UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

"ANÁLISIS AERODINÁMICO DE UN VEHÍCULO LIVIANO CON EL USO DE ACCESORIOS PORTAEQUIPAJES EN EL TECHO MEDIANTE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES"

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

Línea de investigación: Producción industrial y tecnología sostenible

AUTOR:

Torres Moreno Christian Alexander

DIRECTOR:

Ing. Jorge Luis Melo Obando, MSc.

Ibarra – Ecuador 2026

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

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

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

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

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Torres Moreno Christian Alexander

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	"Análisis aerodinámico de un vehículo liviano con el uso de accesorios portaequipajes en el techo mediante dinámica de fluidos computacionales"
AUTOR:	Torres Moreno Christian Alexander
FECHA:	29-06-2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	■ **PREGRADO** □ **POSGRADO**
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	**INGENIERO AUTOMOTRIZ**
DIRECTOR /ASESOR:	Ing. Jorge Luis Melo Obando, MSc. Ing. Ignacio Bayardo Benavides Cevallos, MSc.

2. CONSTANCIAS

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

Ibarra, a los 29 días del mes de junio de 2026

EL AUTOR: Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
CHRISTIAN ALEXANDER
TORRES MORENO

……

Torres Moreno Christian Alexander

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 29 de junio de 2026

Ing. Jorge Luis Melo Obando, MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

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



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
JORGE LUIS MELO OBANDO

(f) ……

Ing. Jorge Luis Melo Obando MSc

C.C.: 1718346529

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular **"Análisis aerodinámico de un vehículo liviano con el uso de accesorios portaequipajes en el techo mediante dinámica de fluidos computacionales"** previo a la obtención del título de Ingeniero Automotriz aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
JORGE LUIS MELO OBANDO

(f):…….

Ing. Jorge Luis Melo Obando MSc.

C.C.:1718346529

(f):…… Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
IGNACIO BAYARDO BENAVIDES CEVALLOS ……

Ing. Ignacio Bayardo Benavides Cevallos MSc.

C.C.: 1002415949

DEDICATORIA

Este trabajo de grado, está primero dedicado a Dios, por ser mi guía en este proceso de formación académica, brindándome fortaleza, sabiduría y perseverancia para superar cada obstáculo y alcanzar esta importante meta.

A mis padres William Torres y Verónica Moreno, quienes me han brindado apoyo incondicional a lo largo de esta carrera universitaria. Gracias a su esfuerzo, sacrificio, consejos y confianza en mí, he podido superar cada dificultad y alcanzar esta importante meta profesional. Su amor y motivación han sido fundamentales para seguir adelante y nunca rendirme.

A mi familia, por su apoyo incondicional, por acompañarme en los momentos de dificultad y por recordarme constantemente que nunca estuve solo. Gracias por estar presentes en cada etapa de mi formación académica, siendo un pilar fundamental para alcanzar este logro.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento al Ingeniero Jorge Luis Melo MSc. por su compresión y orientación durante el desarrollo de este trabajo de titulación. Sus conocimientos, consejos y dedicación fueron fundamentales para culminar con éxito este proceso académico.

A la Universidad Técnica Del Norte, especialmente a la Facultad de Ingeniería en Ciencias aplicadas y a la carrera de Ingeniería Automotriz, que me abrieron sus puertas y me brindaron la oportunidad de formarme académica y profesionalmente, permitiéndome adquirir conocimientos, experiencias y valores fundamentales para mi desarrollo profesional.

Finalmente, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mi familia por su apoyo incondicional, comprensión y confianza a lo largo de este proceso académico. Su compañía, aliento y respaldo fueron fundamentales para superar cada desafío y mantener la motivación durante los momentos de mayor dificultad. Gracias por creer en mí y acompañarme en cada paso; este logro también les pertenece, pues no habría sido posible sin ustedes.

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar cómo influye aerodinámicamente la incorporación de un rack de techo y una carga transportada sobre la carrocería de un vehículo Chevrolet Vitara clásico, apoyados mediante herramientas de ingeniería asistida por computadora para este caso dinámica de fluidos computacional (CFD) y software CAD.

Como punto de partida, se realizó el escaneo 3D de la carrocería utilizando el escáner 3D Einstar de Shining, obteniéndose una nube de puntos precisa de la geometría del vehículo. Posteriormente, en base al escaneo se desarrolló el modelado CAD de la carrocería, del rack de techo y de la carga a transportar mediante elementos de superficie y elementos sólidos, permitiendo la generación de los modelos necesarios para el análisis numérico. Adicionalmente, se diseñó el túnel de viento virtual y se extrajo el volumen de control requerido para la simulación aerodinámica.

Las simulaciones CFD fueron ejecutadas en ANSYS Student, verificando previamente la calidad de la malla superficial y volumétrica mediante los criterios de Skewness y Orthogonal Quality, con el fin de garantizar la confiabilidad de los resultados. Para todos los casos de estudio se establecieron como principales condiciones de borde una velocidad de entrada de aire de 25 m/s y una densidad del aire de 0,948 kg/m³, valor determinado considerando las condiciones atmosféricas de la ciudad de Ibarra.

Se analizaron tres configuraciones: la carrocería original, la carrocería equipada con rack de techo y la carrocería equipada con rack de techo y carga. En cada caso se determinaron la fuerza de arrastre, fuerza de sustentación, coeficiente de arrastre y coeficiente de sustentación. Los

resultados evidenciaron un incremento progresivo de estos parámetros aerodinámicos al incorporar los elementos externos sobre el techo del vehículo, generando una mayor resistencia al avance. De igual manera, el cálculo de la potencia requerida para vencer la fuerza de arrastre mostró un aumento conforme se añadieron el rack y la carga. Complementariamente, se evaluó la distribución del flujo de aire alrededor de las diferentes configuraciones, identificando alteraciones en los patrones de flujo y regiones de mayor perturbación aerodinámica asociadas a la presencia de los accesorios externos.

Se concluye que la instalación de un rack de techo y la incorporación de carga generan un impacto negativo sobre el desempeño aerodinámico del vehículo, incrementando las fuerzas aerodinámicas y la potencia requerida para su desplazamiento, aspectos que pueden repercutir en el consumo energético y la eficiencia operacional del automóvil.

Palabras clave: aerodinámica vehicular, CFD, ANSYS, escaneo 3D, Chevrolet Vitara, rack de techo, fuerza de arrastre, coeficiente de arrastre, túnel de viento virtual.

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the aerodynamic influence of installing a roof rack and transporting cargo on the body of a classic Chevrolet Vitara vehicle, supported by Computer-Aided Engineering (CAE) tools, specifically Computational Fluid Dynamics (CFD) and CAD software.

As a starting point, the vehicle body was digitized through 3D scanning using a Shining 3D Einstar scanner, obtaining an accurate point cloud representation of the vehicle geometry. Subsequently, based on the scanned data, CAD models of the vehicle body, roof rack, and transported cargo were developed using surface and solid modeling techniques, enabling the generation of the numerical models required for aerodynamic analysis. Additionally, a virtual wind tunnel was designed, and the corresponding control volume was extracted for CFD simulations.

The CFD simulations were performed using ANSYS Student. Prior to the analyses, the quality of both surface and volume meshes was verified through Skewness and Orthogonal Quality criteria to ensure the reliability of the results. For all study cases, the main boundary conditions were established as an inlet air velocity of 25 m/s and an air density of 0.948 kg/m³, determined according to the atmospheric conditions of the city of Ibarra.

Three configurations were analyzed: the original vehicle body, the vehicle body equipped with a roof rack, and the vehicle body equipped with both a roof rack and cargo. For each configuration, the drag force, lift force, drag coefficient, and lift coefficient were determined. The results revealed a progressive increase in these aerodynamic parameters as external components were added to the

vehicle roof, resulting in greater aerodynamic resistance. Likewise, the calculation of the power required to overcome the drag force showed an increase with the addition of the roof rack and cargo. Furthermore, the airflow distribution around the different configurations was evaluated, identifying alterations in flow patterns and regions of increased aerodynamic disturbance associated with the presence of external accessories.

It is concluded that the installation of a roof rack and the addition of cargo have a negative impact on the aerodynamic performance of the vehicle, increasing aerodynamic forces and the power required for vehicle propulsion, factors that may adversely affect energy consumption and overall operational efficiency.

Keywords: vehicle aerodynamics, CFD, ANSYS, 3D scanning, Chevrolet Vitara, roof rack, drag force, drag coefficient, virtual wind tunnel.

LISTA DE SIGLAS

CAD. Diseño asistido por computadora.

CFD. Dinámica de fluidos computacional.

FEM. Método de elementos finitos.

FEA. Análisis por elementos finitos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN 24

1.1. Tema 24

1.2. Problema de investigación. 24

1.3. Objetivos 25

1.3.1. Objetivo general 25

1.3.2. Objetivos específicos 25

1.4. Formulación del problema de investigación. 26

1.5. Justificación 26

2. CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO 28

2.1. Fundamentos de aerodinámica 28

2.1.1. Fuerza 28

2.1.2. Presión 28

2.1.3. Ecuaciones fundamentales 29

2.1.4. Viscosidad 32

2.1.5. Flujo laminar y turbulento 33

2.1.6. Concepto de capa límite 34

2.2. Aerodinámica vehicular 35
2.2.1. Coeficientes aerodinámicos 37
2.2.2. Resistencia al avance o fuerza de arrastre 37
2.2.3. Fuerza de sustentación 38
2.2.4. Potencia y resistencia 39
2.3. Dinámica computacional de fluidos (CFD) 40
2.3.1. Métodos CFD. 40
2.3.2. Análisis CFD en el campo automotriz 41
2.4. Etapas de una simulación FEM. 42
2.4.1. Preprocesamiento. 42
2.4.2. Procesamiento. 43
2.4.3. Postprocesamiento. 43
2.4.4. Dominio computacional. 43
2.4.5. Calidad malla. 45
2.5. Tipos de mallas. 48
2.5.1. Mallas estructuradas: 48
2.5.2. Malla no estructurada: 49
2.5.3. Malla híbrida: 49
2.5.4. Malla Tetraédrica. 50

2.5.5. Malla Hexcore 51
2.5.6. Malla Poliédrica 52
2.5.7. Malla Poly Hexcore 53
2.6. Accesorios portaequipaje para vehículos 53
2.6.1. Tipos de portaequipajes 53
2.6.2. Complementos para portaequipajes 55
2.6.3. Aerodinámica del portaequipaje 56
2.7. Materiales de fabricación 59
2.8. Procesos de manufactura 59
3. CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS 62
3.1. Materiales 62
3.1.1. Características generales del vehículo 63
3.1.2. Características dimensionales del vehículo 63
3.2. Método 64
3.3. Escaneo 3D 66
3.4. Diseño 3d De Carrocería Modelo D0 71
3.5. Modelado 3d Rack de Techo para Vitara 73
3.6. Ensamble Carrocería Vitara y Rack de Techo (D1) 75
3.7. Modelado 3D del túnel de viento y extracción de volumen D0 75

3.8. Modelado 3D del túnel de viento y extracción de volumen para los modelos D1 y D2 77

3.9. Simulación CAE 79

3.9.1. Definición De Parámetros De Diseño, Requerimientos Generales 79

3.9.2. Importación de la geometría 79

3.9.3. Asignación de entrada, salida y pared 81

3.9.4. Mallado 81

3.9.5. Condiciones de Borde para análisis CFD 83

4. CAPITULO IV RESULTADOS Y ANÁLISIS 92

4.1. Calidad de Malla Superficial para el Modelo D0 92

4.2. Calidad de Malla Volumétrica para el Modelo D0 94

4.3. Calidad de Malla Superficial para el Modelo D1 95

4.4. Calidad de Malla Volumétrica para el Modelo D1 96

4.5. Calidad de Malla Superficial para el Modelo D2 97

4.6. Calidad de Malla Volumétrica para el Modelo D2 97

4.7. Resultados de las fuerzas aerodinámicas 98

4.7.1. Fuerza de arrastre Modelo D0 99

4.7.2. Coeficiente de arrastre Modelo D0 100

4.7.3. Fuerza de Sustentación Modelo D0 100

4.7.4. Coeficiente de Sustentación Modelo D0 101
4.7.5. Fuerza de arrastre Modelo D1 102
4.7.6. Coeficiente de arrastre Modelo D1 103
4.7.7. Fuerza de Sustentación Modelo D1 103
4.7.8. Coeficiente de Sustentación Modelo D1 104
4.7.9. Fuerza de arrastre Modelo D2 105
4.7.10. Coeficiente de arrastre Modelo D2 106
4.7.11. Fuerza de sustentación Modelo D2 106
4.7.12. Coeficiente de sustentación Modelo D2 107
4.7.13. Zonas de Distribución de Presión Modelo D0 108
4.7.14. Zonas de Distribución de Presión Modelo D1 108
4.7.15. Zonas de Distribución de Presión Modelo D2 109
4.7.16. Zonas de Distribución de flujo de aire Modelo D0 110
4.7.17. Zonas de Distribución de flujo de aire Modelo D1 110
4.7.18. Zonas de Distribución de flujo de aire Modelo D2 111
4.8. Resultados de la Calidad de Malla 112
4.9. Resultados de las fuerzas aerodinámicas 112
4.10. Potencia y torque necesario para vencer la fuerza de arrastre 114
4.10.1. Potencia necesaria para modelo D0 115

4.10.2. Potencia necesaria para modelo D1 116

4.10.3. Potencia necesaria para modelo D2 116

4.10.4. Torque necesario para el Modelo D0 117

4.10.5. Torque necesario para el modelo D1 118

4.10.6. Torque necesario para el modelo D2 118

5. CAPITULO V 119

5.1. Conclusiones 119

5.2. Recomendaciones 120

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 122

7. Anexos 127

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características escáner 3D 66

Tabla 2. Medidas del dominio computacional para el modelo D0 77

Tabla 3. Medidas del dominio computacional para los modelos D1 y D2 78

Tabla 4. Resultados de calidad de malla superficial y volumétrica 112

Tabla 5. Resultados aerodinámicos de cada modelo..... 113

Tabla 6. Área frontal de cada modelo 115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Capa límite sobre una placa plana 35

Figura 2. Resistencias fluidodinámicas de presión y ficción según la forma del cuerpo. 36

Figura 3. Coeficientes de resistencia para diferentes formas. 37

Figura 4. Dimensiones para dominio computacional..... 44

Figura 5. Ratio de aspecto. 45

Figura 6. Oblicuidad. 46

Figura 7. Criterios de calidad de malla. 47

Figura 8. Distorsión de la malla. 47

Figura 9. Malla estructurada. 48

Figura 10. Malla no estructurada. 49

Figura 11. Malla híbrida..... 50

Figura 12. Malla Tetraédrica. 51

Figura 13. Malla hexcore. 52

Figura 14. Malla poliédrica. 52

Figura 15. Malla Poly hexcore. 53

Figura 16. Modelos de barras de techo: a) Plataforma Pionera, b) Doble barra, c) Jaula abierta con deflector de viento. 54

Figura 17. Barras de techo cargada. 55

Figura 18. Elementos aerodinámicos que generan vórtices. 57

Figura 19. Efecto de las barras de techo en el consumo de combustible. 58

Figura 20. Dimensiones del vehículo Vitara Clásico. 64

Figura 21. Proceso metodológico..... 65

Figura 22. Ubicación de marcadores para escaneo. 67

Figura 23. Configuración inicial para escaneo..... 68

Figura 24. Configuración durante el escaneo. 68

Figura 25. Escaneo de lateral derecho de carrocería..... 69

Figura 26. Escaneo de capot y parte frontal de carrocería. 69

Figura 27. Escaneo de techo y parte posterior de carrocería. 70

Figura 28. Unión de partes para obtención de carrocería. 70

Figura 29. Carrocería para exportar en STL. 71

Figura 30. Importación de archivo escaneado en SolidWorks. 72

Figura 31. Modelado 3D de la carrocería en base al escaneo 3D. 72

Figura 32. Modelado 3D de vehículo con superficies para simulación. 73

Figura 33. Modelado 3D del Rack de Techo basado en el escaneo. 74

Figura 34. Modelado CAD del Rack de Techo..... 74

Figura 35. Ensamble Vitara con Rack de techo. 75

Figura 36. Modelado del túnel de viento con extracción de volumen D0. 76

Figura 37. Modelado del túnel de viento con extracción de volumen del modelo D1. ... 77

Figura 38. Modelado del túnel de viento con extracción de volumen del modelo D2. ... 78

Figura 39. Importación de la geometría a SpaceClaim Modelo D0..... 80

Figura 40. Importación de la geometría a SpaceClaim Modelo D2..... 80

Figura 41. Asignación de entradas y salidas de condiciones de borde en SpaceClaim. .. 81

Figura 42. Mallado del modelo D0 82

Figura 43. Mallado del modelo D1 82

Figura 44. Mallado del modelo D2 82

Figura 45. Condiciones generales de análisis 84

Figura 46. Selección del modelo de Viscosidad K-Omega 84

Figura 47. Ingreso de parámetros del aire 85

Figura 48. Configuración de velocidad de ingreso de aire e intensidad de turbulencia .. 86

Figura 49. Parámetros de presión como condición de salida 86

Figura 50. Área frontal del vehículo modelo D0 87

Figura 51. Valores de referencia dimensional del vehículo 88

Figura 52. Configuración para la obtención de la fuerza de arrastre 89

Figura 53. Selección del método de inicialización 90

Figura 54. Ejecución del estudio 91

Figura 55. Calidad de malla superficial de acuerdo a Skewness del modelo D0 93

Figura 56. Calidad de malla superficial de acuerdo al criterio de Orthogonal Quality del modelo D0 93

Figura 57. Calidad de malla volumétrica de acuerdo a Skewness del modelo D0 94

Figura 58. Calidad de malla volumétrica de acuerdo al criterio de Orthogonal Quality del modelo D0 94

Figura 59. Calidad de malla superficial de acuerdo a Skewness del modelo D1 95

Figura 60. Calidad de malla superficial de acuerdo al criterio de Orthogonal Quality del modelo D1 95

Figura 61. Calidad de malla volumétrica de acuerdo a Skewness del modelo D1 96

Figura 62. Calidad de malla volumétrica de acuerdo al criterio de Orthogonal Quality del modelo D1 96

Figura 63. Calidad de malla superficial de acuerdo a Skewness del modelo D2 97

Figura 64. Calidad de malla volumétrica de acuerdo al criterio de Orthogonal Quality del modelo D2 97

Figura 65. Calidad de malla volumétrica de acuerdo a Skewness del modelo D2 98

Figura 66. Calidad de malla volumétrica de acuerdo al criterio de Orthogonal Quality del modelo D2 98

Figura 67. Fuerza de Arrastre Modelo D0 99

Figura 68. Coeficiente de Arrastre Modelo D0 100

Figura 69. Fuerza de sustentación Modelo D0 100

Figura 70. Coeficiente de sustentación Modelo D0 101

Figura 71. Fuerza de Arrastre Modelo D1 102

Figura 72. Coeficiente de Arrastre Modelo D1 103

Figura 73. Fuerza de sustentación Modelo D1 103

Figura 74. Coeficiente de sustentación Modelo D1 104

Figura 75. Fuerza de Arrastre Modelo D2 105

Figura 76. Coeficiente de Arrastre Modelo D2 106

Figura 77. Fuerza de sustentación Modelo D2 106

Figura 78. Coeficiente de sustentación Modelo D2 107

Figura 79. Zona de distribución de presión Modelo D0 108

Figura 80. Zona de distribución de presión Modelo D1 108

Figura 81. Zona de distribución de presión Modelo D2 109

Figura 82. Vectores de flujo de velocidad en Modelo D0 110

Figura 83. Vectores de flujo de velocidad en Modelo D1 110

Figura 84. Vectores de flujo de velocidad en Modelo D2 111

1. CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Tema

Análisis aerodinámico de un vehículo liviano con el uso de accesorios portaequipajes en el techo mediante dinámica de fluidos computacionales.

1.2. Problema de investigación.

El análisis aerodinámico de vehículos livianos con accesorios portaequipaje en el techo es crucial para comprender cómo estos afectan el rendimiento y la eficiencia del vehículo. Sin embargo, la falta de un estudio detallado utilizando dinámica de fluidos computacional (CFD) limita la capacidad de los diseñadores y fabricantes para optimizar el diseño de estos accesorios y minimizar su impacto en la aerodinámica del vehículo. Por lo tanto, es necesario realizar un análisis exhaustivo utilizando CFD para evaluar cómo los accesorios portaequipaje afectan el flujo de aire alrededor del vehículo y, en última instancia, su rendimiento aerodinámico. Las principales causas del problema incluyen la interrupción del flujo de aire, creando turbulencias y zonas de presión negativa que incrementan la resistencia al avance. Además, los portaequipajes aumentan el área frontal efectiva, lo que incrementa la resistencia aerodinámica y, por ende, la cantidad de energía requerida para mantener la velocidad del vehículo. Por último, la modificación del coeficiente de arrastre (Cd) debido a los objetos en el techo incrementa la resistencia aerodinámica general del vehículo. Las alteraciones en la aerodinámica del vehículo tienen consecuencias negativas. El aumento en el consumo de combustible es una de ellas, ya que se requiere más energía para mantener la velocidad, lo que afecta la economía del conductor. Además, este mayor

consumo conlleva a un incremento en las emisiones contaminantes, contribuyendo al impacto ambiental. Por último, la resistencia adicional puede causar un desgaste prematuro en componentes mecánicos, lo que aumenta los costos de mantenimiento y reduce la vida útil del vehículo. Para abordar este problema, se sugiere emplear Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Esto implica simular el flujo de aire alrededor del vehículo, tanto con cómo sin portaequipaje, para comprender cómo estos accesorios afectan la aerodinámica.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Realizar el análisis aerodinámico de un vehículo liviano con el uso de accesorios portaequipaje en el techo mediante dinámica de fluidos computacional.

1.3.2. Objetivos específicos

- Obtener el modelo 3D de la carrocería de un vehículo liviano mediante herramientas CAD
- Diseñar el portaequipaje para un vehículo liviano usando software CAD
- Realizar simulaciones CFD para verificar el comportamiento aerodinámico del vehículo con y sin portaequipaje.
- Comparar las características aerodinámicas del vehículo con y sin portaequipajes a partir de los resultados obtenidos de las simulaciones computacionales.

1.4. Formulación del problema de investigación.

El presente proyecto se establece en función de los objetivos anteriormente planteados. En primer lugar, el alcance incluirá la creación de un modelo 3D preciso y detallado de la carrocería del vehículo empleando software de diseño asistido por computadora (CAD), con la garantía de que el modelo represente fielmente las dimensiones y características aerodinámicas del vehículo en cuestión. Además, se diseñará un portaequipaje específico para el vehículo liviano, asegurando su compatibilidad con la estructura del vehículo y su capacidad para contener carga útil. Este diseño se basará en las especificaciones y requisitos de carga del vehículo, así como en consideraciones aerodinámicas para minimizar la resistencia al avance. Posteriormente, se llevarán a cabo simulaciones computacionales utilizando dinámica de fluidos computacional (CFD) para evaluar el comportamiento aerodinámico del vehículo con y sin el portaequipaje instalado. Estas simulaciones proporcionarán información detallada sobre la distribución de presiones, la resistencia al avance y otros parámetros aerodinámicos. relevantes.

Finalmente, se analizarán y compararán los resultados obtenidos de las simulaciones CFD para identificar y evaluar los efectos del portaequipaje en la aerodinámica del vehículo. Se destacarán las diferencias en la resistencia al avance, la distribución de presiones y otros parámetros relevantes entre las configuraciones con y sin portaequipajes.

1.5. Justificación

El análisis aerodinámico de vehículos livianos con accesorios portaequipaje en el techo mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) es un tema de gran relevancia e interés en diversos ámbitos. La selección de este tema se fundamenta en su potencial para contribuir

significativamente en diferentes aspectos, en el ámbito académico, el presente estudio ofrecerá la oportunidad de avanzar tanto en el conocimiento y la compresión de la aerodinámica de los vehículos livianos, especialmente en relación con los accesorios del techo, se proporcionará una investigación sólida para futuras investigaciones en el campo de la ingeniería automotriz y la aerodinámica vehicular. Por otro lado en la perspectiva investigativa, se abrirá nuevas vías para la aplicación de la dinámica de fluidos computacional en el diseño y el análisis de los vehículos, ya que al centrarse en el impacto de los accesorios del portaequipaje en aerodinámica se avanzara en la comprensión de cómo estos afectan el rendimiento y la eficiencia de los vehículos , lo que puede influir a innovar el diseño y la creación de nuevos accesorios que sean más aerodinámicos y más factibles para el uso de los mismos. Además, económicamente, este estudio tiene el potencial de generar ahorros significativos para los conductores ya que se identificarán las configuraciones de los accesorios que minimizaran la resistencia aerodinámica y por lo tanto reducen el consumo de combustible. Esta investigación sobre el análisis aerodinámico de vehículos livianos con accesorios portaequipaje en el techo mediante dinámica de fluidos computacional no solo aportará nuevos conocimientos teóricos y prácticos a la ingeniería, sino que también tendrá un impacto significativo en los ámbitos académico, investigativo, social, económico, político y educativo. Su importancia radica en su capacidad para resolver problemas concretos relacionados con la eficiencia y el rendimiento de los vehículos, y en su potencial para beneficiar a una amplia gama de partes interesadas, desde conductores individuales hasta fabricantes y formuladores de políticas.

2. CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Fundamentos de aerodinámica

Para comprender el comportamiento del fluido y su aplicación en la aerodinámica vehicular es importante comprender algunos conceptos y fundamentos que se detallan en este apartado.

2.1.1. Fuerza

La fuerza es una cantidad vectorial que posee magnitud y dirección que puede aplicarse a un cuerpo en estado de reposo o en movimiento [1]. La fuerza puede incrementar o reducir la aceleración de un cuerpo y por ende alterar la velocidad, dirección o sentido del movimiento. Para determinarla se utiliza la expresión:

$$F = m.a$$

Donde:

m= masa (Kg)

F= fuerza (N)

A= aceleración (m/s^2)

2.1.2. Presión

El aire que se mueve sobre la superficie del vehículo crea áreas de presión en sus distintas paredes, en este sentido con el incremento de la velocidad, la presión aumenta, afectando la resistencia aerodinámica que se produce, así como también la forma del vehículo es crucial para

determinar si la presión aumenta o disminuye [2]. La fórmula para obtener la presión sobre el vehículo se determina de la siguiente manera:

$$P = \frac{F}{A}$$

Donde:

P= presión (Pa)

F= Fuerza (N)

A= área (m^2)

2.1.3. Ecuaciones fundamentales

Se puede determinar el movimiento y el estado de un fluido utilizando los principios fundamentales de continuidad, cantidad de movimiento y energía.

