datos malla sin refinamiento.

Tabla 12. Datos para la gráfica del mallado sin refinamiento

| MALLA SIN REFINAMIENTO | |
|---------------------------------|-------------------------|
| Número de elementos [NE] | Fuerza en X [Fx] |
| 428945 | 266.616 |
| 483433 | 261.412 |
| 831340 | 255.427 |
| 1139625 | 252.667 |
| 1622207 | 245.691 |
| 2417425 | 243.390 |
| 4977602 | 243.661 |
| 9074871 | 245.430 |
| 19273250 | 242.004 |
| 21010392 | 242.404 |
| 22976587 | 243.358 |
| 25199967 | 243.608 |
| 27723929 | 242.927 |
| 30586761 | 244.025 |
| 33841179 | 244.810 |
| 37599630 | 244.987 |

Datos malla con refinamiento.

Tabla 13. Datos para la gráfica del mallado con refinamiento

| MALLA CON REFINAMIENTO | | | |
|---------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------|
| Número de elementos [NE] | Tamaño de malla [mm] | Fuerza obtenida [N] | Promedio |
| 19500898 | 20 | 232,87 | 232,547421 |
| 11343647 | 25 | 232,606 | 232,547421 |
| 5729840 | 35 | 231,606 | 232,547421 |

| MALLA CON REFINAMIENTO | | | |
|---------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------|
| Número de elementos [NE] | Tamaño de malla [mm] | Fuerza obtenida [N] | Promedio |
| 3168869 | 50 | 230,524 | 232,547421 |
| 2808199 | 55 | 228,839 | 232,547421 |
| 2554327 | 60 | 228,925 | 232,547421 |
| 2365138 | 65 | 230,68 | 232,547421 |
| 2312243 | 70 | 229,996 | 232,547421 |
| 2191810 | 75 | 231,561 | 232,547421 |
| 1952026 | 90 | 229,844 | 232,547421 |
| 1665704 | 150 | 233,446 | 232,547421 |
| 1613162 | 200 | 233,589 | 232,547421 |
| 1586693 | 250 | 233,395 | 232,547421 |
| 1574995 | 300 | 233,736 | 232,547421 |
| 1567084 | 350 | 233,315 | 232,547421 |
| 1562290 | 400 | 235,174 | 232,547421 |
| 1557617 | 450 | 233,819 | 232,547421 |
| 1440530 | 500 | 234,125 | 232,547421 |
| 1291594 | 550 | 234,086 | 232,547421 |

Datos curva P-Vel.

Tabla 14. Datos para la gráfica de Potencia Vs Velocidad

| Potencia [Hp] | Velocidad [Km/h] |
|----------------------|-------------------------|
| 0,000 | 0 |
| 0,001 | 5 |
| 0,010 | 10 |
| 0,032 | 15 |
| 0,077 | 20 |
| 0,150 | 25 |
| 0,259 | 30 |
| 0,411 | 35 |
| 0,613 | 40 |

| Potencia [Hp] | Velocidad [Km/h] |
|--------------------------|-----------------------------|
| 0,873 | 45 |
| 1,197 | 50 |
| 1,593 | 55 |
| 2,068 | 60 |
| 2,630 | 65 |
| 3,284 | 70 |
| 4,040 | 75 |
| 4,903 | 80 |
| 5,881 | 85 |
| 6,981 | 90 |
| 8,210 | 95 |
| 9,576 | 100 |
| 11,085 | 105 |
| 12,745 | 110 |
| 14,563 | 115 |
| 16,547 | 120 |
| 18,702 | 125 |
| 21,038 | 130 |
| 23,560 | 135 |
| 26,275 | 140 |
| 29,192 | 145 |
| 32,318 | 150 |
| 35,658 | 155 |
| 39,222 | 160 |

Fuerza en Z.

Figura 90. Gráfica de la variación de la fuerza en Z vs la Velocidad

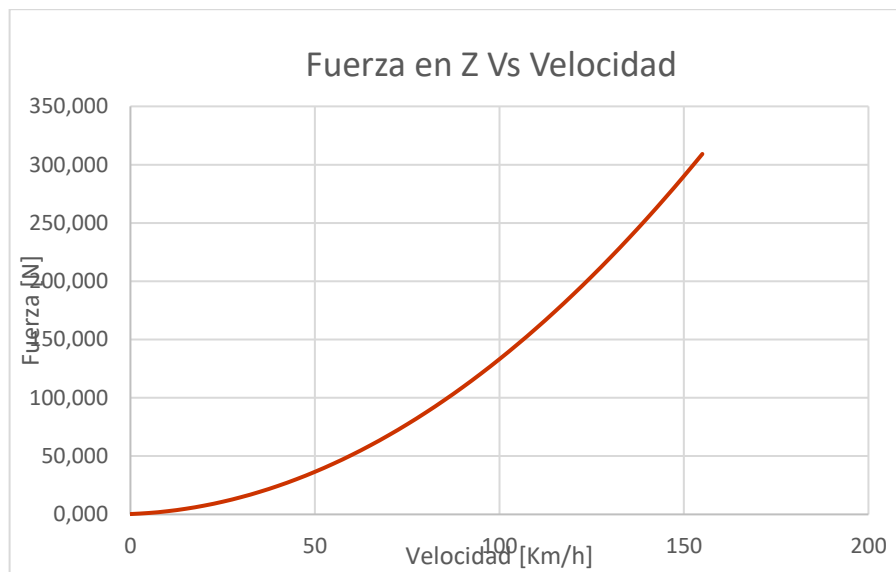


Tabla 15. Datos para la gráfica de fuerza en z

| F [N] | V [Km/h] |
|--------------|-----------------|
| 0,302 | 0 |
| 1,208 | 5 |
| 2,717 | 10 |
| 4,831 | 15 |
| 7,548 | 20 |
| 10,870 | 25 |
| 14,795 | 30 |
| 19,324 | 35 |
| 24,457 | 40 |
| 30,194 | 45 |
| 36,535 | 50 |
| 43,479 | 55 |
| 51,028 | 60 |
| 59,180 | 65 |
| 67,936 | 70 |
| 77,296 | 75 |
| 87,2603 | 80 |
| 97,8282 | 85 |
| 109,000 | 90 |

| F [N] | V [Km/h] |
|--------------|-----------------|
| 120,776 | 95 |
| 133,155 | 100 |
| 146,138 | 105 |
| 159,726 | 110 |
| 173,917 | 115 |
| 188,712 | 120 |
| 204,111 | 125 |
| 220,113 | 130 |
| 236,720 | 135 |
| 253,931 | 140 |
| 271,745 | 145 |
| 290,163 | 150 |
| 309,1853 | 155 |
| 0,000 | 160 |