La ecuación de continuidad representa una ley de conservación de la materia y afirma que, si no existe materia nueva de entrada, ni materia que escapa, entonces la masa contenida en cualquier volumen debe permanecer constante [3]. La ecuación de continuidad se determina a continuación:

$$\rho A_1 v_1 \Delta t = \rho A_2 v_2 \Delta t$$

Donde:

A =Área (m^2)

ρ =densidad (kg/m^3)

v =velocidad (m/s)

Δt =Difrencial de tiempo (s)

El principio de conservación de cantidad de movimiento también conocido como la ecuación de Navier-Stokes, establece que la cantidad de movimiento de un fluido permanece constante a menos que actúen fuerzas externas sobre él, es decir la variación de la cantidad de movimiento corresponde a la sumatoria de las fuerzas aplicadas sobre el fluido [4]. Se expresa matemáticamente como:

$$\rho \frac{dv}{dt} = \left(\rho \frac{dv}{dt} + v * \nabla v\right) = \nabla \bar{\bar{\tau}} - \nabla p + \rho f$$

Donde:

t = tiempo

P = presión

∇v = gradiente de un espacio vectorial

v = velocidad

ρ = densidad

$\bar{\bar{\tau}}$ = tensor viscoso para fluidos newtonianos

f = fuerzas volumétricas que actúan sobre el volumen de fluido infinitesimal

El principio de Bernoulli describe el equilibrio de los fluidos y establece que, en un sistema fluido, existe una relación inversa entre la velocidad y la presión del fluido: cuando la velocidad

aumenta, la presión disminuye y viceversa. Esta interconexión entre velocidad y presión proporciona las pautas para entender el flujo y comportamiento de los fluidos en distintos contextos hidrodinámicos y por ende su aplicación en el ámbito automotriz [5]. La ecuación está definida por:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

Donde:

$P_1 =$ presión estática

$\frac{1}{2}\rho v_1^2 =$presión dinámica

$\rho =$densidad

$v =$velocidad

El principio de conservación de energía indica la cantidad de energía permanece constante en el tiempo que, en un sistema aislado, sin embargo, puede transformarse en otra forma de energía [6]. Se consideran tres formas de energía: la energía potencial debida a la elevación, la energía cinética asociada a la velocidad y la energía de flujo o presión resultante del trabajo necesario para transportar el fluido [7] y se expresa con la ecuación:

$$E_{TOTAL} = E_{POTENCIAL} + E_{PRESIÓN} + E_{CINÉTICA}$$

$$E_{TOTAL} = \rho g h + P\frac{\rho V}{2} + \rho V\frac{v^2}{2}$$

Donde:

P = presión estática

V = volumen (m^3)

2.1.4. Viscosidad

La viscosidad representa la fricción o adherencia que presenta un fluido por la atracción molecular característica de cada fluido, es decir es una medida de su resistencia a fluir [7].

La viscosidad depende de factores como la temperatura y la composición del fluido. La viscosidad dinámica depende directamente de la temperatura, en el caso de los líquidos

cuando la temperatura aumenta, la viscosidad dinámica decrece, mientras que, para los gases, aumenta mientras se incrementa la temperatura, por su parte la viscosidad cinemática está relacionada con la densidad, lo cual representa una medida de resistencia interna para fluir bajo el efecto de la gravedad [8].

La fórmula indica la relación entre la viscosidad dinámica y cinemática:

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

Donde:

v =vicosidad cinemática

μ =viscosidad dinámica

ρ =densidad

2.1.5. Flujo laminar y turbulento

Los fluidos pueden fluir en dos regímenes principales: laminar y turbulento. En el régimen laminar, el fluido se mueve en capas paralelas sin mezcla entre ellas, resultando en un flujo suave y ordenado. Este tipo de flujo ocurre a bajas velocidades y en fluidos con alta viscosidad. En contraste, el régimen turbulento se caracteriza por un movimiento caótico y desordenado, donde las partículas del fluido se mezclan intensamente y se presenta a velocidades elevadas y en fluidos con baja viscosidad. La transición entre estos dos regímenes se describe por el número de Reynolds que es un parámetro adimensional que relaciona las fuerzas inerciales y viscosas en el fluido [6], [9].

El número de Reynolds se calcula con la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu}$$

Donde:

$Re =$ número de Reynolds

$\rho =$ densidad del fluido (kg/m^3)

$v =$ velocidad del fluido (m/s)

$L =$ longitud del campo (m)

$\mu =$ viscosidad dinámica

El flujo se clasifica de la siguiente manera según el número de Reynolds [7]:

Flujo laminar: Cuando el número de Reynolds es bajo (Re < 2000), En este régimen, el fluido se mueve en capas paralelas y suaves, comportándose como una lámina delgada sin mezclarse entre sí.

Flujo transicional: Cuando el número de Reynolds está entre 2000 a 4000. En esta zona, el flujo puede oscilar entre laminar y turbulento y por tanto es un régimen incierto o de transición.

Flujo turbulento: Cuando el número de Reynolds es alto (Re > 4000). En este régimen, el fluido se caracteriza por un movimiento desordenado, no estacionario y tridimensional, con mezclas intensas de las partículas de fluido.

2.1.6. Concepto de capa límite

La capa límite hace referencia a la región de fluido que se encuentra inmediatamente adyacente a la superficie del vehículo, en la cual los efectos de la viscosidad son significativos, provocando que la velocidad del fluido cambie gradualmente desde cero en la superficie del vehículo hasta la velocidad del flujo libre en el borde exterior de la capa límite [9].

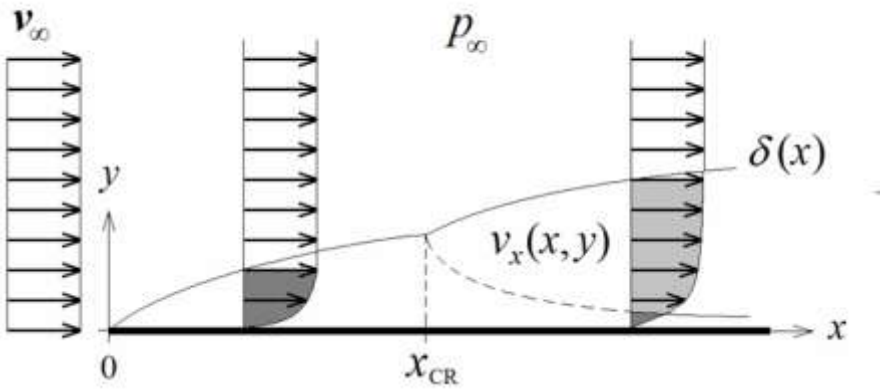
La capa límite puede ser de dos tipos:

Capa límite laminar: En esta región, el flujo de aire es suave y ordenado, con capas de aire deslizándose unas sobre otras.

Capa límite turbulenta: Aquí, el flujo es caótico y mezclado, lo que puede aumentar la fricción y la resistencia aerodinámica.

Capa límite sobre una placa plana

Figura 1. Capa límite sobre una placa plana



Tomado de: Heras Jiménez, 2012 [4]

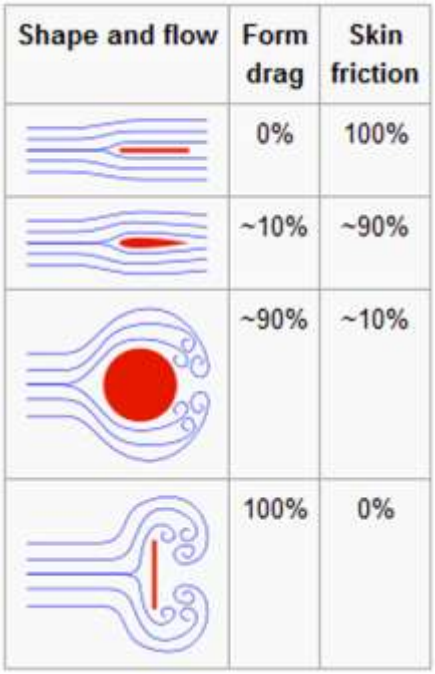
En la **Figura 1** se observa el comportamiento del fluido al tocar la superficie la velocidad es cero y conforme avanza su recorrido (eje x) la velocidad va aumentando y ensanchando la capa límite (eje y).

2.2. Aerodinámica vehicular

La incorporación de la aerodinámica en la industria automotriz ha provocado que se desarrolle nuevos diseños y formas de vehículos considerando el comportamiento del fluido alrededor de la carrocería, es decir lograr la menor resistencia al avance (también conocido como coeficiente de resistencia aerodinámica), lo cual contribuye a disminuir el consumo de combustible y mejorar el comportamiento dinámico del vehículo [2].

Un cuerpo en contacto con un fluido presenta dos tipos de resistencia fluidodinámica de presión y de fricción, que dependen básicamente de la forma del cuerpo en estudio.

Figura 2. Resistencias fluidodinámicas de presión y ficción según la forma del cuerpo.



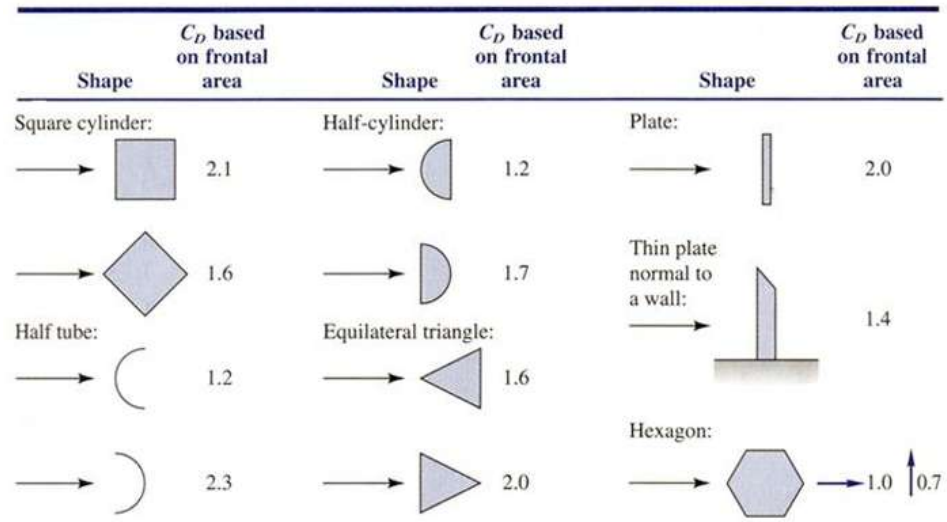
Tomado de: Gómez, 2017 [10]

La resistencia de fricción (skin friction) es más relevante en los cuerpos con poca superficie frontal como una placa palana alineada a la dirección del flujo, mientras que en superficies frontales más pronunciadas como una placa plana opuesta a la dirección del flujo se hace más relevante la resistencia de presión (form drag) como se observa en la **Figura 2**. La resistencia de presión en un vehículo se origina por la diferencia de presiones entre la zona delantera y la posterior, mientras que la resistencia de fricción se origina por el flujo de aire que rodea al sólido; por tanto, las resistencias fluidodinámicas en función de la dirección se descomponen en fuerzas de resistencia al avance (F_D) y de sustentación (F_L) [10].

2.2.1. Coeficientes aerodinámicos

En estudios aerodinámicos se utilizan coeficientes adimensionales que dependen de la forma del cuerpo y del número de Reynolds, y se los conoce como C_D coeficiente de resistencia al avance y C_L coeficiente de sustentación.

Figura 3. Coeficientes de resistencia para diferentes formas.



Tomado de: Gómez, 2017 [10]

En la **Figura 3** se observa valores de C_D para algunas formas de cuerpos y Reynolds mayores a 10000.

2.2.2. Resistencia al avance o fuerza de arrastre

La resistencia al avance corresponde a una fuerza opuesta al desplazamiento del vehículo con respecto al aire y que depende directamente el coeficiente de resistencia C_D por lo que a menor coeficiente requerirá menor potencia el vehículo para desarrollar su movimiento y por ende tendrá

un menor consumo de combustible [6], [9], [11]. La resistencia al avance o también conocida como fuerza de arrastre se define con la ecuación:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D . \rho . A . v^2$$

Donde:

$F_D =$ resistencia al avance o fuerza de arrastre (N)

$C_D =$ coeficiente de resistencia al avance o coeficiente de arrastre

$\rho =$ densidad del aire (kg/m^3)

$A =$ área frontal del vehículo (m^2)

$v^2 =$ velocidad del vehículo (m/s)

2.2.3. Fuerza de sustentación

La sustentación, también conocida como carga aerodinámica, es la fuerza provocada por el fluido y perpendicular a la dirección del movimiento del elemento en análisis y puede estar dirigida hacia arriba o hacia abajo [7]. En la industria automotriz se utiliza la sustentación negativa (downforce) a fin de mantener el contacto del vehículo con el suelo y mejorar su adherencia [9]. La fuerza de sustentación está determinada por la ecuación:

$$F_L = \frac{1}{2} C_L . \rho . A . v^2$$

$F_L =$ fuerza de sustentación (N)

$C_L =$ coeficiente de sustentación

$\rho =$ densidad del aire (kg/m^3)

$A =$ área de la superficie de referencia (m^2)

$v^2 =$ velocidad del vehículo (m/s)

2.2.4. Potencia y resistencia

La potencia necesaria para vencer la resistencia del aire y mover el vehículo se determina con la ecuación [12]:

$$P_a = \frac{1}{2} C_D . \rho . A . v^3$$

Donde:

$P_a =$ potencia necesaria para vencer la resistencia del aire (W)

$C_D =$ coeficiente de arrastre

$\rho =$ densidad del aire (kg/m^3)

$A =$ área frontal del vehículo (m^2)

$v =$ velocidad (m/s)

Por otra parte, la resistencia del aire se define como la fuerza que debe vencer el vehículo para poder moverse y se define con la ecuación [12]:

$$R = \frac{1}{2} C_D . \rho . v^2$$

$R =$ resistencia del aire (N)

$C_D =$ coeficiente de arrastre

$\rho =$ densidad del aire (kg/m^3)

$v =$ velocidad (m/s)

2.3. Dinámica computacional de fluidos (CFD)

La dinámica computacional de fluidos (CFD) resuelve los problemas físicos que están en relación al movimiento de fluidos con el uso de computador, software dedicado y especialmente con el uso de métodos numéricos que faciliten el análisis considerando los distintos fenómenos que puedan influir y los métodos que se pueda aplicar [13].

2.3.1. Métodos CFD.

La ingeniería y su investigación en la dinámica de fluidos guarda tres maneras de abordar un problema siendo éstos la forma analítica, la experimental y el método CFD cada uno con sus ventajas y desventajas. Para el caso analítico se busca evaluar el objeto en el cual el éste aparezca lo más simple posible, aunque a pesar de esto las ecuaciones diferenciales no son sencillas o no son solucionables o incluso en muchos casos los resultados no se apegan a la realidad física. En el modelo físico los inconvenientes surgen al no poder incluir todas las condiciones físicas en el modelo, los ensayos experimentales son muy costosos y conlleva mucho tiempo aunque los resultados puedes ser aceptables respecto al modelo el cual representa, sin embargo según [14], cuando se hace un ensayo a escala hay que cumplir 3 factores de similitud siendo éstas: geométrica, cinemática y dinámica con el fin de que los resultados se apeguen al fenómeno real aunque la

similitud dinámica es virtualmente imposible alcanzar ya que las fuerzas que actúan sobre un modelo a escala también deben ser representadas a escala generando diferencias en resultados bajo estos dos escenarios. Para el tercer caso los modelos FEM resultan ser una buena alternativa debido a la exactitud, baja inversión y corto tiempo de análisis siendo herramientas muy útiles en el ámbito de la mecánica de fluidos.

La aplicación de métodos finitos en la ingeniería ha sido especialmente relevante en la dinámica de fluidos. Entre estos métodos, el de volúmenes finitos destaca por su importancia, ya que es particularmente adecuado para las ecuaciones de conservación [13].

Los métodos numéricos tienen la capacidad de analizar simultáneamente todas las variables involucradas en un modelo, lo que los convierte en una herramienta muy precisa para examinar diversos problemas de mecánica de fluidos, con el objetivo de representar de la manera más exacta posible la realidad física [15].

2.3.2. Análisis CFD en el campo automotriz

El análisis CFD en el campo automotriz ha venido siendo muy utilizado por ejemplo en el estudio de diseños aerodinámicos de vehículos, de alerones, de difusores, nuevas geometrías en elementos de carrocería, etc.

La industria aeroespacial tuvo inicios con el uso y aplicación de la dinámica de fluidos computacional a pesar de que en sus inicios no se alcanzaba perfeccionar los procesos industriales, pero con el uso de algoritmos y métodos numéricos relacionados al CFD se solventó esta necesidad y se ha logrado a una expansión de esta técnica mediante la implementación en industrias entre ellas naval, aeronáutica, química, electrónica, entre otras.

Existen más aplicaciones del uso del CFD relacionados al ámbito automotriz desarrollados por ejemplo en la climatización interior de un auto, refrigeración de motores y discos de freno entre otros, cuya finalidad sea optimizar costos y tiempos en los procesos de manufactura de diseños nuevos.

2.4. Etapas de una simulación FEM.

Un análisis por elementos finitos FEM está formada por tres etapas: el preprocesamiento, procesamiento y el post procesamiento todo esto bajo un software de simulación lo que exige tener los conocimientos necesarios de los fenómenos físicos para representarlos de forma numérica mediante el desarrollo de algoritmos de acuerdo al campo de aplicación [13].

2.4.1. Preprocesamiento.

En esta fase, se establecen los límites físicos que conforman el problema, es decir, la geometría del modelo a analizar. El espacio que ocupa el fluido, es decir su volumen se divide en celdas discretas denominado malla que puede ser uniforme o no uniforme. Se establece el modelo físico, incluyendo cinemáticas de movimiento, radiación, entalpía. Se determinan las condiciones de frontera el cual exige tener conocimiento en cuanto al comportamiento del fluido y sus propiedades. En problemas transitorios, habrá que considerar también las condiciones iniciales [10].

Los modelos CAD son representaciones gráficas de un objeto en el que se buscan resolver ciertos problemas o a su vez buscar mejoras y optimizaciones. Estos modelos serán simplificados lo suficiente que representen al modelo real y del cual se definirán las ecuaciones de los fenómenos físicos [16].

2.4.2. Procesamiento.

Etapa también denominada solución y las ecuaciones se resuelven sean en estado estacionario o transitorio [10].

En esta fase, el software resuelve el problema utilizando modelos matemáticos. El tiempo de ejecución varía dependiendo que tan complejo es el modelo y que tan potente es el ordenador. Esta etapa consta de dos pasos: (1) Discretización, donde las ecuaciones diferenciales se reemplazan por un conjunto de expresiones algebraicas; y (2) Resolución del sistema de ecuaciones diferenciales, en la que el software emplea un método de inversión de matrices para resolver la discretización. La duración de este proceso depende de la programación [16].

2.4.3. Postprocesamiento.

Se utiliza un postprocesador para el análisis y visualización de la solución resultante, se analizan los resultados de forma gráfica y o numérica y se extraen conclusiones.

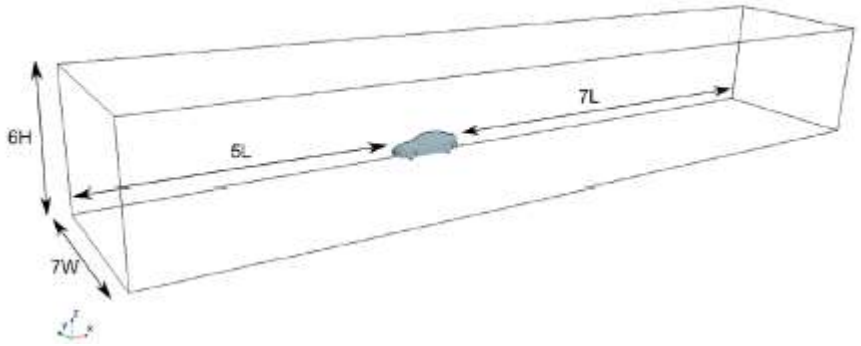
Esta fase implica la recopilación de datos obtenidos, que generalmente se presentan a través de gráficos, su interpretación es de suma importancia ya que de aquí se derivan las conclusiones de los fenómenos analizados o investigados. Los resultados muestran representaciones de mallas, contornos, vectores de flujos o velocidades, etc [13].

2.4.4. Dominio computacional.

Al crear el dominio computacional, es crucial tener en cuenta su tamaño ya que esta contendrá al vehículo. Sus límites laterales, la entrada y la salida deben tienen que estar separados del modelo para permitir que el flujo de aire se estabilice antes de chocar con el diseño en estudio.

En la **Figura 4** se observa el tamaño del dominio computacional que fue usada en una investigación de consumo de energía y autonomía de vehículos eléctricos.

Figura 4. Dimensiones para dominio computacional



Tomado de: Alvear y Sánchez, 2023 [16]

Dónde:

(L) es la longitud del vehículo

(W) el ancho del vehículo

(H) la altura del vehículo.

Los resultados finales de las simulaciones no dependen del tamaño de los dominios[17], lo que quiere decir que no es necesario sobredimensionar los túneles de viento [18].

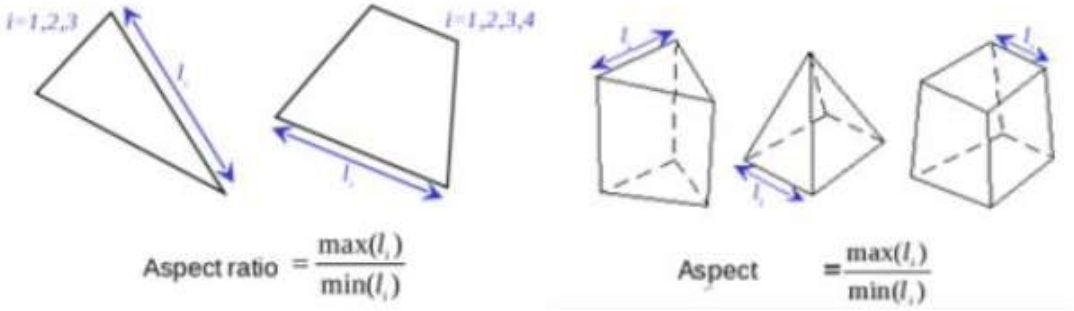
El tamaño de la caja se considera de la siguiente manera [10]: el largo del dominio será alrededor de 5 veces el largo del vehículo; uno delante y tres por detrás del mismo; el ancho y la altura será 5 veces el del vehículo respectivamente

2.4.5. Calidad malla.

Existen múltiples criterios para validar la calidad de las mallas, por ejemplo:

Ratio de Aspecto: Relaciona los tamaños de los elementos de malla en diferentes dimensiones por ejemplo de un rectángulo relaciona su lado más largo con su lado más corto (**Figura 5**)[10].

Figura 5. Ratio de aspecto.

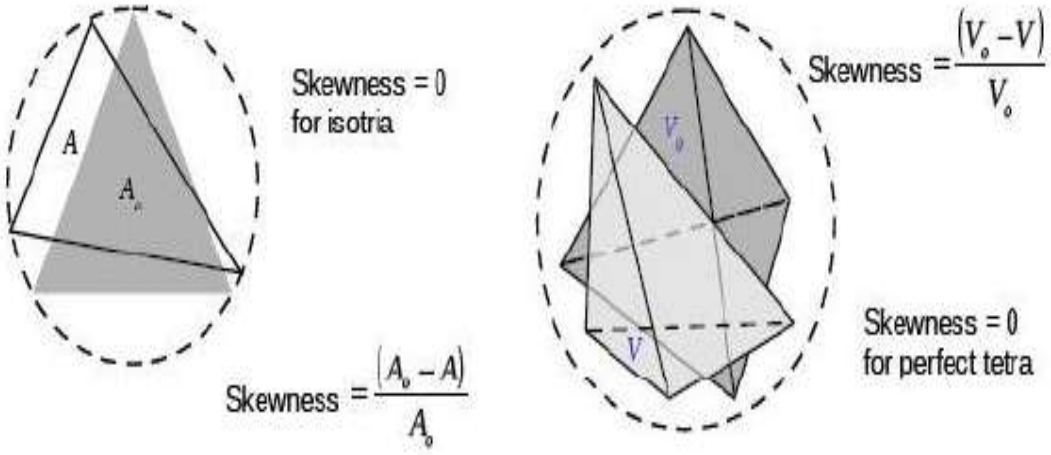


Tomado de: Gómez, 2017 [10]

El Ratio de crecimiento: Analiza la forma en que una malla crece a partir de los elementos de 2d o de superficie.

La oblicuidad analiza qué tan cerca está una cara o un elemento de lograr su forma real (**Figura 6**).

Figura 6. Oblicuidad.

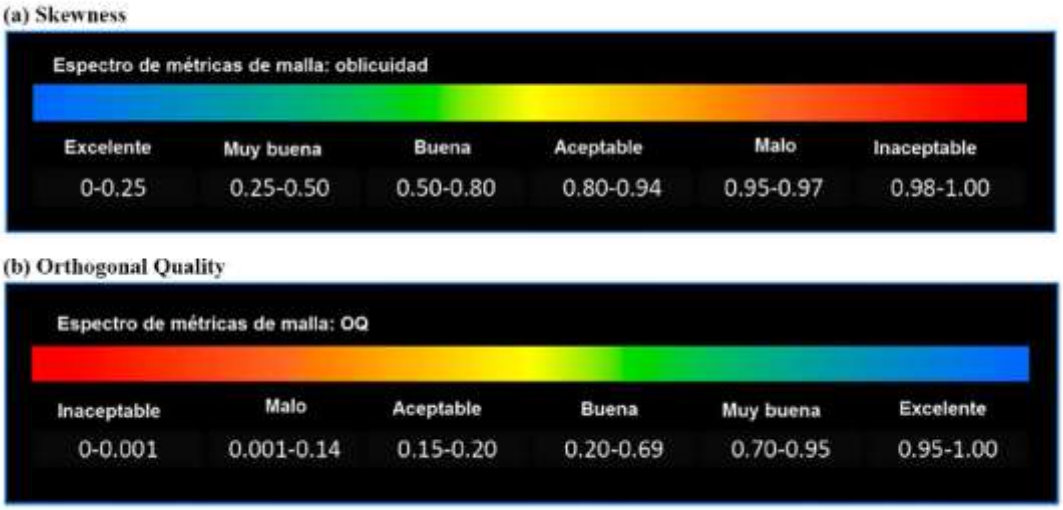


Tomado de: Gómez, 2017 [10]

La ortogonalidad: Se relaciona con la distancia entre los ángulos y las caras de los elementos adyacentes para formar un ángulo óptimo proporcionando valores entre 0 y 1 para su calificación, como se muestra en la figura [19].

En la **Figura 7** se muestran los rangos en los que se puede medir la calidad de la malla obtenida en cuanto al criterio de oblicuidad y ortogonalidad [20].

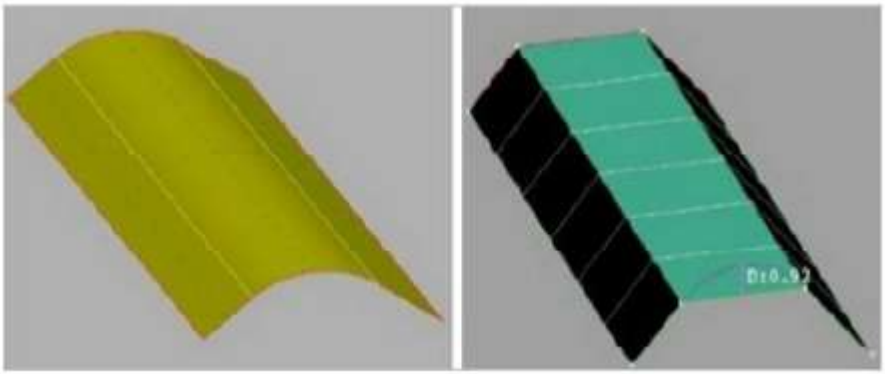
Figura 7. Criterios de calidad de malla.



Tomado de: Ansys, 2015 [21]

Distorsión de malla: Mide el grado en que alteró una malla con respecto de la geometría original (**Figura 8**).

Figura 8. Distorsión de la malla.



Tomado de: Gómez,2017 [10]

Jacobiano: Hace referencia al determinante de la matriz jacobiana. El determinante en un punto específico informa el comportamiento de la función cerca de ese punto. Una función será invertible cerca del punto si el determinante jacobiano no es nulo, por lo tanto, se busca evitar valores cercanos de determinante nulo ya que los solver no podrán resolver las ecuaciones.

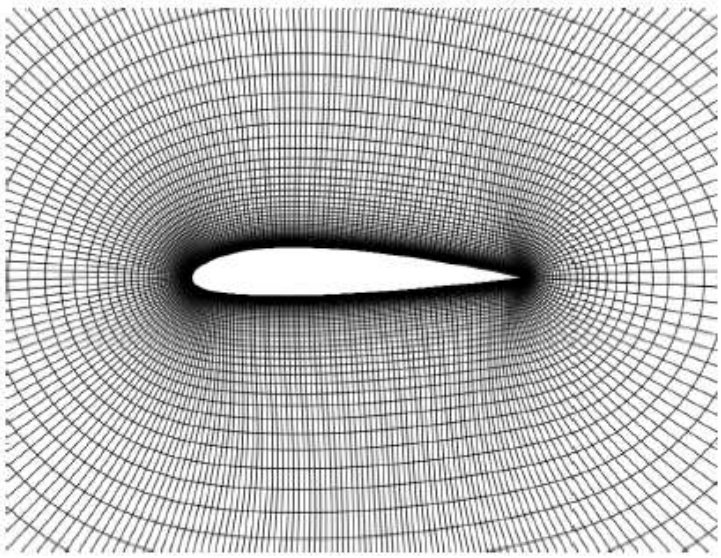
2.5. Tipos de mallas.

En cuanto a los tipos de mallas [10] clasifica a las mallas en tres grupos que son: Mallas estructuradas, no estructuradas y mallas híbridas.

2.5.1. Mallas estructuradas:

Su conectividad es regular y se puede expresar como matrices en 2D o 3D, restringiendo las opciones de elementos a cuadriláteros en 2D o hexaedros en 3D (**Figura 9**).

Figura 9. Malla estructurada.

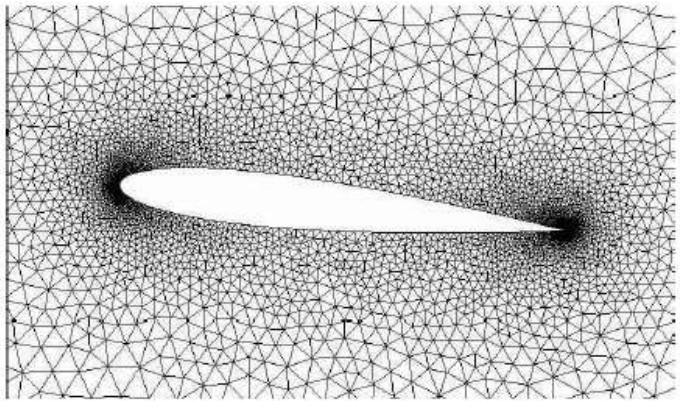


Tomado de: Gómez, 2017 [10]

2.5.2. Malla no estructurada:

Su conectividad es irregular y no se puede representar fácilmente como matrices en 2D o 3D. Comparado a las mallas estructuradas los requisitos computacionales de estas pueden ser mayores puesto que sus conexiones deben ser almacenadas de forma explícita (**Figura 10**).

Figura 10. Malla no estructurada.

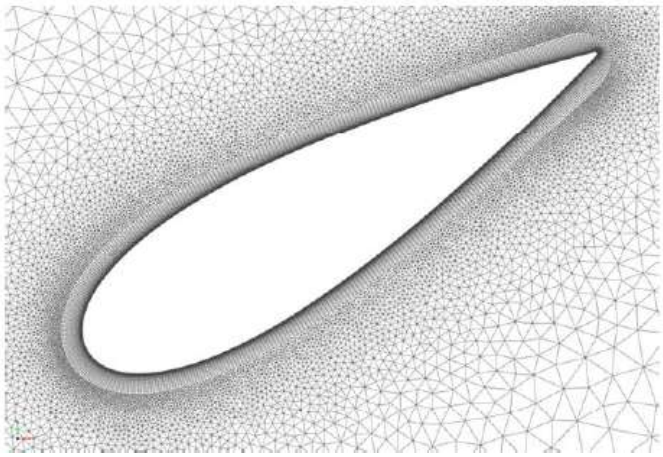


Tomado de: Gómez, 2017 [10]

2.5.3. Malla híbrida:

Tiene porciones estructuradas y porciones no estructuradas. el término híbrido implica tener mallas son elementos estructuradas y no estructuradas (**Figura 11**).

Figura 11. Malla híbrida.



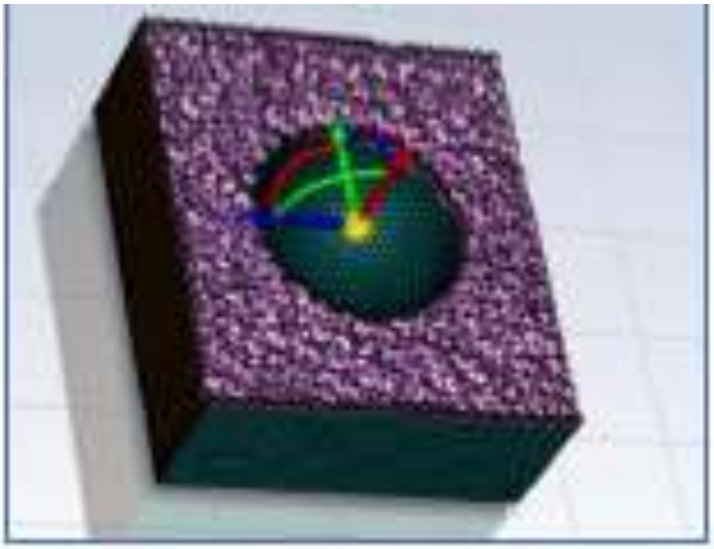
Tomado de: Gómez, 2017 [10]

Por otro lado, [16] clasifican a las mallas por la forma de los elementos (2D y 3D) de la siguiente forma:

2.5.4. Malla Tetraédrica.

El uso de mallas tetraédricas surgió debido a la complejidad de las geometrías, esta brinda obtener elementos tetraédricos fácilmente, aunque la precisión de los resultados no es tan buena puesto que necesita muchos elementos tetraédricos implicando mayor gasto computacional (**Figura 12**) [16].

Figura 12. Malla Tetraédrica.

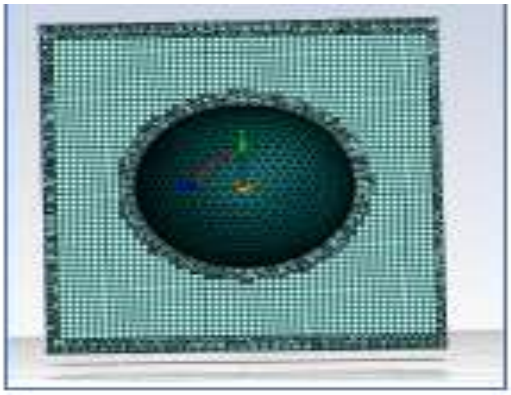


Tomado de: Alvear y Sánchez, 2023 [16]

2.5.5. Malla Hexcore

En la **Figura 13** se observa este tipo de malla diseñada para obtener resultados de mayor calidad en comparación con el de tipo poliédrico. Hexcore ocupa en mayor porcentaje de una geometría con elementos hexagonales occtree. No obstante, presenta la desventaja de que los tiempos de solución son más largos y el consumo de RAM es mayor, lo que requiere más almacenamiento [16].

Figura 13. Malla hexcore.

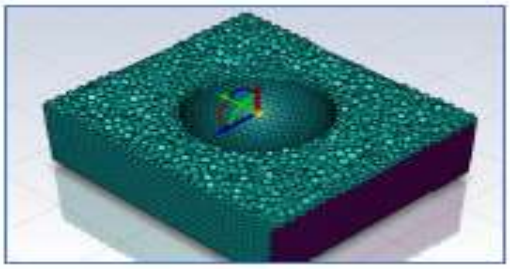


Tomado de: Alvear y Sánchez, 2023 [16]

2.5.6. Malla Poliédrica

En este tipo de malla, cada celda presenta numerosas conexiones, lo que permite una mejor aproximación de los gradientes. En comparación con los tetraedros, estas mallas son menos susceptibles al estiramiento, lo que resulta en una calidad mejorada y una mayor estabilidad del modelo. La transformación de una malla tetraédrica a una malla poliédrica se logra descomponiendo una celda en subvolúmenes que luego se alinean y se unen con las demás celdas continuas como se muestra en la **Figura 14** [22].

Figura 14. Malla poliédrica.

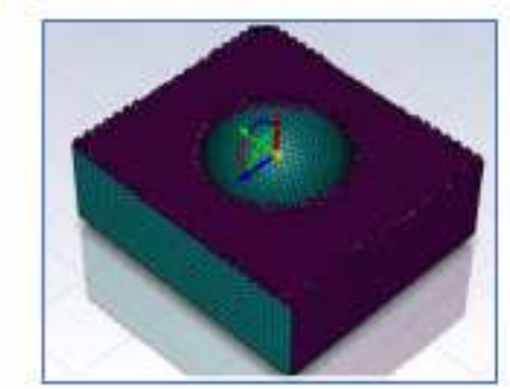


Tomado de: Alvear y Sánchez, 2023 [16]

2.5.7. Malla Poly Hexcore.

Respecto a una malla Hexcore, estas tienen elementos de mejor calidad acelerando el proceso de solución en el ordenador, además cuando se realiza un análisis CFD permite usar estrategias nuevas para analizar el flujo de un fluido en geometrías complejas brindando mayor precisión y velocidad. Este tipo de malla se observa en la **Figura 15** [23].

Figura 15. Malla Poly hexcore.



Tomado de: Alvear y Sánchez, 2023 [16]

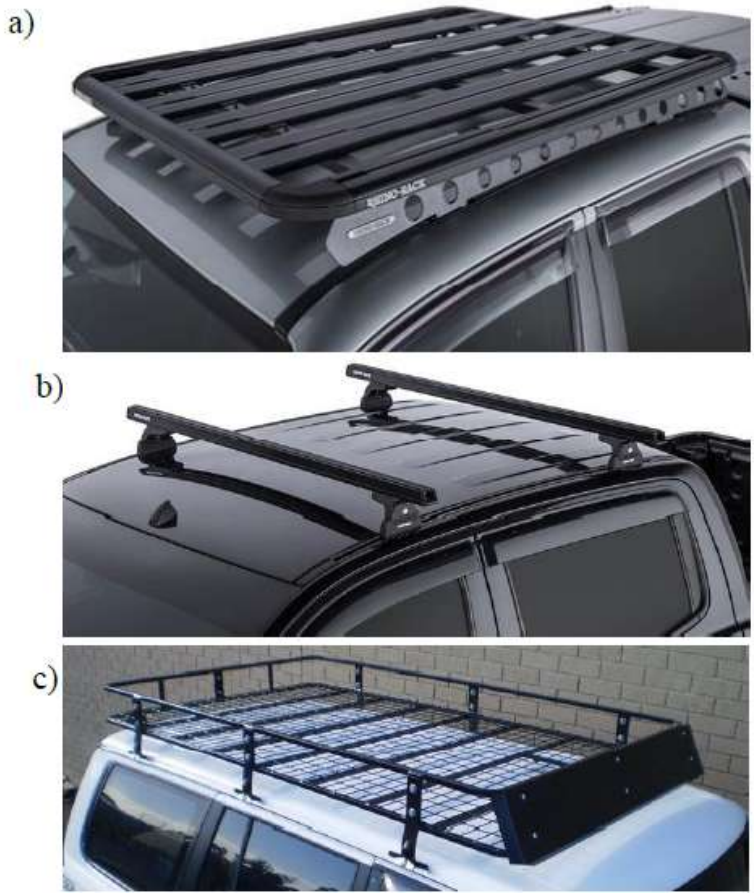
2.6. Accesorios portaequipaje para vehículos

Las barras de techo se produjeron para aprovechar la gran superficie no utilizada sobre el vehículo, sus marcos metálicos abarcan una sección del techo y actúan como anclajes para transportar equipajes típicamente usados en viajes prolongados o de camping los cuales requieren una gran cantidad de equipajes y suministros.

2.6.1. Tipos de portaequipajes

Algunas de las diversas formas, tamaños y orientaciones de las barras de techo se muestran en la **Figura 16**.

Figura 16. Modelos de barras de techo: a) Plataforma Pionera, b) Doble barra, c) Jaula abierta con deflector de viento.



Tomado de: Broad, 2019 [24]

Cada tipo de portaequipajes es adecuado para soportar cargas específicas. La Figura a) es adecuada para equipos pesados y la Figura b) fue diseñada como un estante multiusos para transportar objetos largos. la Figura c) provista con una barandilla y un deflector de viento delantero, es más útil para transportar varios objetos más pequeños.

Una investigación de [25] encontró que hasta un 3% de los vehículos en Estados Unidos están equipados con barras de techo. Se prevé que esta cifra aumente a medida que los nuevos modelos de vehículos las incluyan de fábrica.

2.6.2. Complementos para portaequipajes

Las barras de techo están diseñadas para liberar espacio dentro de un vehículo al asegurar artículos voluminosos al techo. Los artículos más populares incluyen tablas de surf, esquís, escaleras, equipo de campamento, botines y bicicletas.

Figura 17. Barras de techo cargada.



Tomado de: Broad, 2019 [24]

En la **Figura 17** se puede observar el equipo típico que se transporta en una canasta de techo. Incluye artículos esenciales para acampar en áreas remotas, como un botín, una tienda de campaña, un generador, gasolina y agua. Este equipo ocuparía gran parte del espacio en la cabina y liberaría humos peligrosos que podrían causar problemas de salud y seguridad.

2.6.3. Aerodinámica del portaequipaje

En tiempos más recientes, a medida que la forma general se ha vuelto más aerodinámica, ahora se examinan más de cerca áreas específicas de los vehículos por ejemplo se realizaron trabajos de optimización de los pasos de rueda, ruedas y espejos laterales para reducir el ruido de arrastre y del viento [26].

Respecto a los Generadores de Vórtices, [9] menciona que un vórtice es simplemente un flujo turbulento con rotación. Los generadores de vórtices se emplean para alterar el estado de la capa límite. Esto influye en la resistencia que un diseño puede mostrar en simulaciones, y en la práctica, mayor resistencia se traduce en un mayor consumo de combustible. En la Fórmula 1, estos generadores se usan tanto en componentes básicos como en piezas de ingeniería aerodinámica muy sofisticadas. La **Figura 18** ilustra cómo se utilizan estos generadores en la industria automotriz y sus ubicaciones más comunes. Los generadores vienen en diversas formas geométricas y tamaños, generalmente rectangulares o triangulares, con espesores reducidos y curvaturas.

Figura 18. Elementos aerodinámicos que generan vórtices.



Tomado de: Cando, 2023 [9]

El diseño de los spoilers también ha mejorado, y muchos autos de alto rendimiento ahora incorporan alerones activos que pueden subir o bajar según la velocidad del vehículo y, además, se están considerando ampliaciones en el techo del vehículo [9].

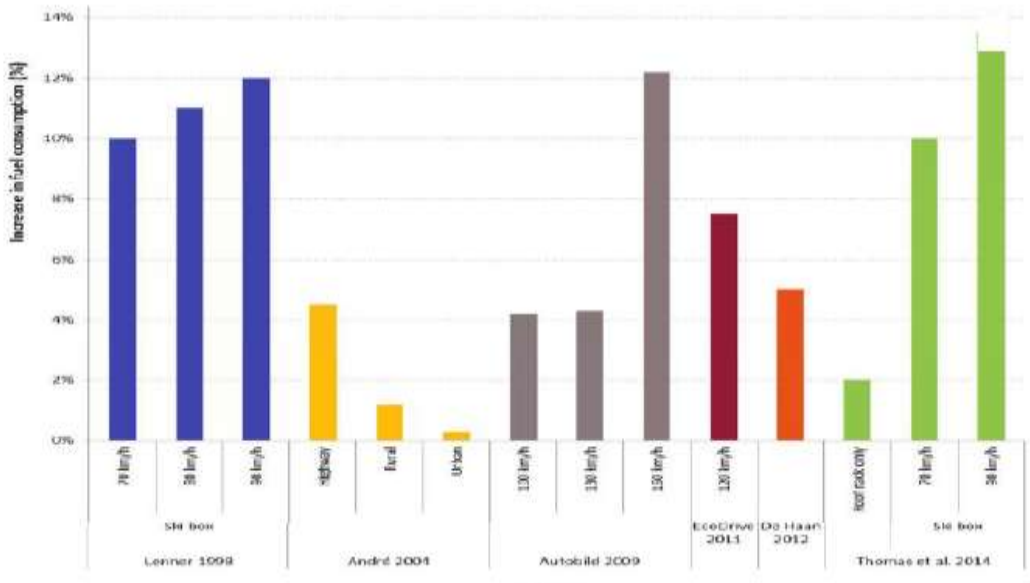
Las barras de techo han recibido cierta atención en el campo de la aerodinámica, en este sentido [25] llevaron a cabo un proyecto a gran escala que utilizó contribuciones de un gran grupo de personas, foros en línea y cámaras de tráfico para determinar el impacto de las barras en los Estados Unidos de América, los cuales descubrieron que las barras de techo, en su mayoría vacías, aumentaron el consumo de combustible del país en un 1% y les cuestan a los estadounidenses 30 millones de dólares cada año. Se trata de un aumento significativo del consumo teniendo en cuenta que solo el 3% de los vehículos cuentan con estas barras de techo.

Otro estudio [27] realizaron pruebas en un túnel de viento en un automóvil de tamaño completo para determinar los efectos de arrastre con el uso de complementos que incluyen una sirena de policía, un letrero publicitario, un letrero de taxi y un portaequipaje en el techo Se descubrió que una barra de techo vacía aumentaba la resistencia en un promedio de 12,5%, mientras que una barra con escalera la aumentaba en un 17,3%.

Un estudio similar descubrió que un sedán con todas las ventanas abiertas, baja presión de neumáticos y una caja de carga fijada al techo hacía que la economía de combustible cayera entre un 25 y un 27 % a alta velocidad [28].

La **Figura 19** muestra el aumento en el consumo de combustible versus la velocidad y el contenido de las barras del techo [29].

Figura 19. Efecto de las barras de techo en el consumo de combustible.



Tomado de: Zacharof, 2016 [29]

2.7. Materiales de fabricación

Las barras de techo deben ser fuertes, livianos y duraderos, factores que dependen en gran medida de los materiales utilizados. Como principales materiales para su fabricación se tiene plástico, acero y aluminio.

Generalmente los plásticos, son ligeros y económicos, pero no tienen la resistencia y durabilidad de las versiones completamente metálicas. Las piezas de plástico pueden romperse y cuantos más componentes de plástico tenga un sistema de bastidor, mayor será la probabilidad de que falle.

Los fabricados en acero son duraderos, resistentes y, en comparación con el aluminio, también más asequibles, aunque no tan livianos como los bastidores de aluminio.

Los sistemas de portaequipajes de aluminio son típicamente la elección preferida para los portaequipajes de techo. Son considerablemente más ligeros que los de acero y tienen una capacidad de carga superior. Aunque suelen ser más costosos que los modelos de acero o plástico, los sistemas de portaequipajes de aluminio proporcionan un mejor rendimiento global.

2.8. Procesos de manufactura

Uno de los procesos principales es el corte plasma, el cual requiere el uso de energía térmica para calentar el material a cortar de manera focalizada, alcanzando más de 30.000 °C y convirtiendo el gas utilizado en plasma, durante el proceso, se genera un arco eléctrico a través de una boquilla estrecha del soplete, concentrando así la energía cinética del gas ionizado que, por polaridad, adquiere la capacidad de cortar [30].

Este método emplea una corriente eléctrica que ioniza el gas que puede ser aire, nitrógeno u oxígeno y lo convierte en plasma, alcanzando temperaturas extremadamente altas. El plasma se dirige a través de una boquilla a alta velocidad hacia la superficie del material, fundiéndolo y soplándolo para crear un corte limpio y preciso. Este chorro de plasma penetra a través del material, fundiéndolo y expulsándolo, lo que permite cortar espesores completos con mínima deformación gracias a la compacidad térmica en la zona de corte [30], [31].

Este proceso permite trabajar a altas velocidades de corte, ya que a diferencia del oxicorte no requiere precalentamiento para perforar, y puede aplicarse para cortar espesores desde 0.5 hasta 160 milímetros, y también facilita el mecanizado de acero estructural con la posibilidad de realizar biselados de hasta 30 milímetros. Una de sus características más destacadas es la capacidad para lograr cortes de alta calidad y acabados excelentes [31].

La soldadura es un proceso de manufactura que busca la unión de dos o más elementos de para formar una estructura, para lo cual utiliza el calor que se genera a partir de un arco eléctrico o combustión de gases, hasta lograr que el material pase a un estado líquido logrando de esa manera la fusión [32].

Dentro del proceso de soldadura por arco eléctrico se tiene algunas variantes como la soldadura con electrodo revestido SMAW, soldadura con protección de gas GMAW en

la cual constan el proceso MIG que utiliza gas inerte como el argón o helio o MAG que utiliza gas activo como el oxígeno o el dióxido de carbono, y la soldadura con protección gaseosa y electrodo de Tungsteno TIG [33].

El proceso de doblado implica transformar de manera plástica una lámina o plancha metálica para obtener una pieza con una forma o geometría diferente. Durante estas operaciones, es importante considerar algunos factores como las propiedades mecánicas del material, los radios de curvatura y los ángulos de plegado. Para realizar el doblado de piezas de chapa, se utilizan máquinas plegadoras y herramentales conocidos como matrices compuestas por dos partes esenciales: el punzón superior (macho) y la matriz inferior (hembra) [34], [35], [36].

Para obtener un doblado óptimo, es necesario cumplir asegurar que la pieza no sufra ningún movimiento anormal durante el proceso, que los radios interiores de doblado sean al menos iguales al espesor de la chapa y que los herramentales (punzón y matriz) se encuentre en perfecto estado controlando sobre todo el aspecto superficial [34], [37].

El proceso de doblado se divide en varias fases, en un principio se mantiene estático el punzón y la parte móvil de la matriz, mientras la chapa plana se coloca en la parte inferior lista para el doblado; luego el punzón desciende y entra en contacto con la chapa, iniciando el proceso de doblado; a continuación, el punzón alcanza el punto muerto inferior al completar su carrera descendente, dejando la pieza doblada; finalmente, la parte móvil de la matriz regresa a su posición superior, mientras que el extractor inferior retira el elemento de la matriz [34].

En la actualidad se utiliza métodos de simulación computacional a fin de predecir el comportamiento mecánicos de las chapas metálicas luego de los procesos de deformación como el doblado o plegado, todo esto con la intención de mejorar los procesos y hacerlos más eficientes y lograr un comportamiento óptimo en las estructuras a formar [35].

3. CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales

A continuación, se detallan los materiales que se usaron para el desarrollo del proyecto de grado, enfocados tanto al proceso de diseño como de simulación, éstos se detallan a continuación:

- Vehículo Vitara Clásico año 1992
- SolidWorks
- ANSYS Workbench versión estudiantil
- Escáner modelo Einstar de Shining
- Software EXStar

El proceso de análisis CFD se realizó en el vehículo Vitara Clásico por la disponibilidad inmediata de éste y porque es un vehículo que se presta para la implementación de Racks de techo para transporte de equipajes en el exterior.

Este vehículo cuenta con un motor de gasolina de 1.6L (aprox. 80-96 CV) o versiones más potentes, tracción integral (4x4) con caja reductora, y suspensión robusta diseñada para terrenos difíciles. Sus dimensiones son compactas (aprox. 3.64m de largo x 1.63m de ancho x 1.67m de alto) y el peso es ligero para su tamaño.

3.1.1. Características generales del vehículo

Motor: Principalmente de gasolina, con cilindradas de 1.6L

Potencia: Varía según el modelo, desde unos 80CV hasta 96CV en el motor de 1.6L de 16 válvulas. También existieron versiones V6 de mayor cilindrada en algunas regiones.

Tracción: Integral (4x4), con sistema de doble tracción y, en muchos casos, caja reductora para superar obstáculos.

Dimensiones (aproximadas): Largo: 3.63m a 3.64m Ancho: 1.6m Alto: 1.66m a 1.67m.

Peso (aproximado): 950kg a 1160kg (dependiendo de la versión).

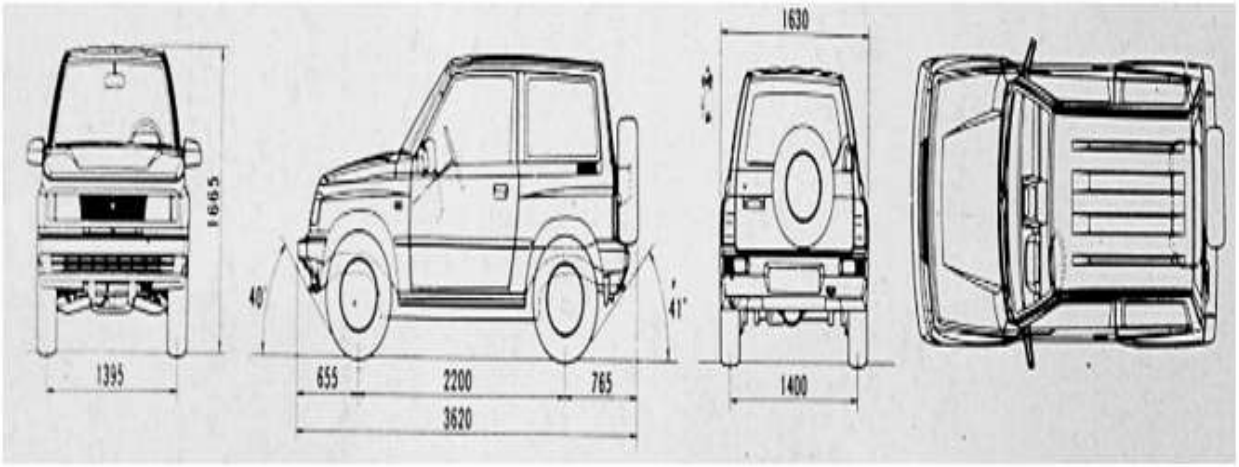
Suspensión: Delantera tipo McPherson y trasera con eje rígido con resorte, adecuada para terrenos irregulares.

Velocidad máxima: Alrededor de 120km/h (no recomendado para altas velocidades debido a su inestabilidad).

3.1.2. Características dimensionales del vehículo

Las dimensiones del Vitara clásico, también conocido como el Suzuki Vitara de primera generación, son aproximadamente 3.64 m de largo, 1.63 m de ancho y 1.67 m de alto para el modelo de 3 puertas. La distancia entre ejes es de 2.20 metros y su peso en vacío es de aproximadamente 950 kg (**Figura 20**).

Figura 20. Dimensiones del vehículo Vitara Clásico.



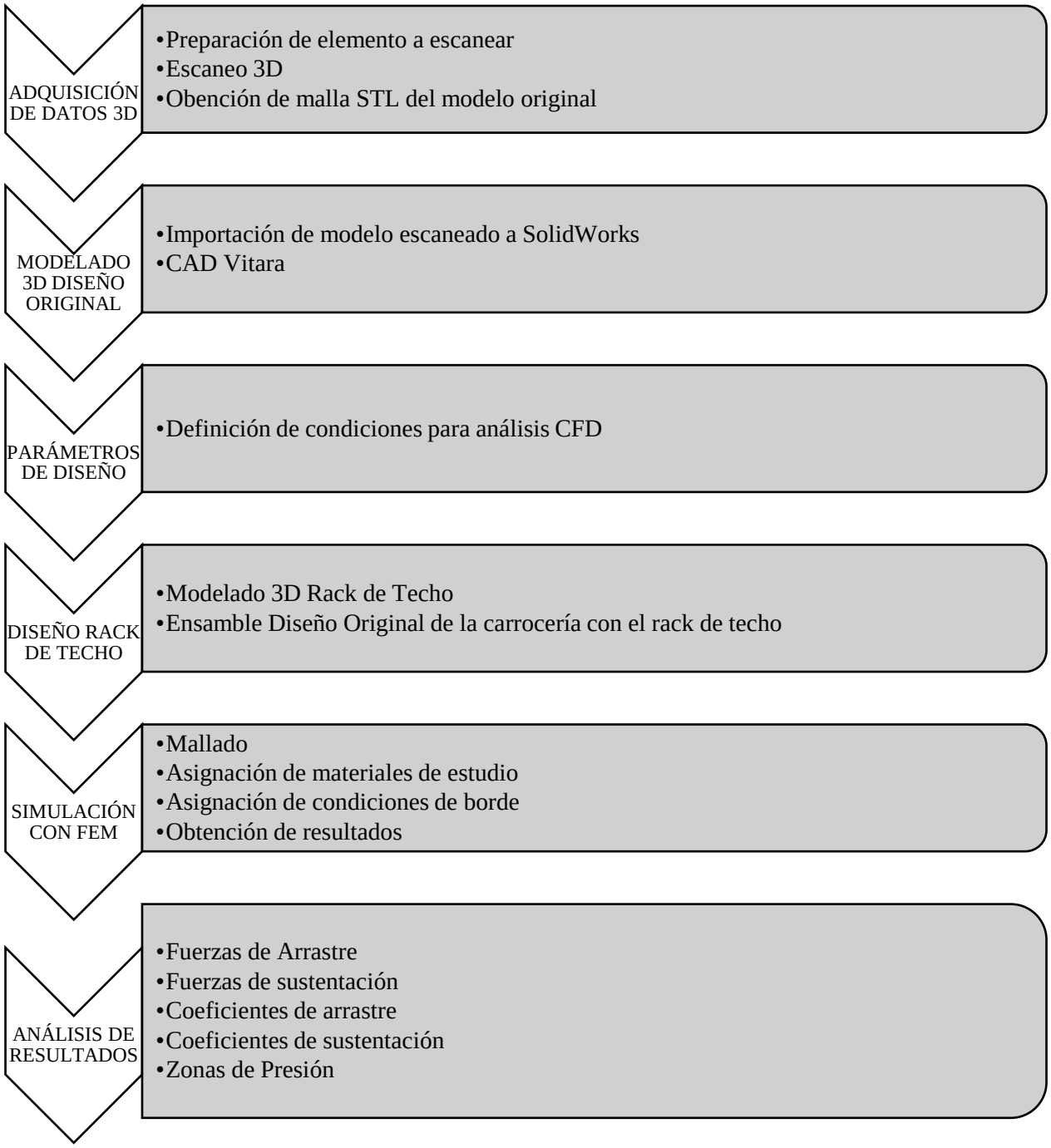
Tomado de: VeoAutos.cl

Con el software EXStar software propio del escáner obtuvo la malla en formato STL para el posterior diseño de la carrocería mediante el software SolidWorks. La simulación CFD se llevó a cabo en el software ANSYS Workbench versión estudiantil

3.2. Método

En el esquema (**Figura 21**) se detalla los procesos y métodos de forma consecutivos a seguir para la realización del estudio. Esta metodología garantiza la validez científica de cada proceso ejecutado, así como la confiabilidad de los resultados obtenidos en los procesos de simulación computacional alcanzando los objetivos planteados para este estudio.

Figura 21. Proceso metodológico.



3.3. Escaneo 3D

Se utilizó un escáner modelo Einstar de Shining que posee las características detalladas en la Tabla 1.

Tabla 1. Características escáner 3D

CARACTERÍSTICA	DETALLE
Modo de escaneo	Escaneo de luz estructurada
Distancia del punto	0,1mm ~ 3mm
Distancia de trabajo	Distancia de trabajo efectiva: 160 mm-1400 mm; Distancia de trabajo óptima: 400 mm
Campo de visión máximo	434 mm*379 mm (bajo la distancia de trabajo óptima)
Velocidad de escaneo	980.000 puntos/s, hasta 14 FPS
Modos de alineación	Alineación de características, alineación híbrida, alineación de texturas, marcadores globales
Escaneo de textura	Sí
Escaneo al aire libre	Sí
Interfaz	USB2.0 o superior
Formatos de salida	OBJ; STL; CAPA; P3; 3MF
Configuración básica de la computadora	SO: Win10, 64 bits; Tarjeta gráfica: NVIDIA GTX1050; Memoria de vídeo: ≥4GB; Procesador: I7-7700H; Memoria: ≥16GB

Tomado de: Einstar, Shining [38]

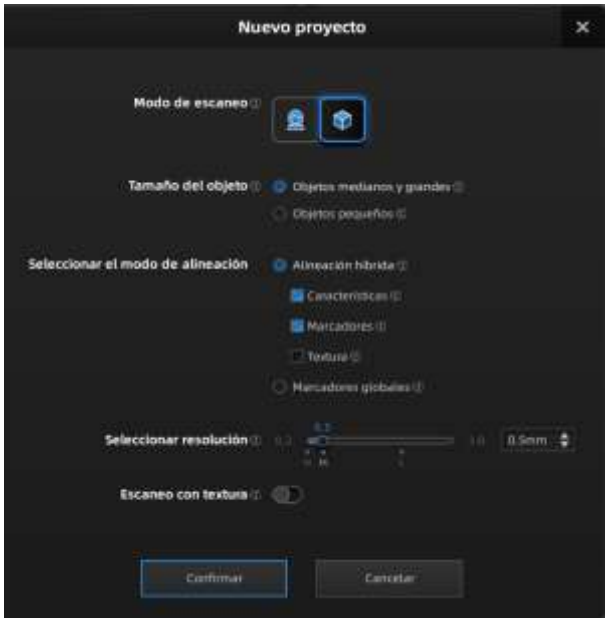
Si queremos optimizar el escaneo tanto en rapidez como en calidad se ha utilizado la herramienta del escáner que consiste en la utilización de marcadores los cuales trabajan como puntos de referencia durante el escaneo disminuyendo el riesgo de que el equipo se pierda durante este proceso, estos se han dispuesto en toda la carrocería sobre todo en zonas planas que es donde más se complica el proceso de escaneo.

Figura 22. Ubicación de marcadores para escaneo.



En la **Figura 22** se puede apreciar la ubicación de los marcadores, la cantidad de marcadores depende del área sin embargo la separación de estos no debe ser más de unos 15 – 20 cm, la ubicación será de forma aleatoria especialmente en zonas planas o pocas características geométricas en donde hay gran probabilidad que el escáner pierda la ubicación.

Figura 23. Configuración inicial para escaneo.



La configuración inicial trae consigo establecer el tamaño del objeto a escanear que en este caso será de mediano a grande con una alineación híbrida es decir un escaneo basado en características y marcadores y con una resolución de 0,5mm (**Figura 23**).

Figura 24. Configuración durante el escaneo.



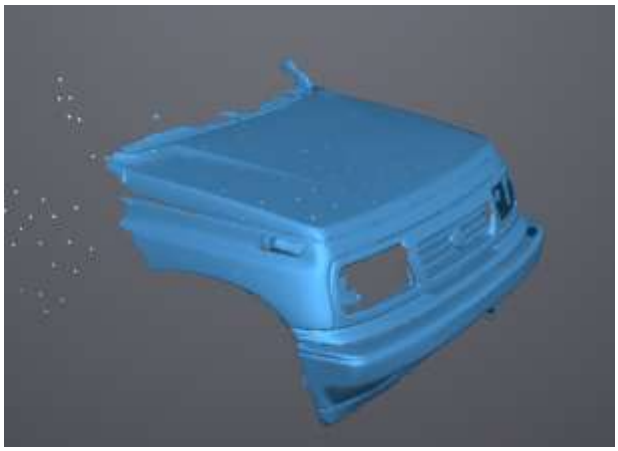
El brillo se ajusta en función de la luz ambiental y la distancia de trabajo depende del operador del equipo pudiendo ubicarse entre 160 y 400mm, como recomendación adicional hay que activar la prevención de desalineamiento e indicador de calidad para realizar un escaneo óptimo (**Figura 24**).

Figura 25. Escaneo de lateral derecho de carrocería.



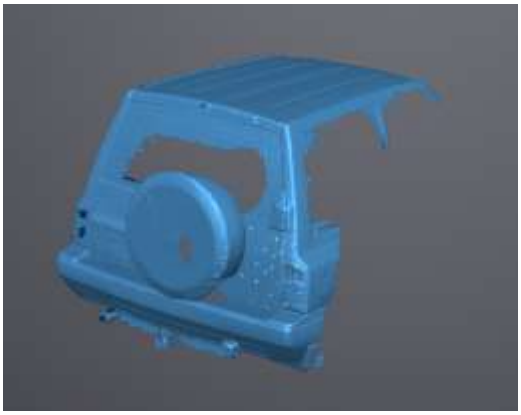
Como se puede apreciar en la **Figura 25** el primer proyecto se basa al escaneo del lateral derecho de la carrocería.

Figura 26. Escaneo de capot y parte frontal de carrocería.



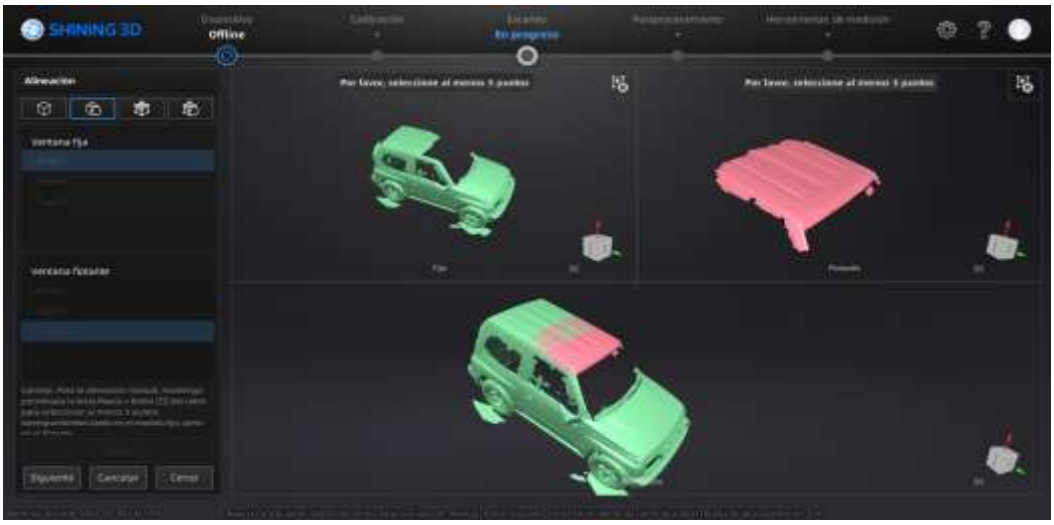
Luego se escaneó el capot y la parte frontal del vitara como se muestra en la **Figura 26**.

Figura 27. Escaneo de techo y parte posterior de carrocería.



Por último, se escaneó la parte posterior con el techo del vehículo y se llevó a cabo la unión de todos estos proyectos y así conformar la carrocería del vitara (**Figura 27**). El proceso de unión de los proyectos lo realiza el software de forma automática considerando los proyectos escaneados (**Figura 28**).

Figura 28. Unión de partes para obtención de carrocería.



Un proceso clave después del escaneo de los elementos es realizar la limpieza de partes que no son utilizables o son consideradas como elementos basura. Finalmente se exporta el archivo en formato STL en tamaño real del elemento (**Figura 29**).

Figura 29. Carrocería para exportar en STL.



3.4. Diseño 3d De Carrocería Modelo D0

El archivo tipo STL del escaneo se importa en SolidWorks para iniciar el proceso de ingeniería inversa, es decir del escaneo llagar a la obtención del modelo CAD de la carrocería con las medidas y formas semejantes al diseño original del vehículo (**Figura 30**).

Figura 30. Importación de archivo escaneado en SolidWorks.

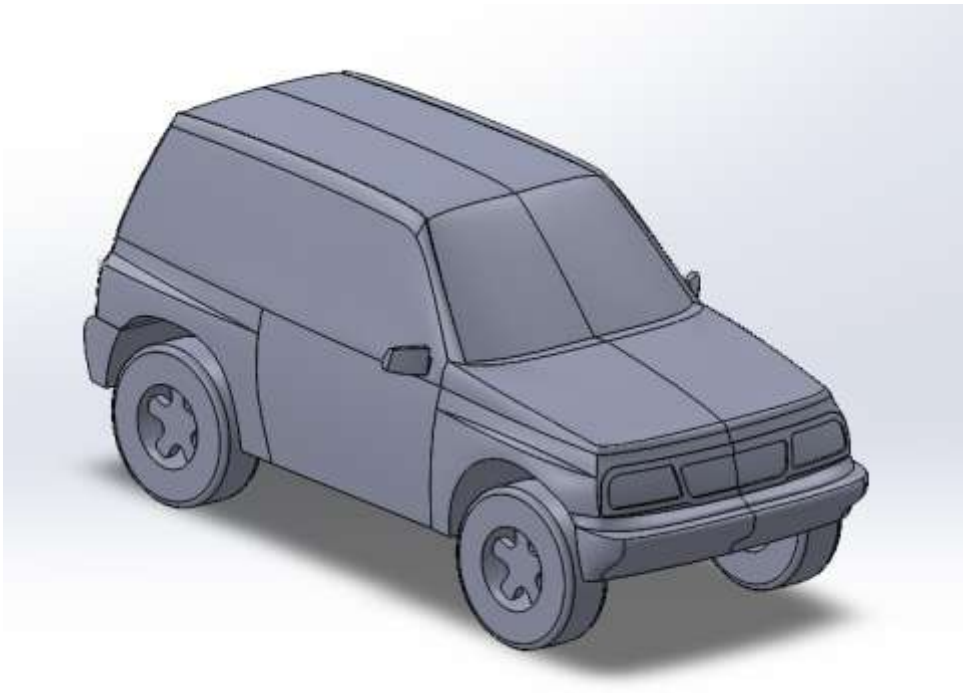


Con el uso de las herramientas de modelado que dispone SolidWorks como la creación de planos, croquis 2D, croquis 3D y operaciones de superficie se obtuvo el modelo 3D de la carrocería (**Figura 31**).

Figura 31. Modelado 3D de la carrocería en base al escaneo 3D.



Figura 32. Modelado 3D de vehículo con superficies para simulación.



En la **Figura 32** se muestra el modelado completo de la carrocería del vehículo con superficies para ser analizado en la simulación.

El diseño D0 se lo ha definido como el modelo 3D de la carrocería original del vehículo sin la adición o implementación del Rack de techo.

3.5. Modelado 3d Rack de Techo para Vitara

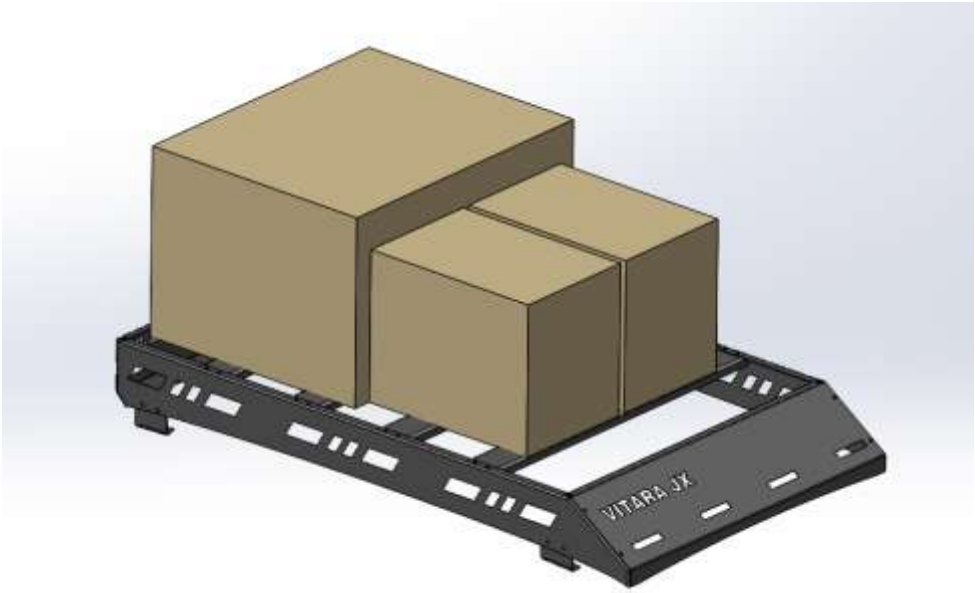
El Rack de techo para el vehículo en análisis se modeló en base al escaneo 3D como se muestra en la **Figura 33**.

Figura 33. Modelado 3D del Rack de Techo basado en el escaneo.



En la **Figura 34** se muestra el modelado CAD del Rack de techo que será usado para el posterior análisis aerodinámico.

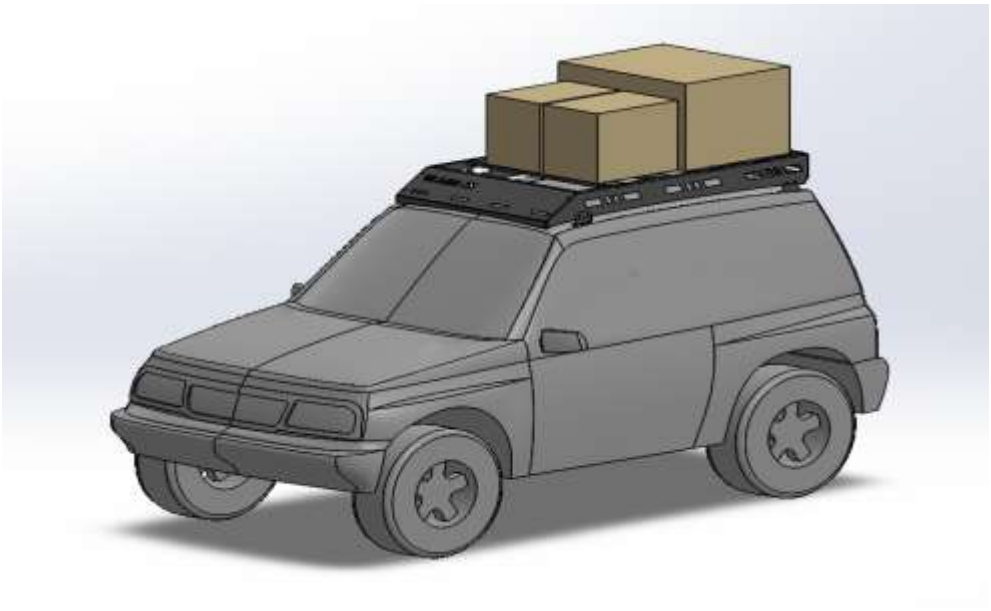
Figura 34. Modelado CAD del Rack de Techo.



3.6. Ensamble Carrocería Vitara y Rack de Techo (D1)

La **Figura 35** muestra el ensamble total del vehículo a simular condiciones CFD con la implementación del Rack de techo el cual para condiciones de simulación se lo denominará con D1.

Figura 35. Ensamble Vitara con Rack de techo.



3.7. Modelado 3D del túnel de viento y extracción de volumen D0

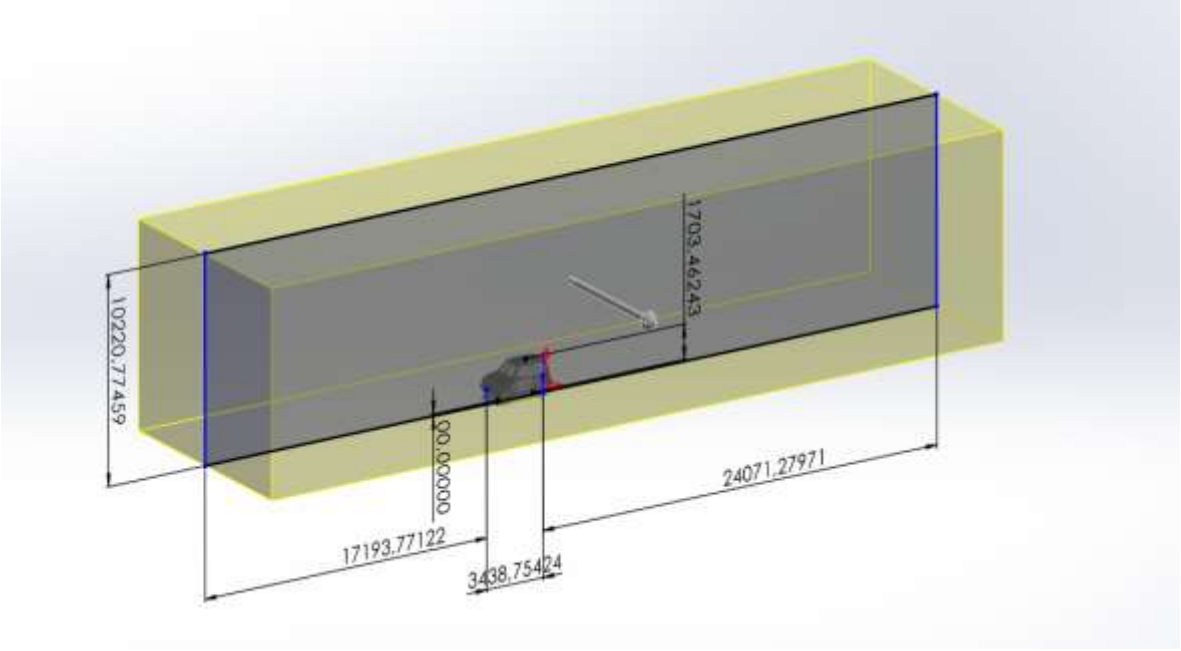
Para diseñar el túnel de viento es necesario tener en cuenta las dimensiones de la caja que contendrá al vehículo, asegurando que los límites laterales, así como las zonas de entrada y salida, se encuentren a una distancia suficiente del modelo. Esto permite que el flujo de aire se estabilice adecuadamente antes de interactuar con el vehículo.

Las dimensiones del dominio computacional que se utilizó en esta investigación son las mismas de la investigación sobre el efecto en el consumo y autonomía de vehículos eléctricos que se describió en el numeral 1.3.4. El tamaño del dominio asignado no influye en los resultados

finales de la simulación, además que dichas dimensiones fueron establecidas en estudios posteriores donde realizan simulaciones en una fórmula SAE [39].

En la **Figura 36** se muestra el túnel de viento que al llevarlo al software CAE el túnel tiene que estar extraído el volumen del diseño D0, es decir, el modelo de la carrocería sin Rack de techo.

Figura 36. Modelado del túnel de viento con extracción de volumen D0.



En la **Tabla 2** se muestran las medidas generales del túnel de viento para el modelo de carrocería sin Rack de techo.

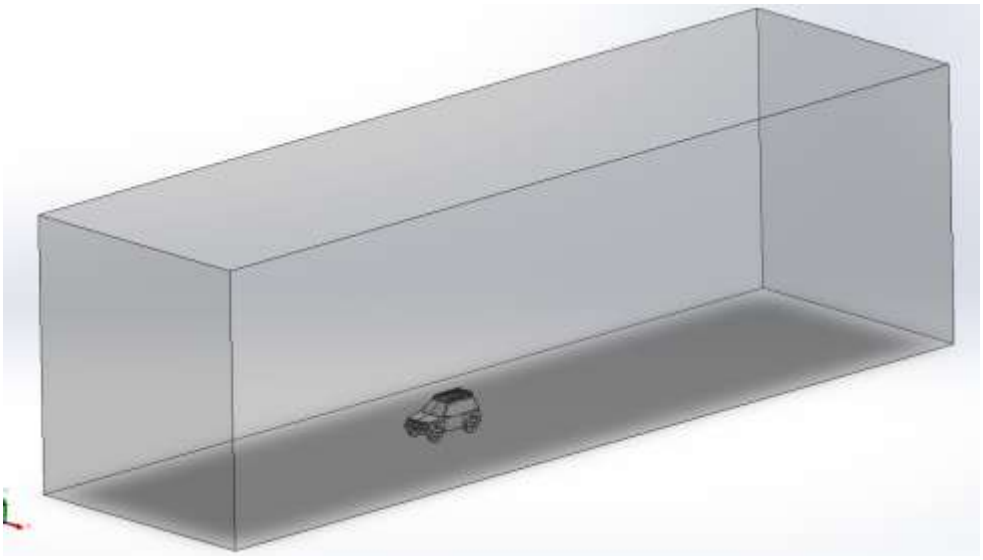
Tabla 2. Medidas del dominio computacional para el modelo D0

Variable	Símbolo	Medida Vehículo	Coeficiente	Medida del túnel de viento
Largo (m)	L	3,43	5L	17,15
			7L	24
Alto (m)	H	1,70	6H	10,22
Ancho (m)	W	1,81	7W	12,68

3.8. Modelado 3D del túnel de viento y extracción de volumen para los modelos D1 y D2

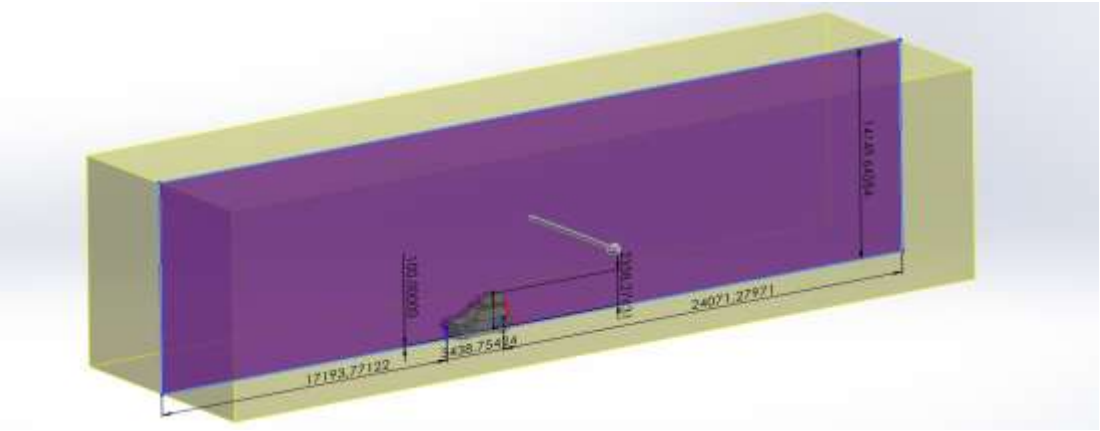
De la misma manera es necesario el diseño del túnel de viento en el cual se implementará las condiciones aerodinámicas. Al llevarlo al software CAE este túnel tiene que estar extraído el volumen del diseño D1 y D2, es decir, el modelo de la carrocería con Rack de techo con y sin carga.

Figura 37. Modelado del túnel de viento con extracción de volumen del modelo D1.



En la **Figura 37** se observa el modelado del túnel de viento para el caso D1.

Figura 38. Modelado del túnel de viento con extracción de volumen del modelo D2.



Para el modelo D2 se muestra en la **Figura 38** el modelado del túnel de viento con la extracción del vehículo.

En la **Tabla 3** se muestran las medidas generales del túnel de viento para los modelos de carrocería que se han considerado el Rack de techo, es decir el mismo túnel de viento se utilizará para los modelos D1 y D2.

Tabla 3. Medidas del dominio computacional para los modelos D1 y D2

Variable	**Símbolo**	**Medida Vehículo**	**Coeficiente**	**Medida del túnel de viento**
Largo (m)	L	3,43	5L	17,15
			7L	24
Alto (m)	H	2.35	6H	14.14
Ancho (m)	W	1,81	7W	12,68

3.9. Simulación CAE

3.9.1. Definición De Parámetros De Diseño, Requerimientos Generales

Para llevar a cabo un análisis CFD, se debe seguir un procedimiento ordenado que incluye la definición del problema, la preparación del modelo (geometría y mallado), la configuración de la simulación (condiciones iniciales y de contorno, así como los modelos físicos) y, finalmente, la ejecución y análisis de los resultados. En cada fase, es esencial comprender la física del flujo para garantizar la exactitud de la simulación y la validez de las conclusiones obtenidas.

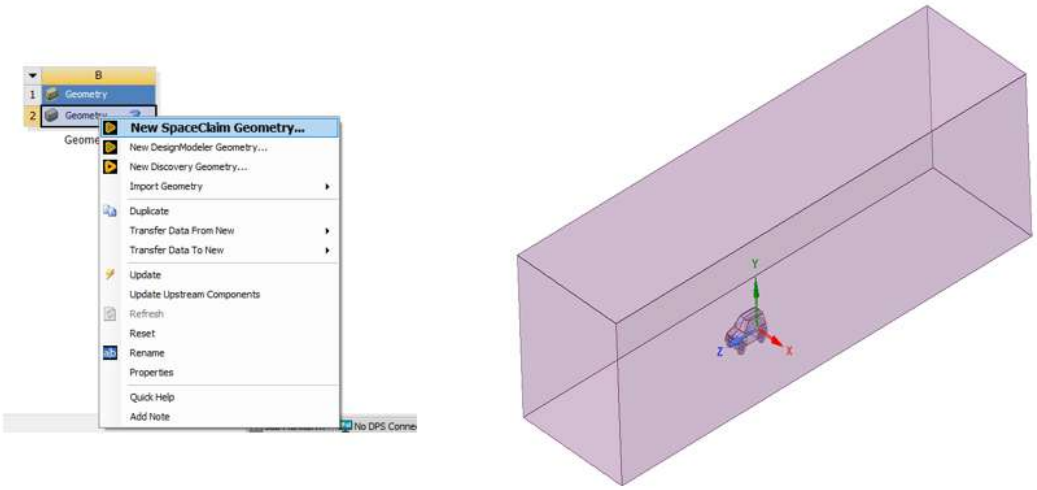
El proceso de simulación se llevó a cabo en el software ANSYS Workbench versión estudiantil ya que es uno de los programas de simulación más reconocidos para la ejecución de este tipo de procesos. Ofrece un entorno multifísico que permite realizar análisis y simulaciones mediante el método de elementos finitos (FEA). Integra las etapas de preprocesamiento, resolución y posprocesamiento dentro de una misma plataforma. Este software permite analizar piezas o conjuntos empleados en ingeniería y diseño mecánico que estén sujetos a uno o varios fenómenos físicos, ya sea de forma individual o simultánea.

El análisis se llevó a cabo en el módulo Fluid Flow (Fluent with Fluent meshing).

3.9.2. Importación de la geometría

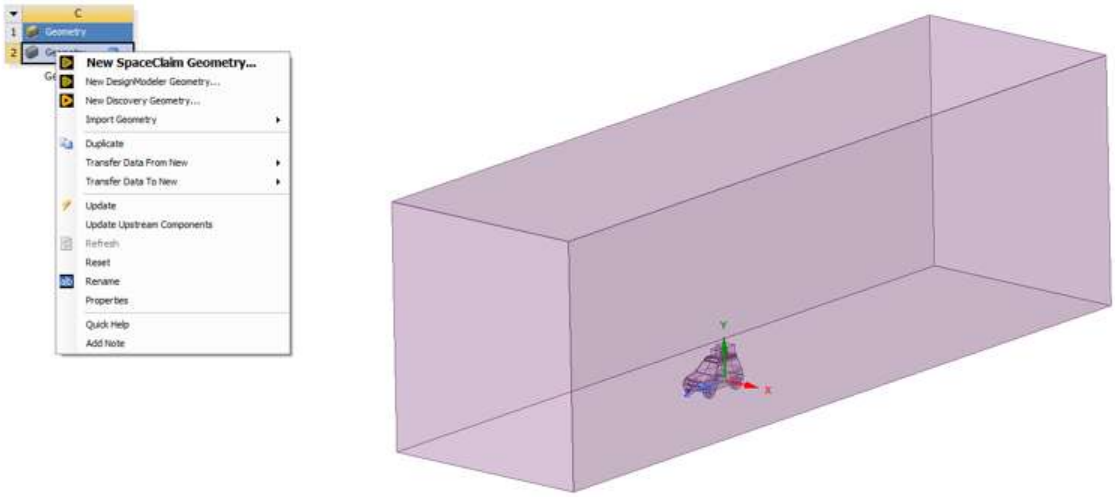
En la **Figura 39** consta el proceso de importación de la geometría al software ANSYS desde SolidWorks, dicho documento debe ser guardado en un formato universal que pueda leer el software Ansys en este caso denominado formato (step). Luego será abierto en SpaceClain como se muestra.

Figura 39. Importación de la geometría a SpaceClaim Modelo D0.



El mismo proceso se realiza para los modelos D1 y D2. Al ser un proceso similar se muestra, la **Figura 40** muestra la importación de la geometría para el modelo D1 y D2.

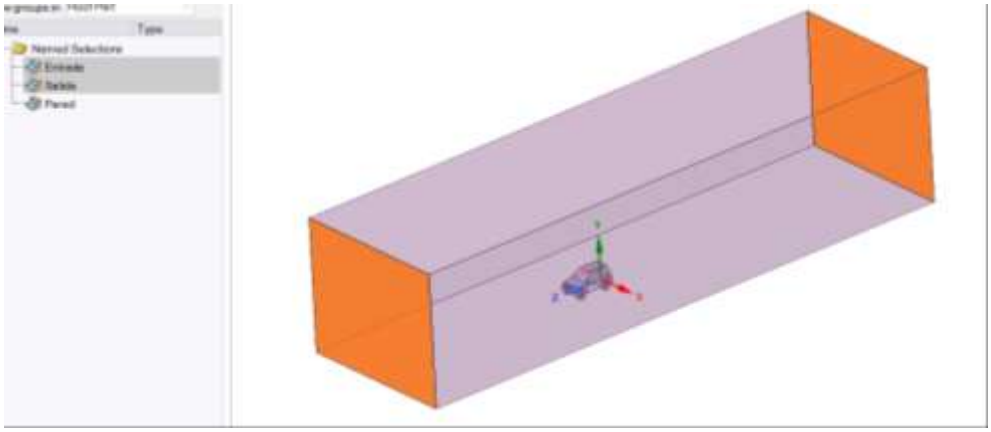
Figura 40. Importación de la geometría a SpaceClaim Modelo D2.



3.9.3. Asignación de entrada, salida y pared

La **Figura 41**, ilustra las zonas por donde el aire ingresa y se evacua. En el dominio computacional, el área de color anaranjado representa la entrada del flujo de aire, situada frente al vehículo, mientras que la otra área del mismo color, ubicada en la parte posterior del vehículo, corresponde a la salida del mismo.

Figura 41. Asignación de entradas y salidas de condiciones de borde en SpaceClaim.



3.9.4. Mallado

Se conoce como malla a la estructura compuesta por líneas y nodos que conforman elementos tetraédricos visibles sobre los objetos analizados. En un proceso de simulación, la calidad del mallado resulta fundamental, ya que influye directamente en la precisión de los resultados obtenidos. Para evaluar dicha calidad se emplean dos indicadores principales: 1) **Skewness**, que determina la calidad de la malla en la superficie, y 2) **Orthogonal Quality**, que evalúa la calidad de la malla en el volumen. Los valores generados por el software de simulación se comparan según la **Figura 7**, clasificando la malla como inaceptable, mala, aceptable, buena, muy buena o excelente, de acuerdo con los resultados numéricos comprendidos entre 0 y 1.

En la **Figura 42**, **Figura 43** y **Figura 44** siguientes se puede observar los diferentes mallados para cada modelo analizado:

Figura 42. Mallado del modelo D0

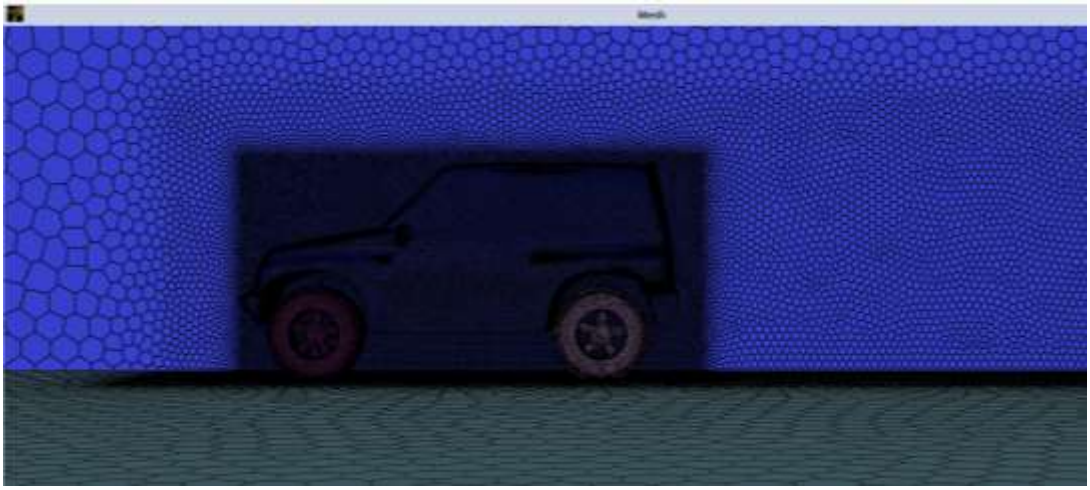


Figura 43. Mallado del modelo D1

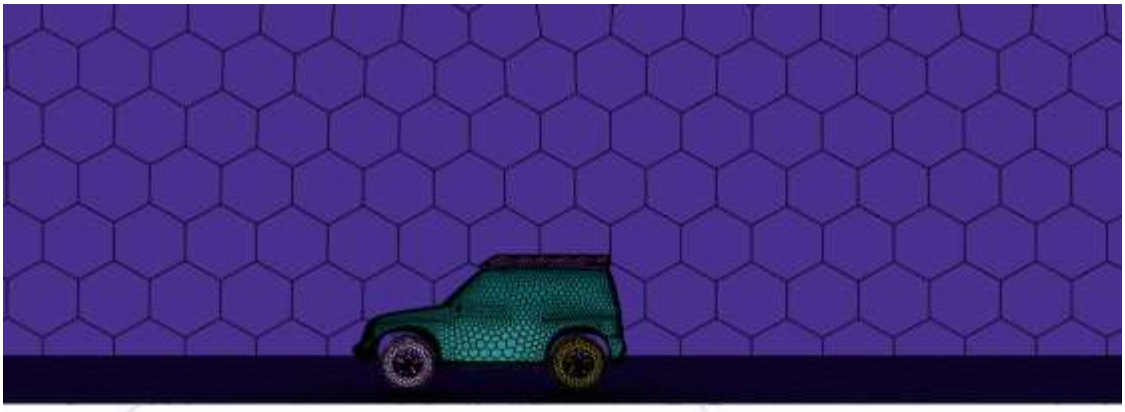
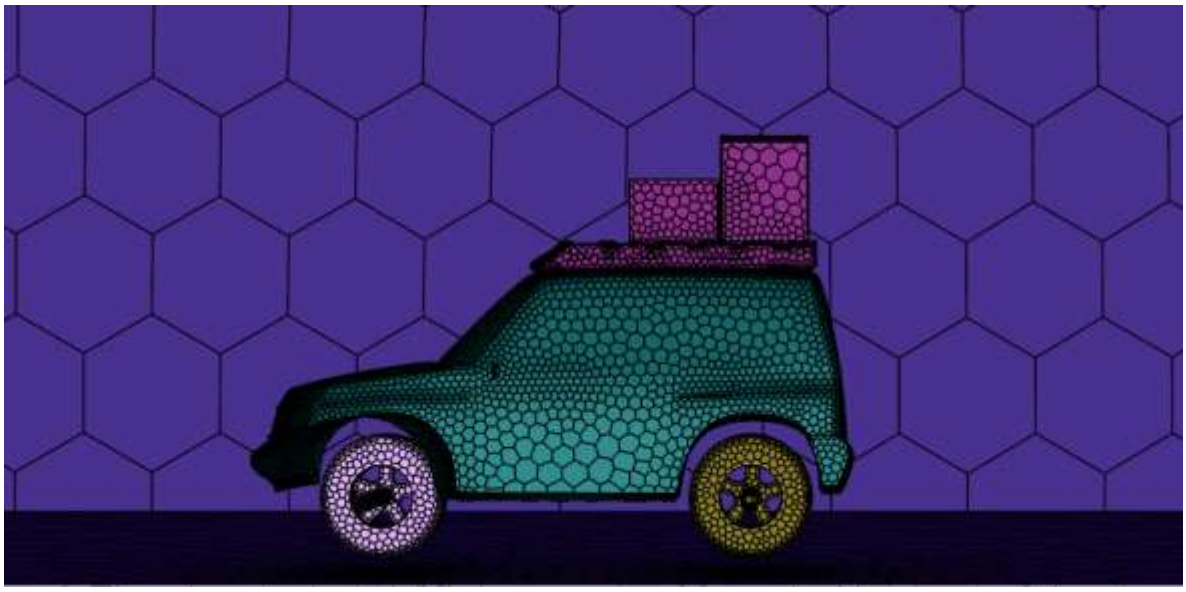


Figura 44. Mallado del modelo D2



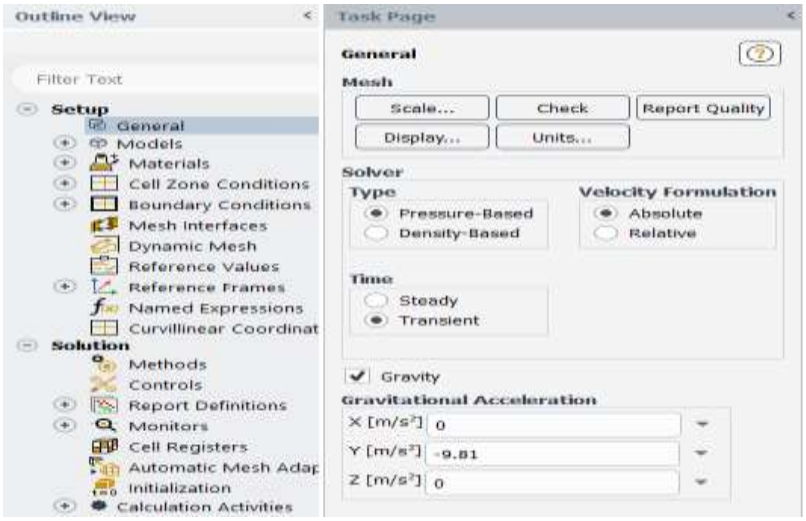
3.9.5. Condiciones de Borde para análisis CFD

Dentro del Módulo Fluid Flow entramos en la opción “setup” en donde se establecen las restricciones del estudio, variables como la velocidad de entrada del aire, tipo de fluidos, condiciones ambientales, entre otros.

El proceso es el mismo para los 3 modelos de estudio, por lo tanto, se muestra el proceso de uno de ellos.

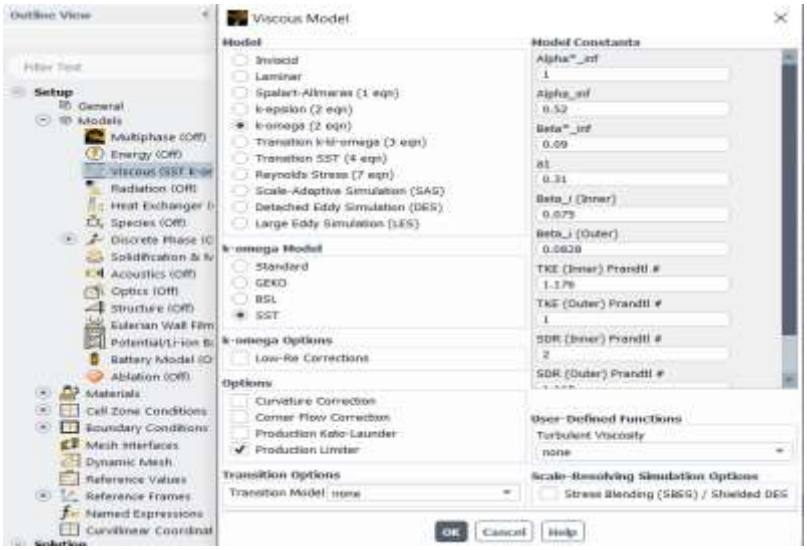
En la sección **“General”**, se configura el análisis en modo transitorio, tal como se muestra en la figura, con el objetivo de obtener resultados más precisos y realistas, ya que estos cambian a lo largo del tiempo. A diferencia del estado estacionario, donde los valores permanecen constantes, el estado transitorio implica una mayor demanda de recursos computacionales. Además, se asigna el valor de la gravedad de **-9.81 m/s²** en el eje **Y**, conforme a la orientación del diseño (**Figura 45**).

Figura 45. Condiciones generales de análisis



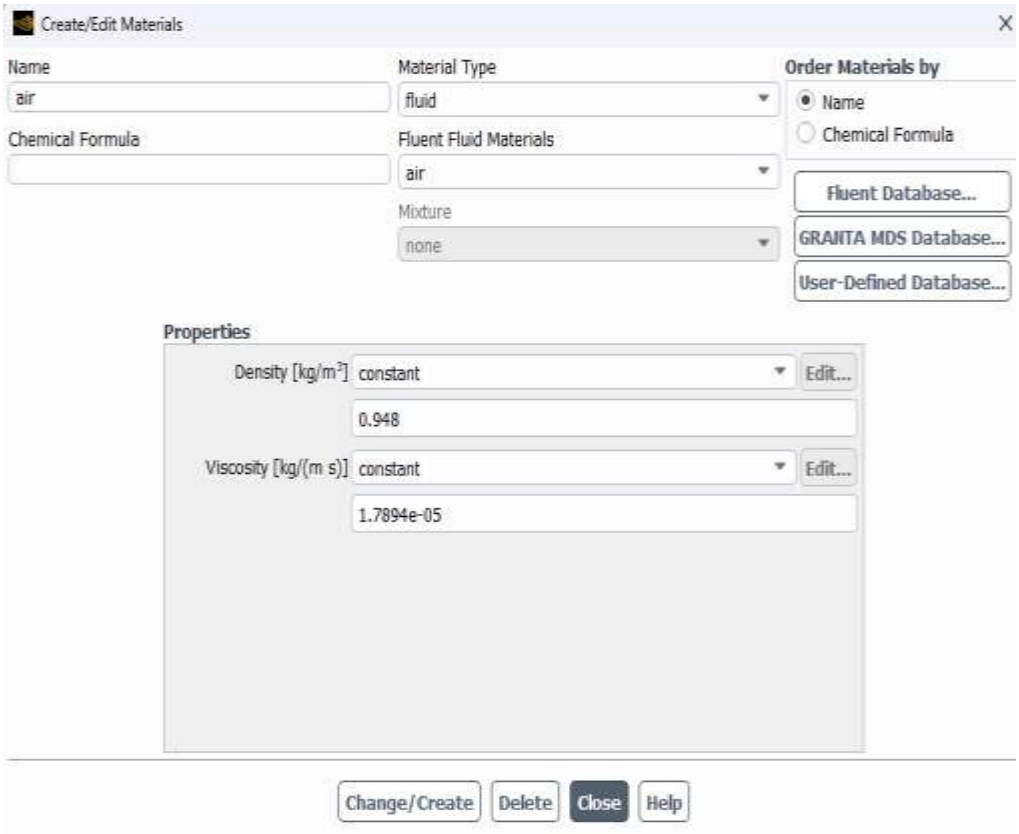
Posteriormente, se elige el modelo de viscosidad **k-omega**, como se muestra en la **Figura 46**, ya que este modelo está diseñado para operar bajo condiciones de flujo turbulento y permite calcular con precisión los parámetros de turbulencia en las zonas próximas a la pared.

Figura 46. Selección del modelo de Viscosidad K-Omega



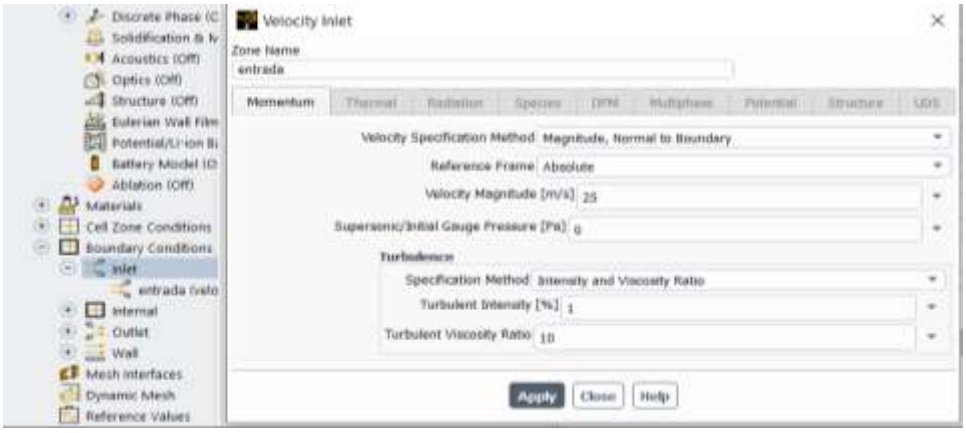
A continuación, se muestra las propiedades del aire en condiciones ideales, las cuales son a 1.002 atmósferas y a la altura respecto a la ciudad de Ibarra. Es decir, a una densidad de 0.948 kg/m3 (**Figura 47**).

Figura 47. Ingreso de parámetros del aire



En la **Figura 48** se establece una velocidad del aire de **25 m/s (90 km/h)** aplicada en la superficie definida previamente como **entrada**. En cuanto a la **intensidad de turbulencia**, se asigna un valor de **1**, ya que el túnel de viento considerado no presenta condiciones complejas; es decir, no se contemplan fenómenos de intercambio térmico ni flujos rotacionales en sus paredes.

Figura 48. Configuración de velocidad de ingreso de aire e intensidad de turbulencia



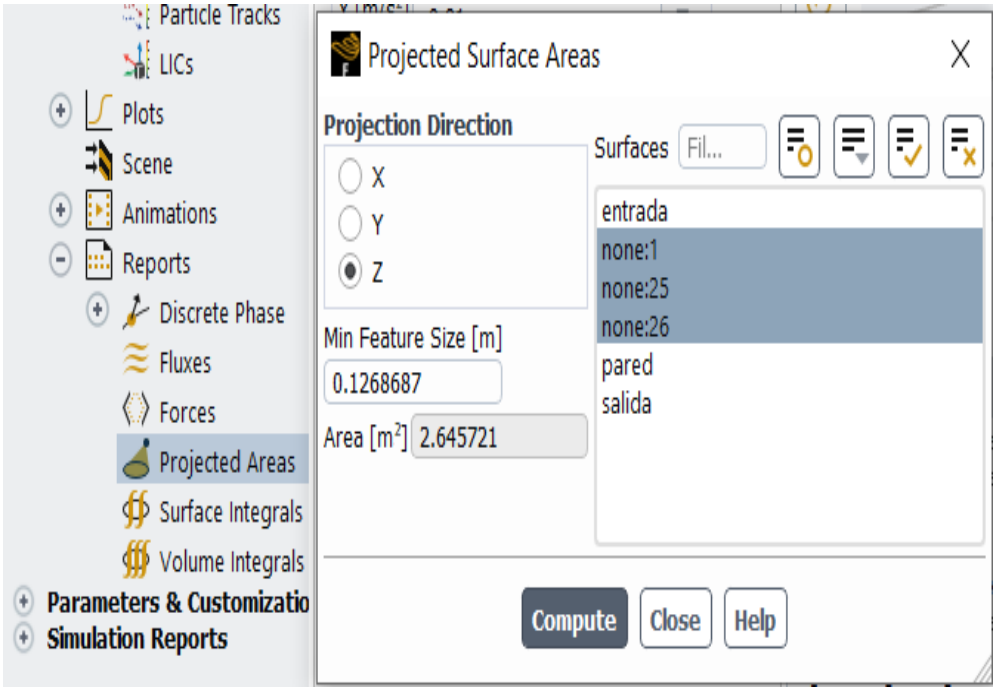
En la intensidad de turbulencia se cambia a 1, puesto que el túnel no tiene configuraciones complejas (**Figura 49**).

Figura 49. Parámetros de presión como condición de salida



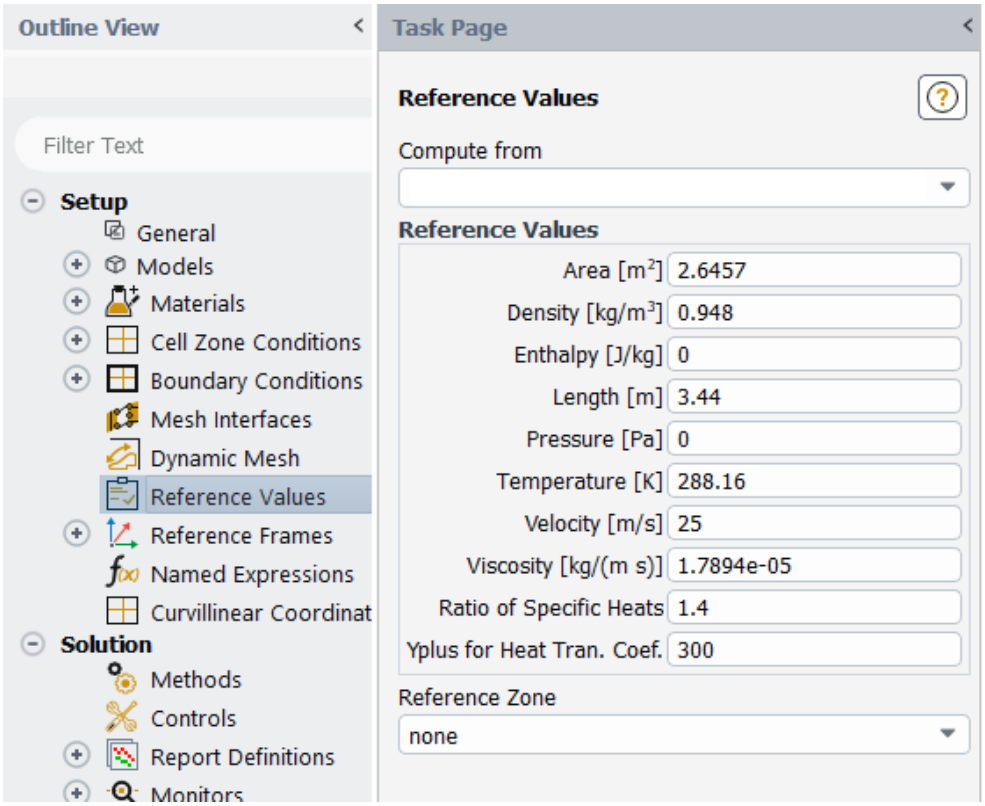
Para determinar el área frontal del vehículo se emplea la herramienta de **proyección de áreas**. Esta permite obtener la proyección de las superficies del modelo sobre distintos ejes; en este caso, se selecciona el eje **"z"**, correspondiente a la proyección de la cara frontal, generando así el valor del área expresado en metros cuadrados, tal como se observa en la **Figura 50**.

Figura 50. Área frontal del vehículo modelo D0



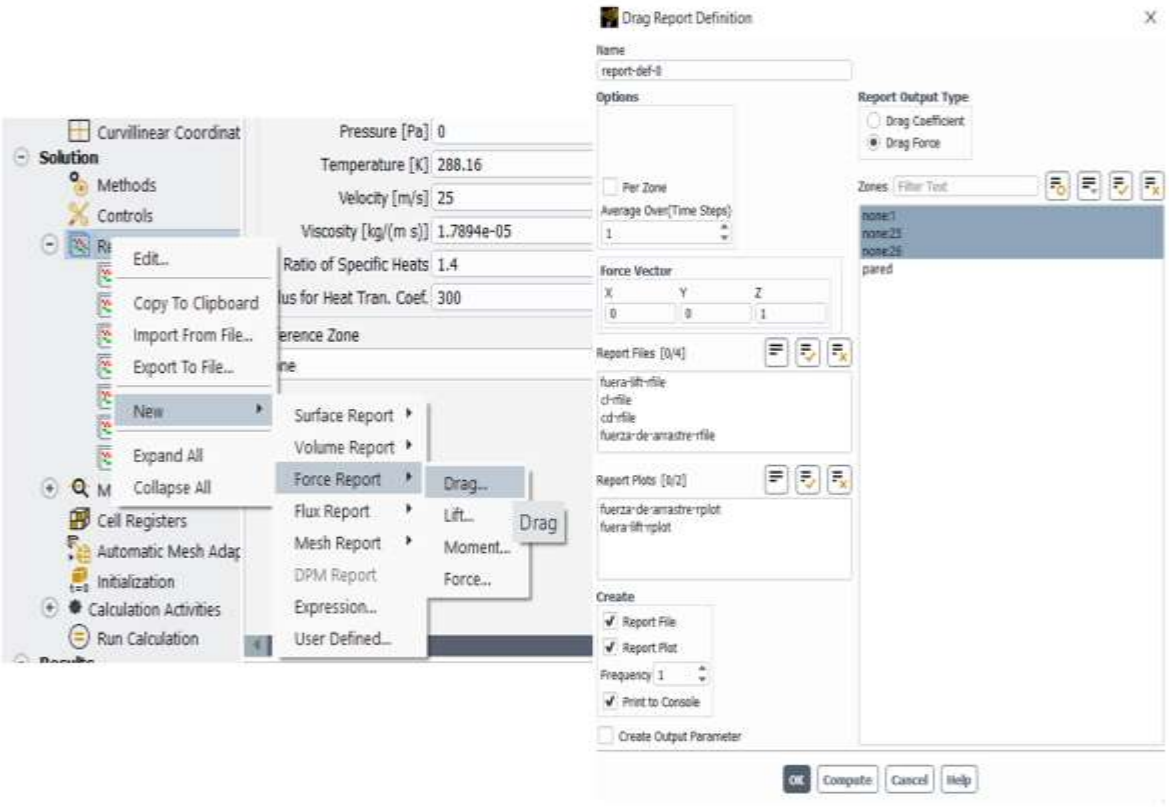
En la **Figura 51** se introducen los valores correspondientes a las características del vehículo, tales como el área frontal y la longitud total, verificando que los parámetros de velocidad y densidad coincidan con los definidos previamente. Además, se especifica la región donde comenzará el cálculo, que en este caso corresponde a la entrada.

Figura 51. Valores de referencia dimensional del vehículo



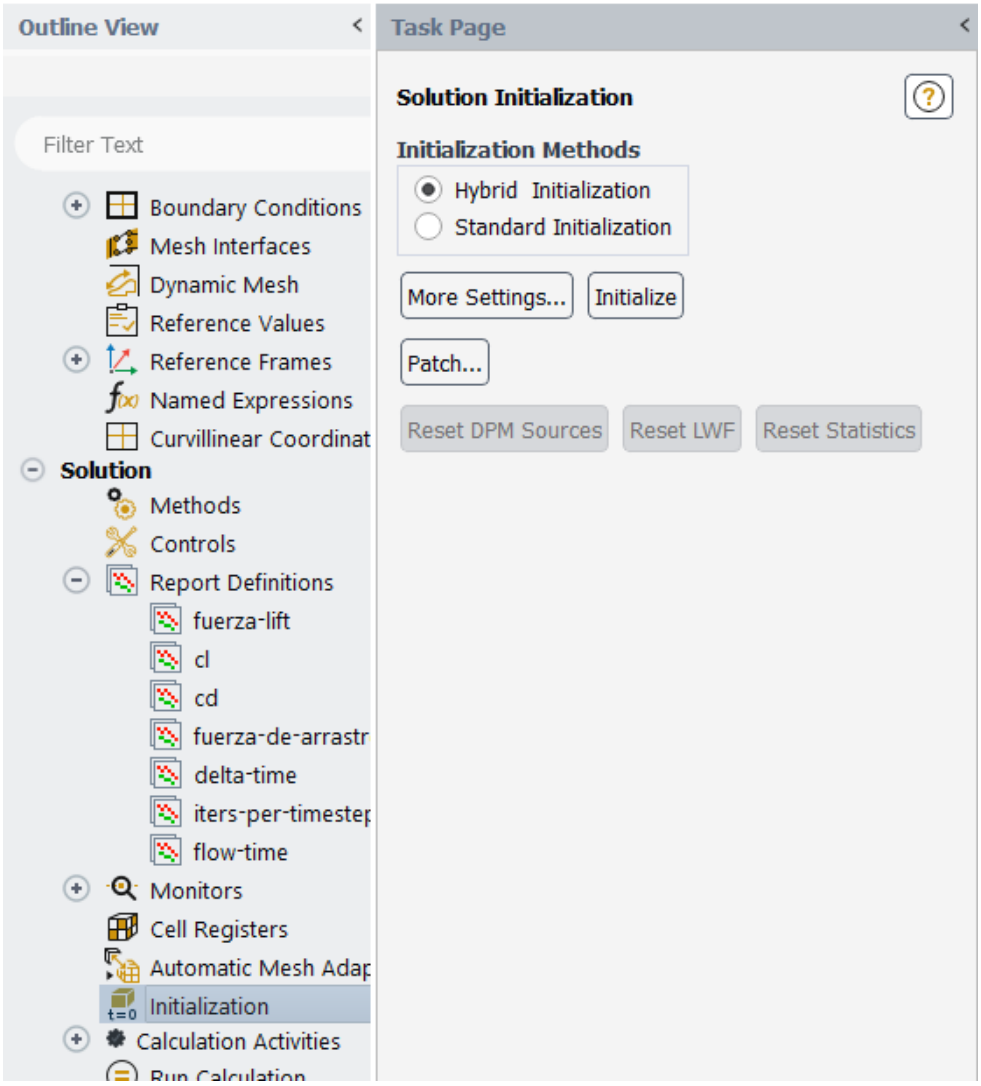
Con el objetivo de determinar la fuerza de arrastre, se establece una nueva configuración conforme a los procedimientos descritos en la **Figura 52**. Se seleccionan todos los sólidos que componen el modelo del vehículo como dominios de interés. La dirección del vector de fuerza se define en función de la orientación espacial de la geometría; en este caso, se asigna una dirección alineada con el eje Z negativo, correspondiente a un valor de -1.

Figura 52. Configuración para la obtención de la fuerza de arrastre



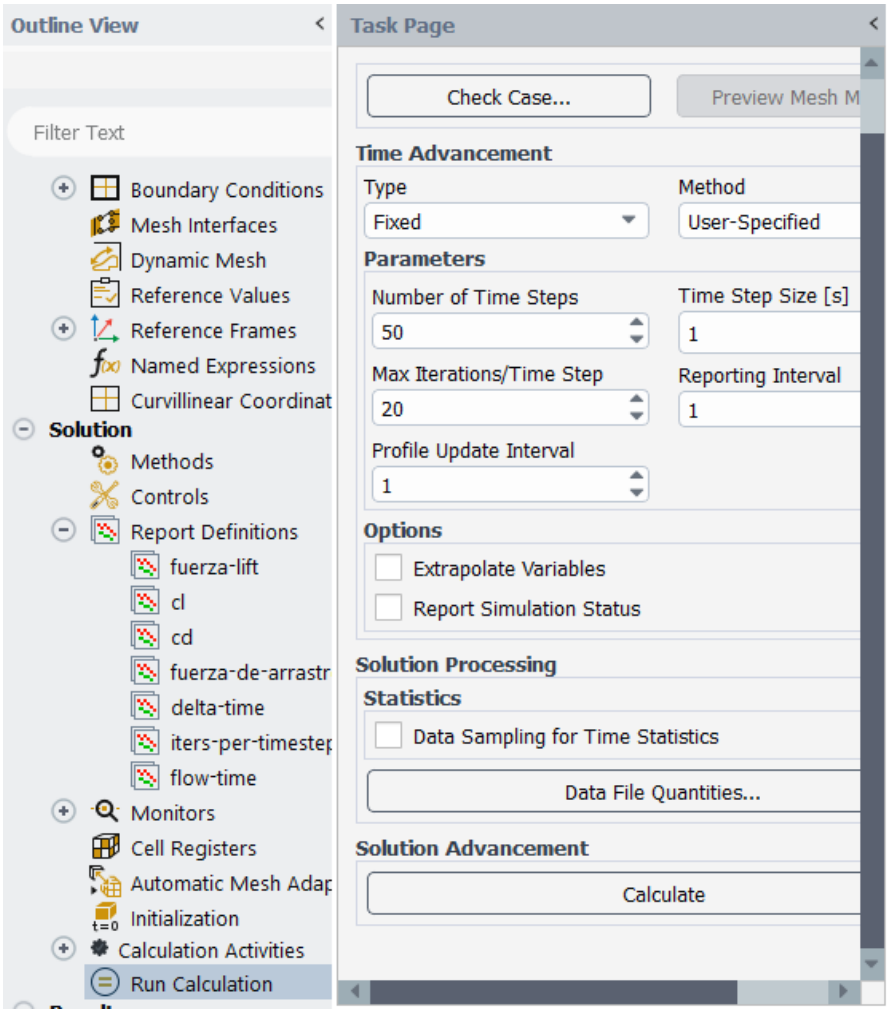
En esta sección se elige el método de inicialización **Hybrid**, tal como se muestra en la **Figura 53**. Esta opción permite optimizar y acelerar el proceso de cálculo, ya que realiza una serie de iteraciones simplificadas que proporcionan una estimación inicial más precisa de las variables de flujo.

Figura 53. Selección del método de inicialización



Para concluir la configuración de la simulación, se define la cantidad de iteraciones que se ejecutarán durante el análisis. En este estudio, se establece un total de 50 iteraciones por segundo, como se muestra en la **Figura 54**. Finalmente, se procede a iniciar el cálculo seleccionando la opción "Calculate".

Figura 54. Ejecución del estudio



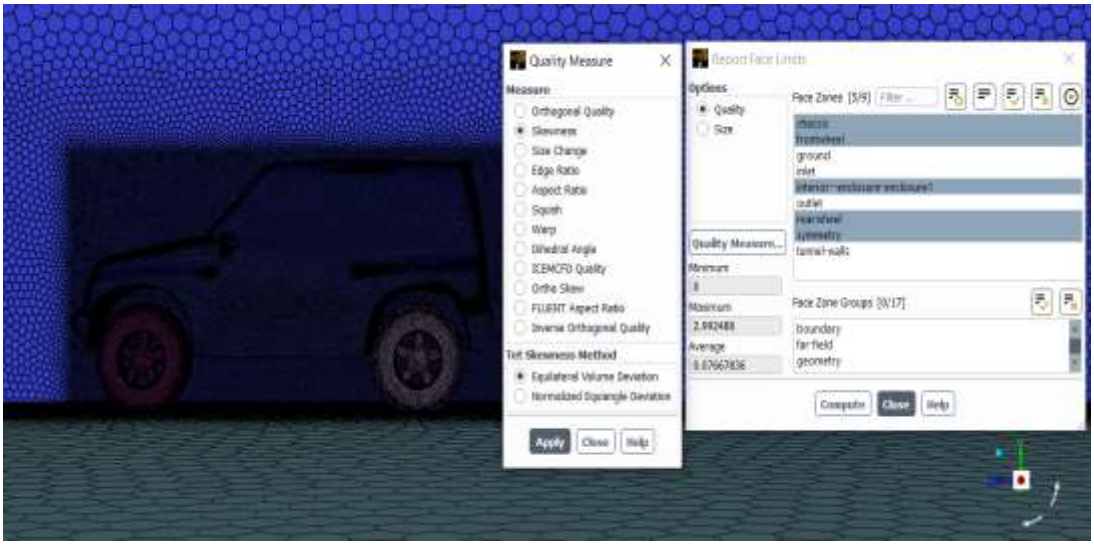
4. CAPITULO IV
RESULTADOS Y ANÁLISIS

Una malla de buena calidad garantiza los mejores resultados de análisis para el problema, minimiza la necesidad de realizar análisis adicionales y mejora la capacidad predictiva. La malla debe ser lo suficientemente fina como para resolver las características principales del problema que se está analizando. La resolución de la malla depende de la malla de contorno inicial y de los parámetros que controlan la generación de la malla interior. En una malla de alta calidad, se debe minimizar la variación de tamaño entre caras o celdas adyacentes. Las grandes diferencias de tamaño entre caras o celdas contiguas generan una malla computacional deficiente, ya que las ecuaciones diferenciales que se resuelven asumen que las celdas se contraen o crecen de forma gradual. La calidad de malla para los estudios CFD se basa en analizar el mallado de los elementos tanto superficialmente como volumétricamente, esta calidad responde a la calidad de las caras y celdas que conforman los modelos.

4.1. Calidad de Malla Superficial para el Modelo D0

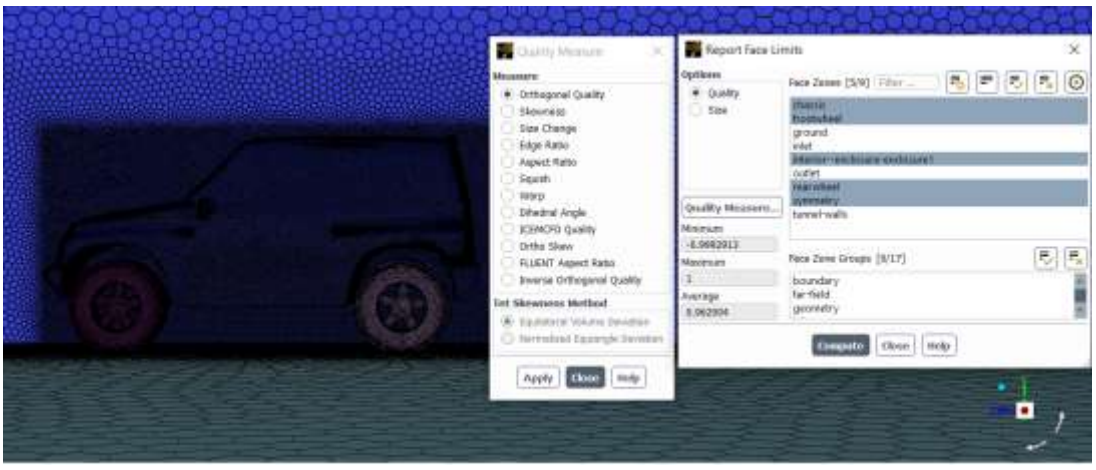
Para el modelo D0 obtenemos un valor promedio de calidad de malla superficial de 0,07 que de acuerdo a Skewness estamos dentro de un rango excelente (**Figura 55**).

Figura 55. Calidad de malla superficial de acuerdo a Skewness del modelo D0



La calidad ortogonal de la malla es mayor que el umbral mínimo recomendado de 0.1, lo que confirma que es de buena calidad. Este modelo presenta un valor promedio de 0.96 dando una calidad excelente (**Figura 56**).

Figura 56. Calidad de malla superficial de acuerdo al criterio de Orthogonal Quality del modelo D0



4.2. Calidad de Malla Volumétrica para el Modelo D0

Para el modelo D0 obtenemos un valor promedio de calidad de malla volumétrica de 0,05 que de acuerdo a Skewness estamos dentro de un rango excelente (**Figura 57**).

Figura 57. Calidad de malla volumétrica de acuerdo a Skewness del modelo D0



La calidad ortogonal de la malla presenta un valor promedio de 0.94 dando una calidad excelente (**Figura 58**).

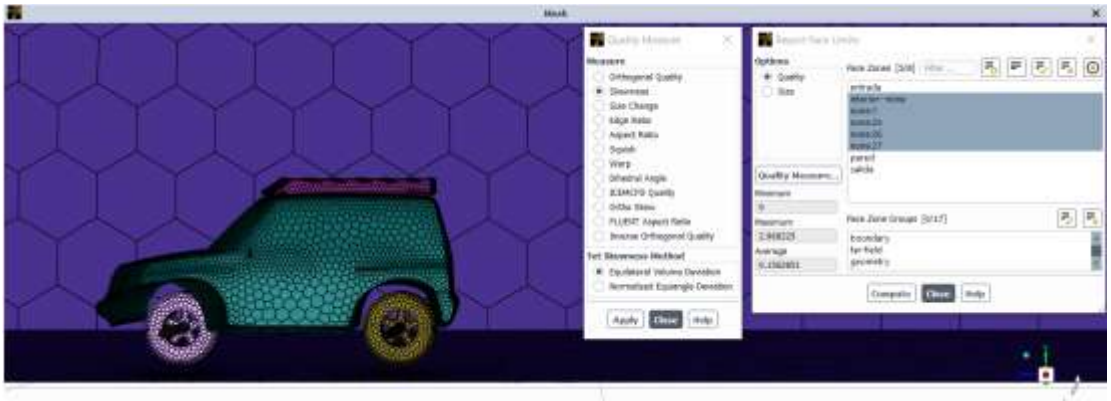
Figura 58. Calidad de malla volumétrica de acuerdo al criterio de Orthogonal Quality del modelo D0



4.3. Calidad de Malla Superficial para el Modelo D1

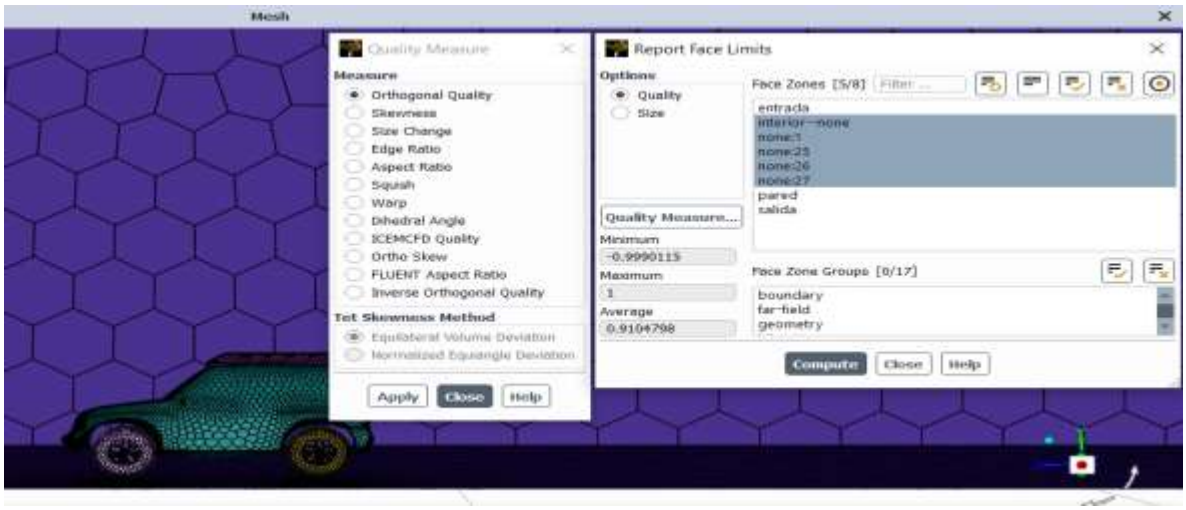
Para el modelo D1 obtenemos un valor promedio de calidad de malla superficial de 0,15 que de acuerdo a Skewness estamos dentro de un rango excelente (**Figura 59**).

Figura 59. Calidad de malla superficial de acuerdo a Skewness del modelo D1



La calidad ortogonal de la malla presenta un valor promedio de 0.91 dando una calidad excelente (**Figura 60**).

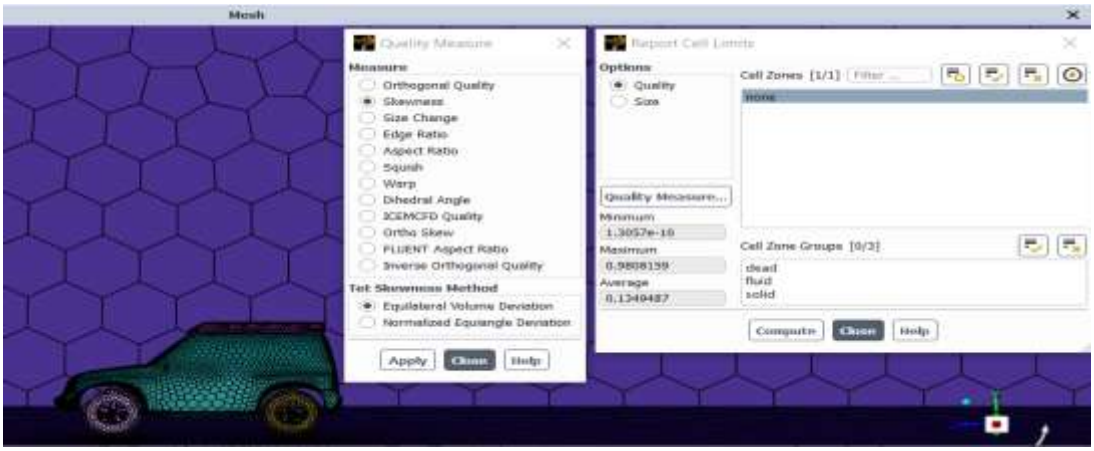
Figura 60. Calidad de malla superficial de acuerdo al criterio de Orthogonal Quality del modelo D1



4.4. Calidad de Malla Volumétrica para el Modelo D1

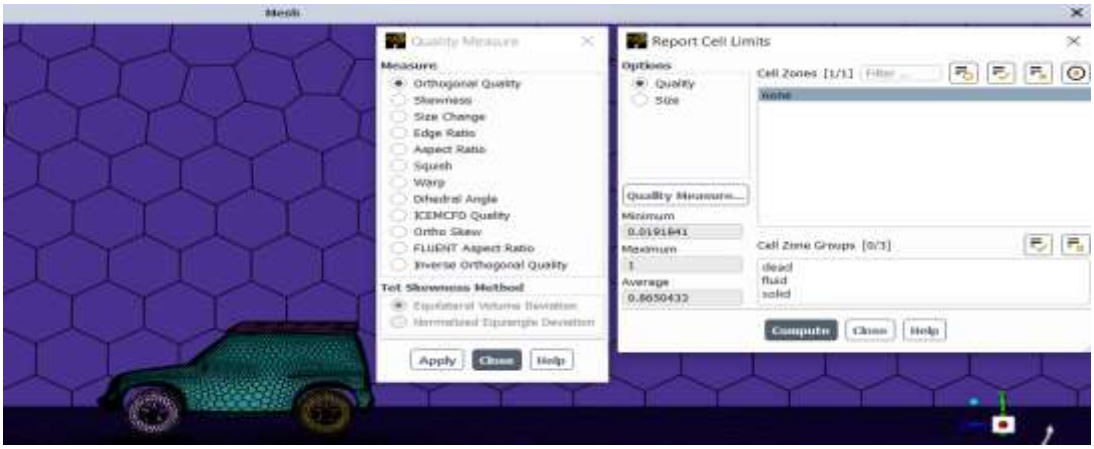
Para el modelo D1 obtenemos un valor promedio de calidad de malla volumétrica de 0,13 que de acuerdo a Skewness estamos dentro de un rango excelente (**Figura 61**).

Figura 61. Calidad de malla volumétrica de acuerdo a Skewness del modelo D1



La calidad ortogonal de la malla presenta un valor promedio de 0.86 dando una calidad muy buena (**Figura 62**).

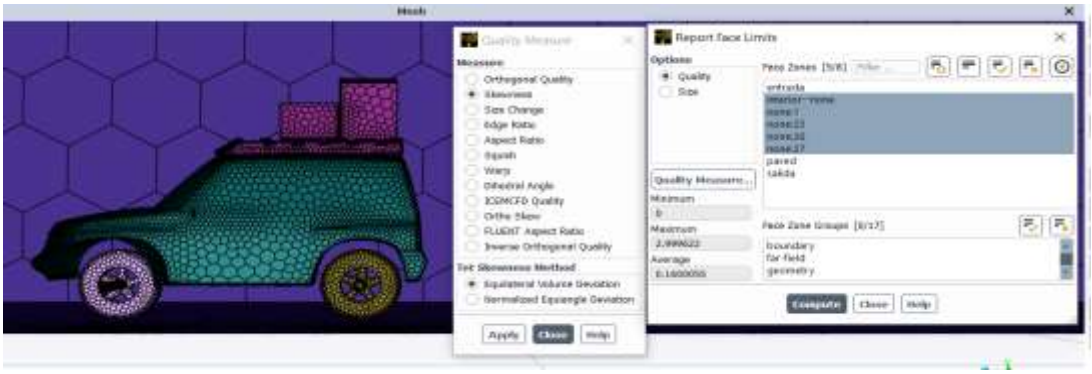
Figura 62. Calidad de malla volumétrica de acuerdo al criterio de Orthogonal Quality del modelo D1



4.5. Calidad de Malla Superficial para el Modelo D2

Para el modelo D2 obtenemos un valor promedio de calidad de malla superficial de 0,16 que de acuerdo a Skewness estamos dentro de un rango excelente (**Figura 63**).

Figura 63. Calidad de malla superficial de acuerdo a Skewness del modelo D2



La calidad ortogonal de la malla presenta un valor promedio de 0.90 dando una calidad muy buena (**Figura 64**).

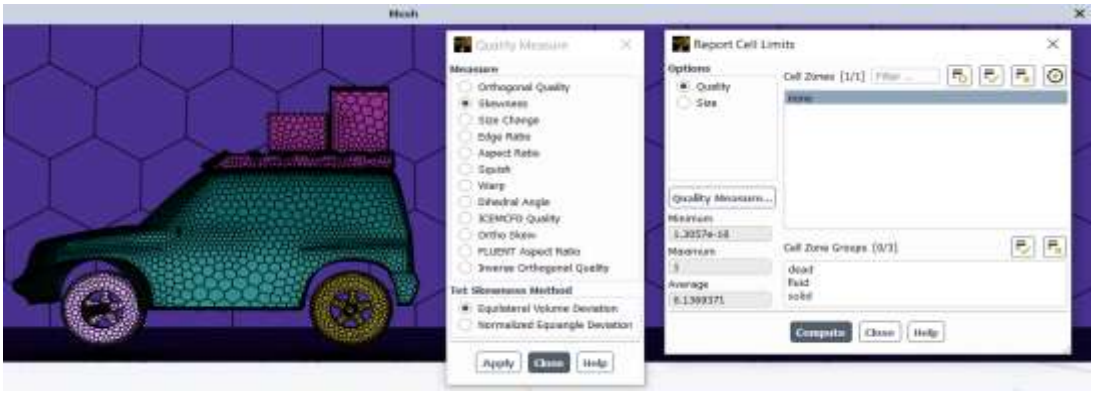
Figura 64. Calidad de malla volumétrica de acuerdo al criterio de Orthogonal Quality del modelo D2



4.6. Calidad de Malla Volumétrica para el Modelo D2

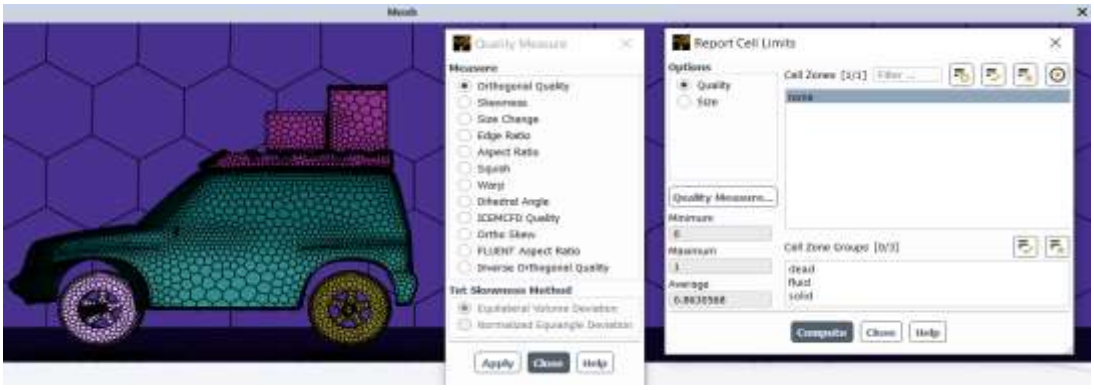
Para el modelo D2 obtenemos un valor promedio de calidad de malla volumétrica de 0,13 que de acuerdo a Skewness estamos dentro de un rango excelente (**Figura 65**).

Figura 65. Calidad de malla volumétrica de acuerdo a Skewness del modelo D2



La calidad ortogonal de la malla presenta un valor promedio de 0.86 dando una calidad muy buena (**Figura 66**).

Figura 66. Calidad de malla volumétrica de acuerdo al criterio de Orthogonal Quality del modelo D2

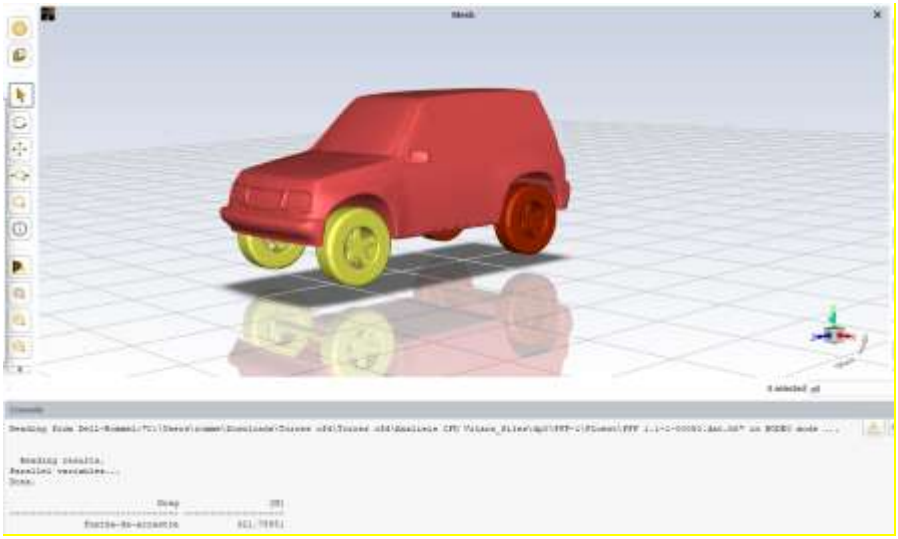


4.7. Resultados de las fuerzas aerodinámicas

En esta sección se detallan los resultados obtenidos tras la simulación FEM con los cuales se pueda evaluar el comportamiento de uno y otro modelo ante condiciones CFD.

4.7.1. Fuerza de arrastre Modelo D0

Figura 67. Fuerza de Arrastre Modelo D0



La evaluación aerodinámica realizada indica que la fuerza de arrastre alcanza un valor de 321 N. Esta magnitud describe la resistencia que el flujo de aire ejerce sobre el cuerpo durante su desplazamiento. En otras palabras, es la “mano invisible” del viento que se aferra a la superficie y se opone al avance. Este dato permitiría estimar pérdidas energéticas, comparar configuraciones y ajustar la geometría para mejorar el rendimiento (

Figura **67**).

4.7.2. Coeficiente de arrastre Modelo D0

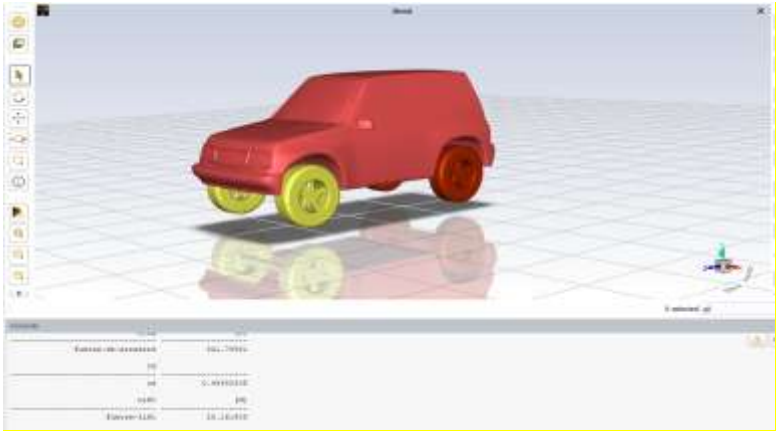
Figura 68. Coeficiente de Arrastre Modelo D0



Junto con esto, se obtuvo un coeficiente de arrastre de 0.49, un valor que resume la eficiencia aerodinámica de la forma analizada. Este coeficiente sirve como brújula para interpretar cómo cambios en textura, ángulo o contorno pueden reducir la resistencia y afinar el comportamiento del sistema (Figura 68).

4.7.3. Fuerza de Sustentación Modelo D0

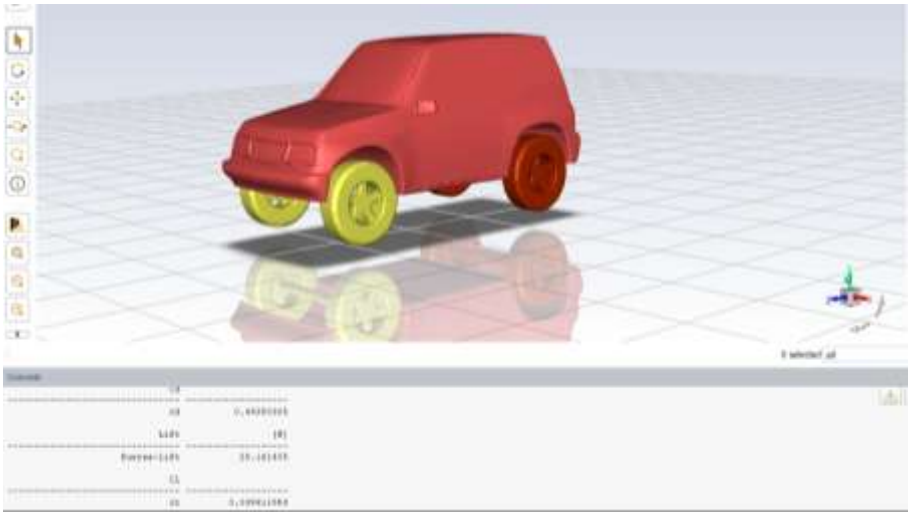
Figura 69. Fuerza de sustentación Modelo D0



Por otra parte, la fuerza de sustentación medida es de 25.16 N. Aunque más modesta en comparación con el arrastre, representa el empuje vertical generado por la interacción entre la superficie y la corriente de aire (Figura 69).

4.7.4. Coeficiente de Sustentación Modelo D0

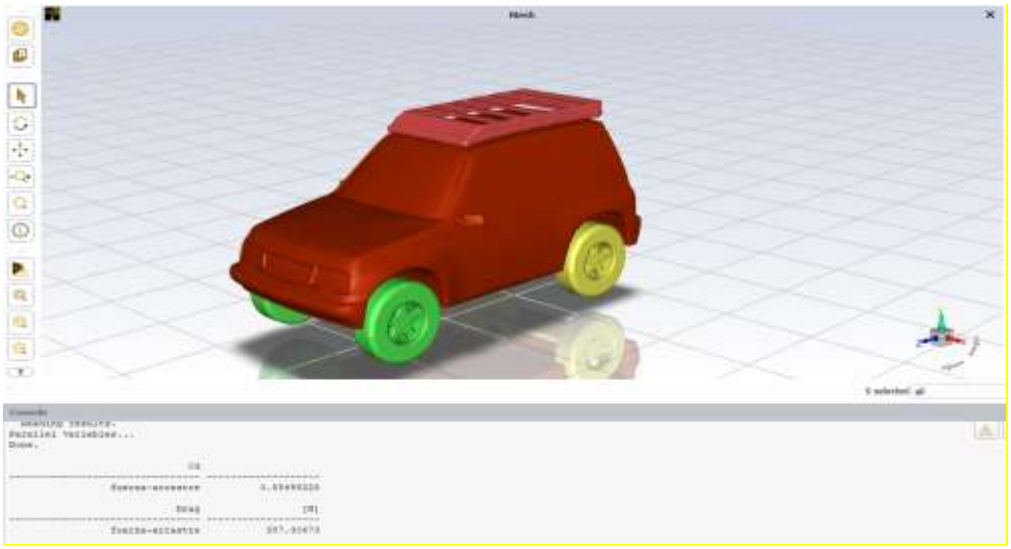
Figura 70. Coeficiente de sustentación Modelo D0



El análisis arrojó un coeficiente de sustentación de 0.038, una cifra pequeña que revela que la geometría estudiada genera un empuje vertical limitado bajo las mismas condiciones de flujo. Este coeficiente funciona como una huella numérica del desempeño aerodinámico en sentido vertical y permite comparar cómo variaciones en ángulo, contorno o velocidad modifican la capacidad del cuerpo para sostenerse frente al aire que lo rodea (Figura 70).

4.7.5. Fuerza de arrastre Modelo D1

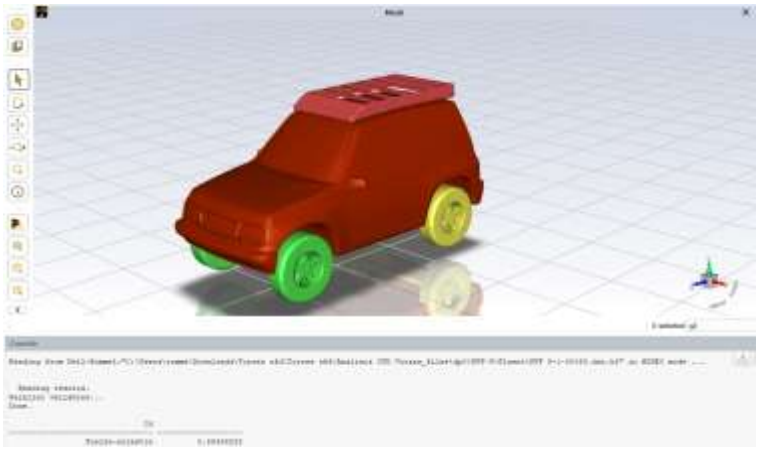
Figura 71. Fuerza de Arrastre Modelo D1



En el análisis aerodinámico realizado, se obtuvo una fuerza de arrastre de 387.30 N, valor que refleja la resistencia que el flujo de aire ejerce sobre el cuerpo durante su desplazamiento. Este resultado es fundamental para evaluar la eficiencia aerodinámica del modelo y determinar las pérdidas de energía asociadas al movimiento. Con este valor, es posible identificar oportunidades de optimización en la geometría, la superficie expuesta y las condiciones del flujo, a fin de reducir la resistencia y mejorar el rendimiento general del sistema (Figura 71).

4.7.6. Coeficiente de arrastre Modelo D1

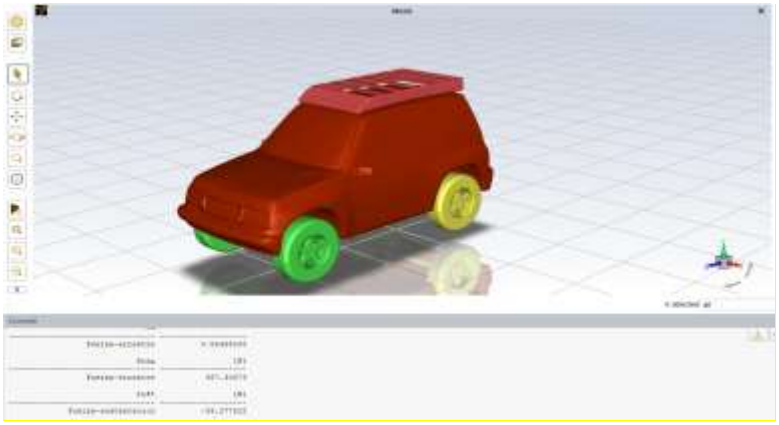
Figura 72. Coeficiente de Arrastre Modelo D1



Además, el coeficiente de arrastre calculado fue de 0.55, un parámetro adimensional que permite comparar la eficiencia aerodinámica del modelo con otros cuerpos similares y analizar su comportamiento bajo distintas condiciones de operación (Figura 72).

4.7.7. Fuerza de Sustentación Modelo D1

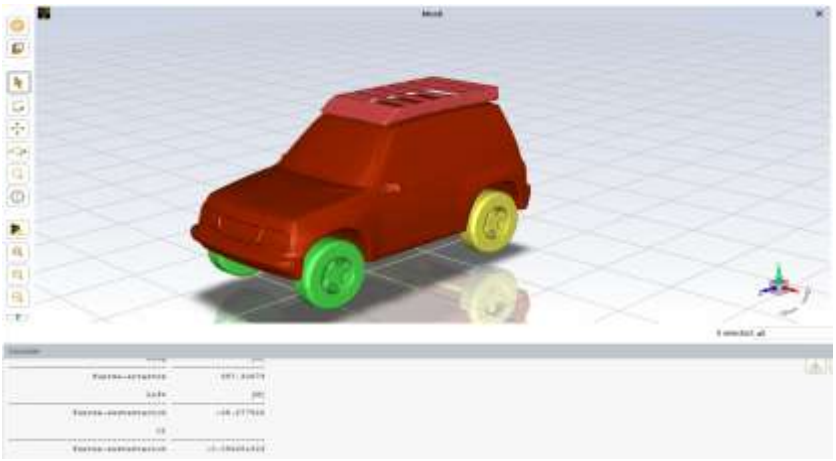
Figura 73. Fuerza de sustentación Modelo D1



Por otro lado, la fuerza de sustentación obtenida fue de 39.27 N, indicando la magnitud del efecto aerodinámico que actúa perpendicular al flujo y que contribuye a mantener el equilibrio o soporte del cuerpo en estudio (Figura 73).

4.7.8. Coeficiente de Sustentación Modelo D1

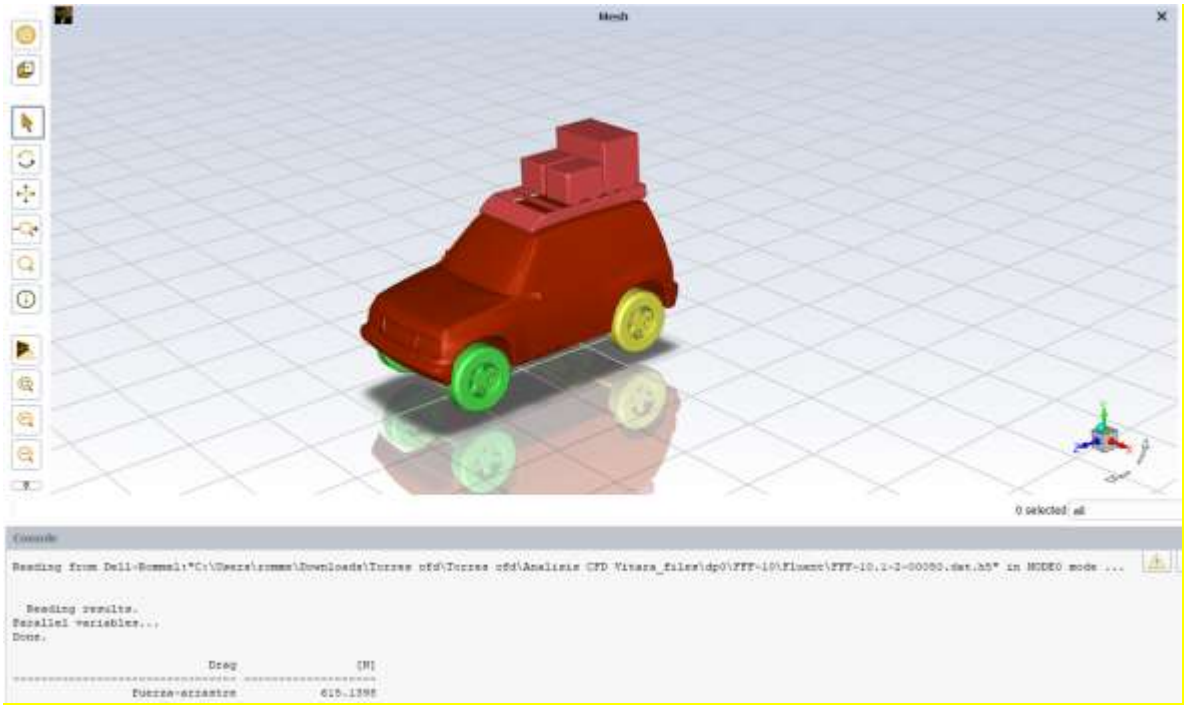
Figura 74. Coeficiente de sustentación Modelo D1



El estudio obtuvo un coeficiente de sustentación de 0.05, lo que indica que la forma evaluada produce una cantidad muy reducida de empuje vertical. Este valor actúa como un indicador directo de la eficiencia con la que la superficie transforma el flujo de aire en soporte, y sirve como punto de comparación para futuras modificaciones. Con él se puede juzgar si ajustes en el ángulo de ataque, la curvatura o la velocidad del flujo podrían mejorar la capacidad de generar sustentación en condiciones similares (Figura 74).

4.7.9. Fuerza de arrastre Modelo D2

Figura 75. Fuerza de Arrastre Modelo D2



La simulación aerodinámica arroja una fuerza de arrastre de 615.13 N, lo que indica que el vehículo enfrenta una resistencia considerable al desplazarse a través del aire. Este valor refleja la magnitud de la fuerza opuesta al movimiento longitudinal del automóvil y es determinante en su eficiencia energética y comportamiento dinámico a altas velocidades. Generalmente un arrastre de esta magnitud se debe a la presencia de regiones o áreas considerable de choque contra el aire que para este caso es la carga sobre la parrilla (**Figura 75**).

4.7.10. Coeficiente de arrastre Modelo D2

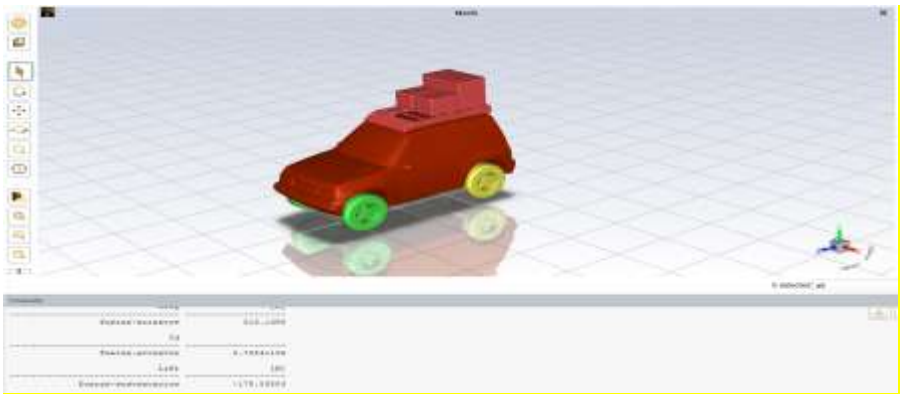
Figura 76. Coeficiente de Arrastre Modelo D2



El coeficiente de arrastre (Cd) obtenido es de 0.72**,** un valor elevado debido a la presencia de cara sobre el techo generando un nivel significativo de oposición al avance. Un Cd de este orden implica que el flujo de aire no se desliza con fluidez alrededor de la carrocería, generando posibles turbulencias y zonas de presión que elevan la resistencia (**Figura 76**).

4.7.11. Fuerza de sustentación Modelo D2

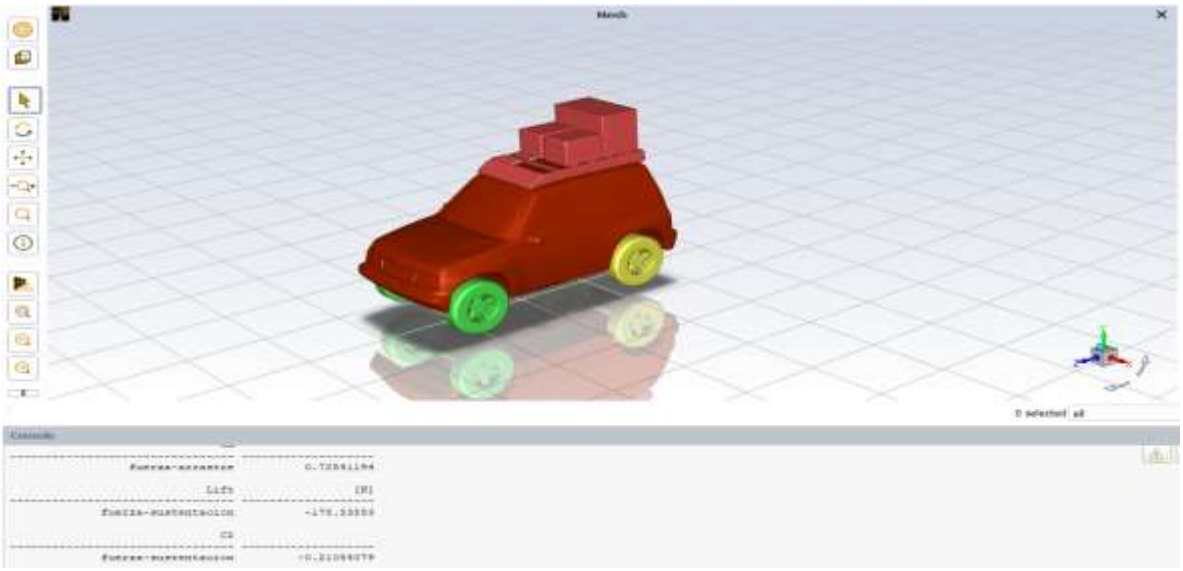
Figura 77. Fuerza de sustentación Modelo D2



La fuerza de sustentación calculada es de –178.53 N, lo que representa una fuerza descendente que actúa sobre el vehículo. Este valor negativo indica que el flujo de aire contribuye a aumentar la adherencia al pavimento, mejorando la estabilidad y el control dinámico, especialmente durante maniobras de alta velocidad (**Figura 77**).

4.7.12. Coeficiente de sustentación Modelo D2

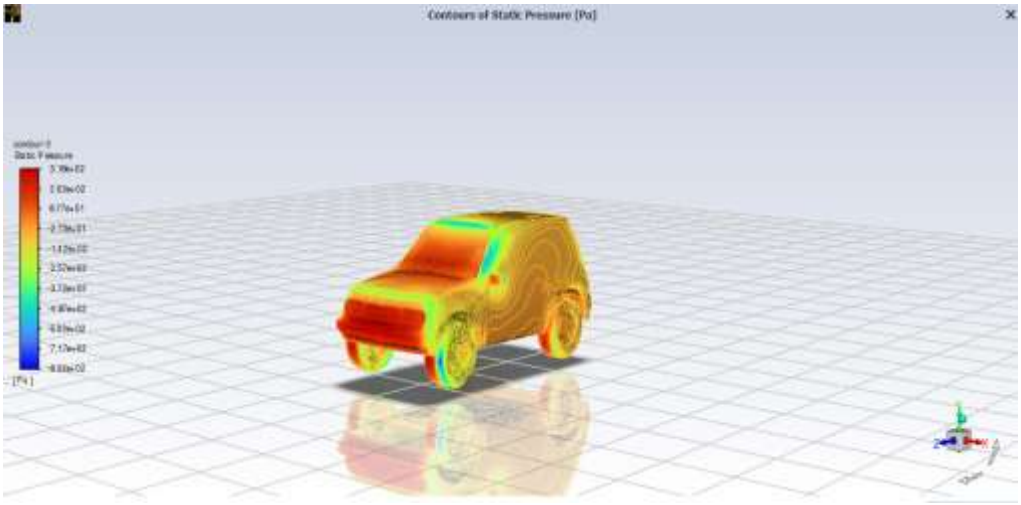
Figura 78. Coeficiente de sustentación Modelo D2



El coeficiente de sustentación (Cl) obtenido es de –0.21, evidenciando una tendencia aerodinámica hacia la generación de “downforce”. Este valor negativo es indicativo de un diseño que canaliza el flujo de aire para presionar el vehículo contra el suelo, mejorando la estabilidad vertical (**Figura 78**).

4.7.13. Zonas de Distribución de Presión Modelo D0

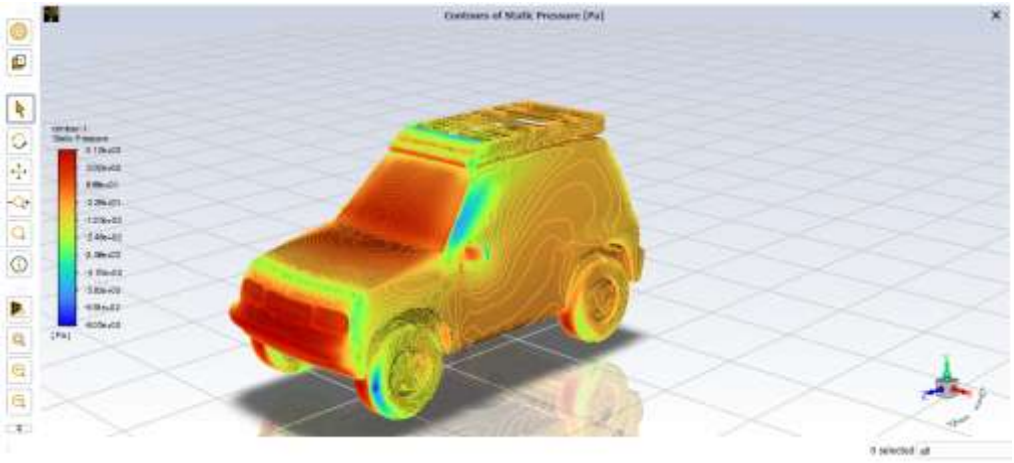
Figura 79. Zona de distribución de presión Modelo D0



Se observa que la zona de mayor presión es la parte delantera del vehículo, este resultado era el esperado ya que es la primera zona en contacto. La presión obtenida en la mayoría del vehículo es de 142 [Pa], la zona de mayor presión presenta un valor de 318 [Pa] (Figura 79).

4.7.14. Zonas de Distribución de Presión Modelo D1

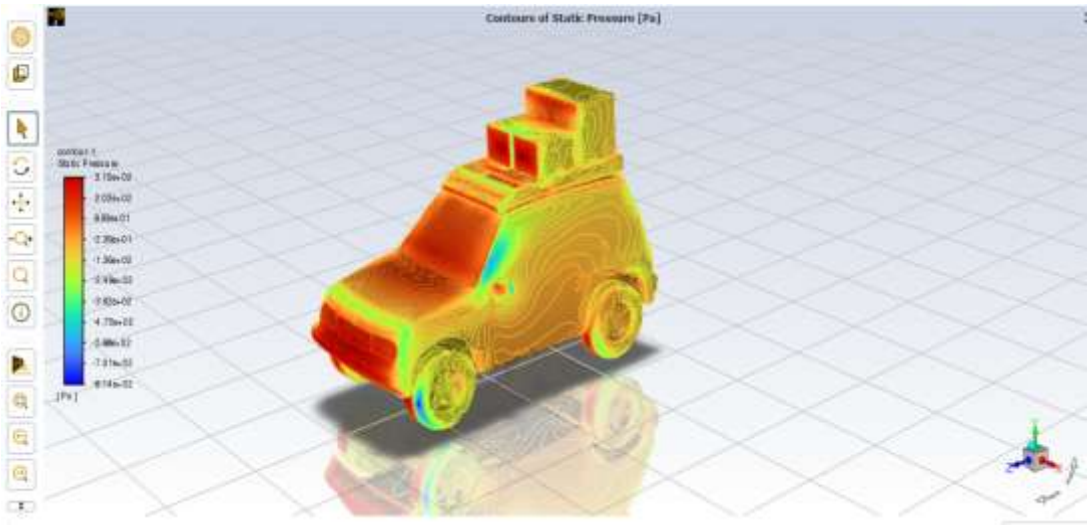
Figura 80. Zona de distribución de presión Modelo D1



Para el modelo D1 la zona de mayor presión también es la parte delantera del vehículo, la presión obtenida en la mayoría del vehículo es de 229 [Pa], la zona de mayor presión presenta un valor de 312 [Pa] (Figura 80).

4.7.15. Zonas de Distribución de Presión Modelo D2

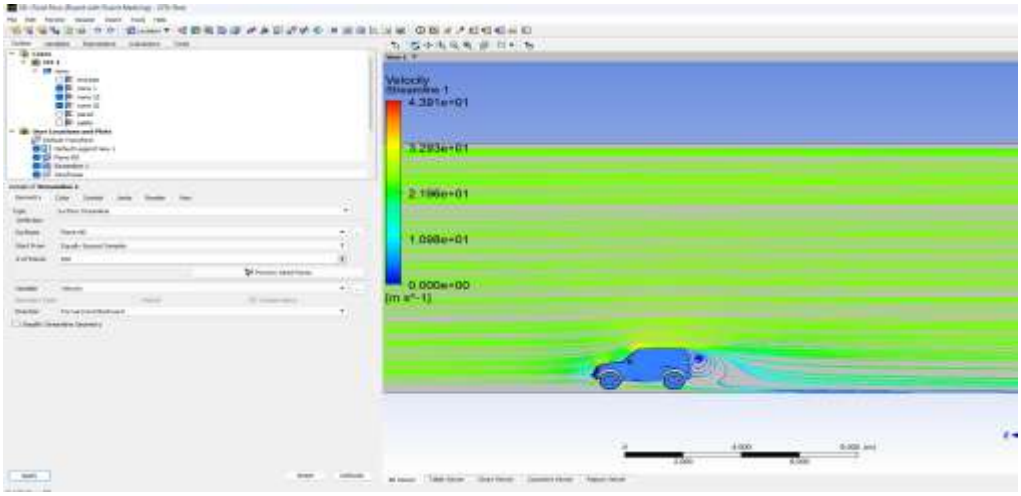
Figura 81. Zona de distribución de presión Modelo D2



Para el modelo D2 la zona de mayor presión de igual forma es la parte delantera del vehículo, la presión obtenida en la mayoría del vehículo es de 136 [Pa], la zona de mayor presión presenta un valor de 315 [Pa] (**Figura 81**).

4.7.16. Zonas de Distribución de flujo de aire Modelo D0

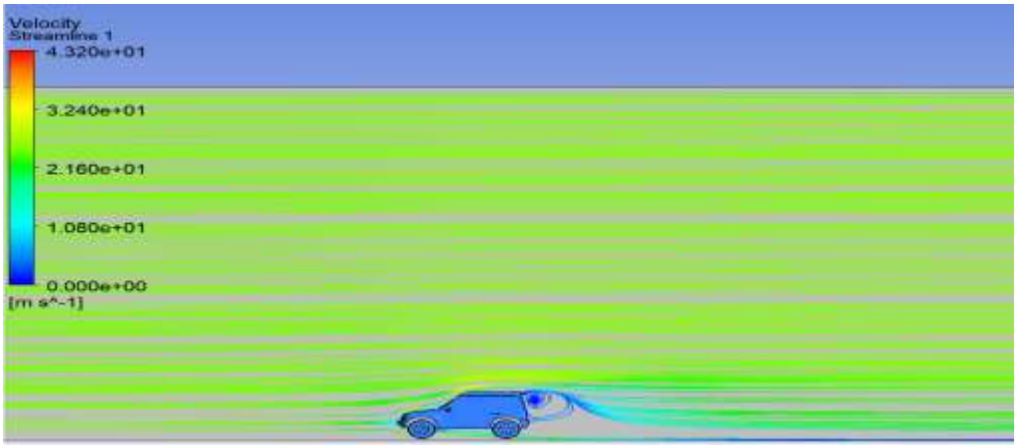
Figura 82. Vectores de flujo de velocidad en Modelo D0



En la **Figura 82** se puede ver el comportamiento del flujo de aire al chocar contra el vehículo, en la cual la velocidad máxima es de 44 m /s en la parte mas alta del vehículo (Figura 82).

4.7.17. Zonas de Distribución de flujo de aire Modelo D1

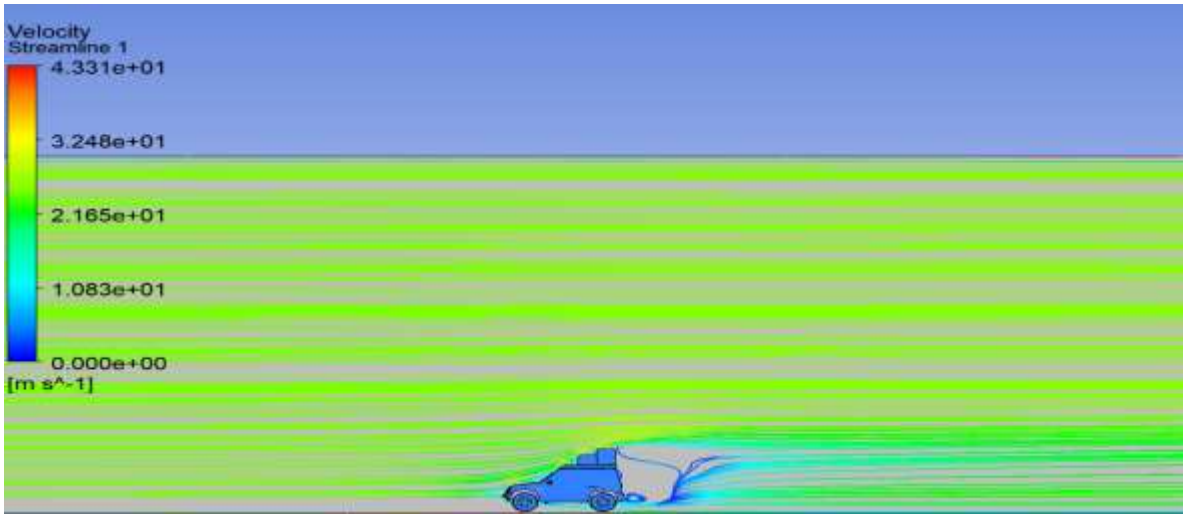
Figura 83. Vectores de flujo de velocidad en Modelo D1



En la siguiente imagen podemos ver el comportamiento del flujo de aire al chocar contra el vehículo, en la cual la velocidad máxima es de 43 m /s en la parte mas alta del vehículo (Figura 83).

4.7.18. Zonas de Distribución de flujo de aire Modelo D2

Figura 84. Vectores de flujo de velocidad en Modelo D2



En la siguiente imagen podemos ver el comportamiento del flujo de aire al chocar contra el vehículo, en la cual la velocidad máxima es de 43,3 m /s en la parte mas alta del vehículo (**Figura 84**).

4.8. Resultados de la Calidad de Malla

En la **Tabla 4** se muestra los resultados de forma resumida de la calidad de malla que se ha venido obteniendo realizando los análisis de cada uno de los modelos.

Tabla 4. Resultados de calidad de malla superficial y volumétrica

	Promedio		Criterio	
Modelo	**Skewness**	**Orthogonal Quality**	**Skewness**	**Orthogonal Quality**
Superficial D0	0,07	0,96	excelente	excelente
Volumétrico D0	0,05	0.94	excelente	Muy buena
Superficial D1	0,15	0,91	excelente	Muy buena
Volumétrico D1	0,13	0,86	excelente	Muy buena
Superficial D2	0,16	0,90	excelente	Muy buena
Volumétrico D2	0,13	0,86	excelente	Muy buena

De la tabla se puede apreciar que la calidad de malla para todos los casos permite dar confiabilidad a los resultados, por tanto, a los respectivos análisis aerodinámicos.

4.9. Resultados de las fuerzas aerodinámicas

La **Tabla 5** muestra los resultados de las fuerzas aerodinámicas de forma resumida que se ha venido obteniendo una vez realizando los análisis de cada uno de los modelos.

Tabla 5. Resultados aerodinámicos de cada modelo

Variable	D0	D1	D2
Fuerza de arrastre Fd (Newton)	321,78	387,30	615,13
Coeficiente de arrastre Cd	0,49	0,55	0,72
Fuerza de sustentación Fl (Newton)	25,16	-39,27	-178,53
Coeficiente de sustentación Cl	0,038	-0,05	-0,21

Como se puede apreciar, la implementación de Racks de techo y cargas en la parrilla genera mayores fuerzas de arrastre. Del modelo D0 al D1 la fuerza de arrastre a aumentado en un 20.36%, es decir con la implementación de una parrilla sin carga. Del modelo D0 al D2, es decir con la parrilla cargada de maletas la fuerza aumenta un 91.1%. Por último podemos ver un aumento de la fuerza de arrastre del 58,8% del modelo D1 al D2. Esta fuerza se puede interpretar como la resistencia que el flujo de aire ejerce sobre los cuerpos durante el desplazamiento y supondrá aumento de carga hacia el motor.

Respecto a los coeficiente de arrastre también se puede apreciar un aumento para los modelos con parrilla y con carga respcto a modelo del vehículo sin aditamentos. Del D0 al D1 podemos ver un aumento del 12,24% y del D0 al D2 podemos ver un aumento de 46,93%, finalmente se aprecia un aumento del 30,9% para el modelo desde el D1 al D2.

Un Cd bajo indica que el vehículo corta el aire con menor resistencia, mientras que un Cd alto señala que el flujo de aire encuentra más oposición al desplazarse alrededor de la carrocería, para tener idea de ciertos rangos de valores se menciona que un Cd bajo ($\approx 0.20 – 0.30$) es típico de autos deportivos o eléctricos optimizados, con líneas suaves, superficies limpias y buena

integración de componentes aerodinámicos, un Cd medio (≈ 0.30 – 0.40) se observa en automóviles convencionales o SUV y un Cd alto (> 0.40) puede presentarse en vehículos con geometrías menos aerodinámicas, como camiones o autos sin optimización de flujo.

Respecto a los valores de Fuerza de sustentación y coeficientes de sustentación también vemos un incremento para los modelos D1 y D2 respecto al D0. Estas fuerzas y coeficientes al ser negativos se traducen como una carga vertical que actúa sobre el vehículo y que entre más aditamentos supondrá más carga vertical hacia abajo lo que podría generar una presión descendente, contribuyendo a una mayor estabilidad dinámica. Una fuerza descendente de esta magnitud favorece la tracción sin recurrir al incremento del peso total del automóvil, lo cual es beneficioso para lograr un comportamiento más seguro y estable.

Estos coeficientes de sustentación funcionan como una huella numérica del desempeño aerodinámico en sentido vertical y permite comparar cómo variaciones en ángulo, contorno o velocidad modifican la capacidad del cuerpo para sostenerse frente al aire que lo rodea.

4.10. Potencia y torque necesario para vencer la fuerza de arrastre

La Tabla 6 muestra los valores respecto al área frontal para cada modelo. Estos datos se han obtenido del software y son necesarios para poder calcular la potencia y torque necesario para vencer la fuerza de arrastre.

Tabla 6. Área frontal de cada modelo

Modelo	**Área frontal**
D0	2,64 m^2
D1	4,72 m^2
D2	5,49 m^2

Se usa la fórmula que se detalla a continuación y se modifican los valores de área frontal y el coeficiente de arrastre.

$$Potencia\ necesaria = \frac{1}{2} Cd.Af.\rho.v^3$$

Donde:

Cd = coeficiente de arrastre

Af = área frontal

ρ = densidad del fuido expresada en (kg/m^3)

v = velocidad del fluido expresada en m/s

4.10.1. Potencia necesaria para modelo D0

$$P\ necesaria = \frac{1}{2} * 0{,}49 * 2{,}64m^2 * 0.948 \frac{kg}{m^3} * 25^3 \frac{m^3}{s^3}$$

$$P\ necesaria = 9580{,}72\text{W}$$

$$P\ Necesaria = 12{,}8\ \text{HP}$$

4.10.2. Potencia necesaria para modelo D1

$$P\ necesaria = \frac{1}{2} * 0{,}55 * 4{,}72m^2 * 0.948\frac{kg}{m^3} * 25^3\frac{m^3}{s^3}$$

$$P\ Necesaria = 19226{,}62\text{W}$$

$$P\ Necesaria = 25{,}8\ \text{HP}$$

4.10.3. Potencia necesaria para modelo D2

$$P\ Necesaria = \frac{1}{2} * 0{,}72 * 5{,}49m^2 * 0.948\frac{kg}{m^3} * 25^3\frac{m^3}{s^3}$$

$$P\ Necesaria = 29275{,}42\text{W}$$

$$P\ Necesaria = 39{,}2\ \text{HP}$$

Por lo que podemos ver respecto a la potencia necesaria, se evidencia que la carga y parrilla como aditamento al vehículo implica mayor potencia para poder vencer la fuerza de arrastre

Se usa la fórmula que se detalla a continuación y se utilizó la fuerza de arrastre y radio de la llanta en metros

$$Torque = Fd * r$$

Donde:

T= Torque en N*m

Fd= Fuerza de Arrastre

r= radio de la llanta en metros

La medida de la llanta del Chevrolet Vitara es 205/75 R15 indica que el neumático posee un ancho de 205 mm, un perfil equivalente al 75 % de dicho ancho y un rin de 15 pulgadas. A partir de estos datos se calculó el diámetro total de la llanta y posteriormente su radio, obteniendo un valor de **0,34425 m**, el cual fue empleado en la ecuación correspondiente para el análisis del torque

4.10.4. Torque necesario para el Modelo D0

$$Torque = Fd * r$$

$$Torque = 321.78N * 0.34425m$$

$$Torque = 110.77\ Nm$$

4.10.5. Torque necesario para el modelo D1

$$Torque = Fd * r$$

$$Torque = 387.30N * 0.34425m$$

$$Torque = 133.32\ Nm$$

4.10.6. Torque necesario para el modelo D2

$$Torque = Fd * r$$

$$Torque = 615.13N * 0.34425m$$

$$Torque = 211.75\ Nm$$

Respecto al torque calculado, se evidencia que la incorporación del portaequipaje y la carga aumenta la exigencia mecánica del vehículo, debido a que se requiere un mayor torque en la rueda para vencer la fuerza de arrastre. El modelo D2 presenta el valor más alto, con 211,76 N·m, lo cual confirma que la carga adicional incrementa la resistencia aerodinámica y, por ende, el esfuerzo necesario para mantener la velocidad de desplazamiento.

5. CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Con los valores de fuerza de arrastre (321.78N, 387.30N y 615.13N para los diseños D0, D1 y D2 respectivamente), es posible identificar oportunidades de optimización en la geometría, la superficie expuesta y las condiciones del flujo, a fin de reducir la resistencia y mejorar el rendimiento general del sistema.

La variación de los valores de coeficiente de arrastre (0.49, 0.55 y 0.72 para los diseños D0, D1 y D2 respectivamente), sirven como brújula para interpretar cómo cambios en textura, ángulo o contorno pueden reducir la resistencia y afinar el comportamiento del sistema.

El Cd del modelo D0 presenta un valor superior a los 0.40 particular de vehículos con pocas características aerodinámicas o con baja optimización de flujo como es el caso del Vitara clásico y que al aumentar aditamentos y carga como en el caso D1 y D2 genera un aumento considerable del coeficiente y fuerza de arrastre generando más carga para el motor.

Los aditamentos de parrilla y carga generan mayor fuerza de arrastre, pero mayor presión descendente lo que implicaría mayor estabilidad dinámica.

Con el coeficiente de sustentación se puede juzgar si ajustes en el ángulo de ataque, la curvatura o la velocidad del flujo podrían mejorar la capacidad de generar sustentación en condiciones similares.

Los resultados determinan que necesito mayor potencia para vencer la fuerza de arrastre (12.8HP, 25.8HP y 39.2HP para los diseños D0, D1 y D2 respectivamente), lo que conlleva a un mayor consumo de combustible, menor velocidad máxima, menor aceleración a altas velocidades, mayores exigencias térmicas al motor, reducción en la eficiencia general del vehículo. Por el contrario, tengo mayor presión descendente lo que conlleva a mejor estabilidad dinámica y menor fuerza de rozamiento que vencer.

5.2. Recomendaciones

Analizar nuevas configuraciones geométricas y aerodinámicas de los aditamentos para el vehículo que permitan disminuir la fuerza y el coeficiente de arrastre, con el fin de mejorar la eficiencia energética y reducir las exigencias mecánicas del motor.

Generar alternativas de diseño y ubicación de los aditamentos externos, tales como parrillas, portaequipajes o elementos de carga, con el fin de buscar un equilibrio entre estabilidad dinámica y reducción de resistencia aerodinámica.

Se sugiere implementar estudios complementarios a las simulaciones CFD como pruebas experimentales en túnel de viento, con la finalidad de validar los resultados obtenidos y comparar el comportamiento aerodinámico en diferentes condiciones de operación.

Evaluar materiales, acabados superficiales y configuraciones de contorno que permitan mejor el flujo de aire y, por consiguiente, reducir el coeficiente de arrastre del vehículo.

Realizar estudios enfocados en la relación entre presión descendente y estabilidad dinámica, considerando que un aumento de carga aerodinámica puede mejorar el comportamiento del vehículo, aunque implique mayores requerimientos de potencia.

Analizar cómo influye el incremento de la fuerza de arrastre sobre el consumo de combustible, las emisiones y la eficiencia general del vehículo, especialmente en condiciones de circulación a altas velocidades.

Considerar futuras investigaciones buscando la optimización del coeficiente de sustentación, mediante modificaciones en ángulos, curvaturas y distribución del flujo, con el fin de mejorar el desempeño aerodinámico global.

Considerar si las condiciones térmicas como parámetros adicionales podrían generar el aumento de la resistencia aerodinámica, para de esta forma garantizar un adecuado funcionamiento del vehículo.

Se recomienda que en trabajos futuros se utilice el software LS-DYNA para complementar el análisis aerodinámico realizado, permitiendo evaluar la respuesta estructural del portaequipaje y la carga ante solicitaciones dinámicas e impactos, con el propósito de obtener una caracterización más completa del comportamiento del sistema.

Se recomienda que en futuras investigaciones se empleen los resultados obtenidos mediante ANSYS Fluent para calcular el consumo de combustible y las emisiones de gases contaminantes del vehículo, utilizando la potencia necesaria para vencer la fuerza de arrastre y correlaciones termodinámicas del motor. De esta manera, será posible cuantificar el impacto de la incorporación del portaequipaje y la carga sobre la eficiencia energética y las emisiones de CO_2, proporcionando una evaluación más completa del comportamiento aerodinámico y ambiental del vehículo.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] F. J. Bueche and Eugene. Hecht, *Física General -Décima edición*. 2007.

[2] I. Fraija, "Estudio de la aerodinámica en los vehículos," *Estudio de la aerodinámica en los vehículos*, vol. 4, p. 6, 2006.

[3] R. Resnick and D. Halliday, *Fisica 1*. 2004.

[4] S. A. de las Heras Jiménez, *Mecánica de fluidos en ingeniería*. 2012. doi: 10.5821/ebook-9788476539361.

[5] M. Ortiz Domínguez and A. Cruz Avilés, "Principio de Bernoulli," *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*, vol. 9, no. 18, pp. 58–65, 2022, doi: 10.29057/escs.v9i18.8806.

[6] E. Cumbe and R. Rockwood, "Simulación aerodinámica de un vehículo Toyota Corolla 2005 en un programa de dinámica de fluidos computacional CFD," Universidad Del Azuay, 2009.

[7] R. L. Mott, *Mecánica de fluidos*, Sexta. 2015.

[8] Flottweg, "Viscosidad dinámica y cinemática: definición y ejemplos." Accessed: Jul. 09, 2024. [Online]. Available: https://www.flottweg.com/es/wiki/tecnica-de-separacion/viscosidad-dinamica/

[9] S. Cando, “DISEÑO DE ELEMENTOS AERODINÁMICOS PARA UN VEHÍCULO DE COMPETENCIA UTILIZANDO ANÁLISIS COMPUTACIONAL CFD,” Universidad Técnica del Norte, 2023.

[10] S. Gómez, “Mallado y simulación CFD de automóvil,” Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona, 2017.

[11] J. García, “Diseño y posterior estudio aerodinámico de un alerón trasero de un automóvil de competición,” Universidad de Jaén, 2016.

[12] B. E. Fraga, “Análisis aerodinámico de un camión Hino serie 500 mediante la inclusión de un alerón en el techo de la cabina,” Universidad Internacional SEK, 2017.

[13] J. Xamán, *Dinámica De Fluidos Computacional Para Ingenieros*. 2016.

[14] E. Montalvo, “Análisis y optimización en el diseño mediante CFD de la bomba centrifuga del sistema de refrigeración del motor kubota V3307, para fabricación nacional del elemento.,” Universidad Internacional SEK, 2017.

[15] N. Badano and A. Menéndez, “Evaluación De Metodologías Para La Modelación Reynolds-Averaged Navier-Stokes (Rans) De La Capa Límite En Conductos Circulares,” *Mecánica Computacional Vol*, vol. XXXIII, no. September 2014, pp. 23–26, 2014.

[16] J. Alvear and G. Sánchez, “Análisis Dinámico de Fluidos Computacional CFD Aplicado En el Rompevientos de los Trailers de Competencia.,” Universidad Técnica del Norte, 2023.

[17] J. Alegre Ituarte, “Análisis CFD de la influencia de la aerodinámica en el consumo energético de vehículos en formación,” Jul. 2022.

[18] S. Carenzo, I. Peralta, B. Storti, and A. Albanesi, “Diseño Y Optimizacón Aerodinámica De Un Veículo Solar,” *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, vol. XXXII, pp. 2391–2404, 2013.

[19] C. Valencia, “DISEÑO POR ELEMENTOS FINITOS DE UNA ROTO BOMBA ACCIONADA CON UNA TURBINA PELTON PARA RIEGO DE CULTIVOS EN LOS SECTORES VULNERABLES,” Universidad Técnica de Ambato, 2017.

[20] I. Molina and D. Vilaña, “Simulación numérica de contacto entre superficies con movimiento relativo para predicción de desgastes en cojinetes de fricción de aleación de aluminio,” Escuela Politécnica Nacional, 2018.

[21] ANSYS, “Introduction to ANSYS Meshing: Mesh Quality & Advanced Topics,” 2015.

[22] M. Sosnowski, J. Krzywanski, K. Grabowska, and R. Gnatowska, “Polyhedral meshing in numerical analysis of conjugate heat transfer,” *EPJ Web Conf.*, vol. 180, pp. 4–9, 2018, doi: 10.1051/epjconf/201817002096.

[23] Zore. Krishna *et al.*, “Ansys mosaic poly-hexcore mesh for high-lift aircraft configuration,” *21st Annual CFD Symposium*, no. September, pp. 1–11, 2019.

[24] J. Broad, “Drag Force Analysis of Vehicle Roof Accessories,” University of Southern Queensland, 2019.

[25] Y. Chen and A. Meier, “Fuel consumption impacts of auto roof racks,” *Energy Policy*, vol. 92, pp. 325–333, 2016, doi: 10.1016/j.enpol.2016.02.031.

[26] K.-S. Song, S.-O. Kang, H.-I. Park, J.-D. Kee, K.-H. Kim, and D.-H. Lee, “Study on the Influence of Wheel Arches, Wheels, and Side Mirrors on Aerodynamic Performance of a Fast Cruising Passenger Car,” *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, vol. 20, no. 5, pp. 26–35, 2012, doi: 10.7467/ksae.2012.20.5.026.

[27] H. Chowdhury, F. Alam, I. Khan, V. Djamovski, and S. Watkins, “Impact of vehicle add-ons on energy consumption and greenhouse gas emissions,” *Procedia Eng.*, vol. 49, no. 1, pp. 294–302, 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.10.140.

[28] J. Thomas, S. Huff, and B. West, “Fuel Economy and Emissions Effects of Low Tire Pressure, Open Windows, Roof Top and Hitch-Mounted Cargo, and Trailer,” *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 862–872, 2014, doi: 10.4271/2014-01-1614.

[29] N. G. Zacharof, J. Pavlovic, A. Marotta, and G. Fontaras, “Review of in use factors affecting the fuel consumption and CO2 emissions of passenger cars,” no. March 2017, p. 192, 2016, doi: 10.2790/140640.

[30] J. Álvarez and A. Quilligana, ““ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE CORTE POR OXICORTE Y PLASMA CNC DE ACUERDO A LA NORMA AWS C4.6M:2006 PARA LA EMPRESA MAQUINARIAS ESPÍN,” Universidad Técnica de Ambato, 2022.

[31] I. Hypertherm, “Sistemas de corte - plasma, chorro de agua, láser | Hypertherm.” Accessed: Jul. 12, 2024. [Online]. Available: https://www.hypertherm.com/es/

[32] T. Arias and N. Palomino, “Estandarización del proceso de fabricación de pupitres escolares bajo la norma técnica INEN 2583 en la empresa metal mecánica INMECH,” Universidad Técnica de Cotopaxi, 2023.

[33] O. M. Castellanos-González, A. M. Moreno-Uribe, S. A. Ramón-Ramón, and J. L. Jácome, “Evaluación de la transferencia metálica y estabilidad del proceso GMAW,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 20, no. 3, pp. 47–60, 2021, doi: 10.18273/revuin.v20n3-2021003.

[34] Fundación Ascamm Centre Tecnologic, “Técnicas de doblado,” 2017.

[35] M. L. Castro *et al.*, “Simulación numérica del proceso de doblado de placas de aluminio,” no. 7, pp. 1–5, 2023.

[36] J. R. Duflou, J. Váncza, and R. Aerens, “Computer aided process planning for sheet metal bending: A state of the art,” *Comput. Ind.*, vol. 56, no. 7, pp. 747–771, Sep. 2005, doi: 10.1016/J.COMPIND.2005.04.001.

[37] Y. M. Huang and D. K. Leu, “Effects of process variables on V-die bending process of steel sheet,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 40, no. 7, pp. 631–650, Jul. 1998, doi: 10.1016/S0020-7403(97)00083-0.

[38] SHINING, “EINSTAR.” Accessed: May 07, 2024. [Online]. Available: https://www.einstar.com/

[39] J. Alegre, “Análisis CFD de la influencia de la aerodinámica en el consumo energético de vehículos en formación,” pp. 1–71, May 2022.

7. Anexos

Colocación de marcadores



Escaneo de la parte frontal del capó



Escaneo de la compuerta posterior

