

# ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

Estudio Aerodinámico De Tres Alternativas De Carrocería Para Un Vehículo Eléctrico Utilitario

De Tres Ruedas Monoplaza

Angélica Melissa Gómez Coneo

David Fernando Nieto Gómez

Trabajo De Grado Para Optar Al Título De Ingeniero Mecánico

Director

Jabid Eduardo Quiroga Méndez

Doctor En Ingeniería Mecánica

Codirector

William Pinto Hernández

Doctor En Ciencias De Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela De Ingeniería Mecánica

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2024

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

### **Dedicatoria**

*Dedico de manera especial a Leidy Graciela Gómez Coneo, que Dios te tenga en su gloria y ahora un ángel en mi vida, siendo mi principal motivación para mis objetivos, que merecías estar presente en este momento de mi vida, por demostrarme de lo que es capaz el amor incondicionalmente de una hermana y de enseñarme, aún en tu ausencia, de lo que yo puedo lograr. De mí para ti hasta el cielo.*

**Angélica Melissa Gómez Coneo**

*Dedico este logro a mi madre, Nelly Luz Gómez Joya, quien además de formarme con valores y respeto ha sido mi principal apoyo en cada una de mis decisiones. Esta tesis de grado es un tributo a ti y a tu constante sacrificio. Es un reflejo de la educación que me has inculcado desde pequeño, valorando la importancia del conocimiento y la superación personal. Gracias por enseñarme que no hay límites para alcanzar nuestros sueños.*

*Además, Hoy, al culminar esta etapa significativa en mi vida, quiero dedicar estas palabras a la persona que siempre estará presente en mi corazón: mi querido padre, quien aunque no se encuentre físicamente a mi lado, su espíritu y su amor perduran en cada paso que doy. Alonso Nieto Torra, esta tesis de grado es un tributo a tu memoria, un reflejo de los valores que me inculcaste y el fruto de tu constante apoyo y aliento. Cada logro que alcance en mi vida, siempre te lo dedicaré a ti, mi amado padre*

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

**David Fernando Nieto Gómez**

### **Agradecimientos**

Agradecemos a Dios, por ser el principal guía en nuestro camino y permitirnos terminar y gozar de nuestras metas.

A nuestros padres quienes siempre nos han proporcionado un soporte incondicional para todas nuestras metas personales y académicos. Siempre nos han alentado a perseguir nuestras metas y nunca abandonarlas frente a las adversidades.

A nuestros hermanos que siempre han estado junto a nosotros y de alguna forma u otra brindando su motivación, siendo unos guías tanto durante toda la vida.

los profesores que han sido parte de mi camino universitario, quiero agradecerles por brindarnos el conocimiento que necesitábamos para llegar a donde estamos hoy.

A la Universidad Industrial de Santander, que fue nuestra alma Mater durante todo este proceso y nos permitió desarrollarnos de manera integral con bases humanas desde un enfoque profesional.

A todos nuestros familiares, por su apoyo.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
1. Planteamiento del Problema .....	20
2. Objetivos .....	24
2.1. Objetivo general.....	24
2.2. Objetivos específicos .....	24
3. Marco teórico .....	25
3.1. Análisis de la información recopilada.....	25
3.1.1. Libro.....	25
3.1.2. Artículo .....	25
3.1.3. Proyecto de grado .....	25
3.2. Marco conceptual.....	26
3.2.1. La carrocería .....	26
3.2.2. Tipos de carrocería.....	26
3.2.3. Partes de la C1 del vehículo para el análisis aerodinámico .....	28
3.2.4. Fundamento de análisis aerodinámico en los vehículos .....	32
3.2.4.1. Aerodinámica.....	32
3.2.4.2. Principio de Bernulli .....	33
3.2.4.3. Efecto Venturi.....	33
Túneles Venturi en los automóviles.....	33
3.2.4.4. Propiedades de los fluidos .....	34
Viscosidad.....	34

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

Coeficiente de fricción.....	35
3.2.4.5. Tipo de flujos .....	36
Flujo laminar.....	36
Flujo turbulento.....	37
3.2.4.6. Número de Reynolds.....	38
3.2.4.6.1. Diámetro hidráulico .....	39
3.2.5. Aerodinámica de los vehículos .....	40
3.2.5.1. Desarrollo de la aerodinámica del vehículo.....	41
3.2.5.2. Fuerzas aerodinámicas actuando sobre un vehículo .....	42
3.2.5.3. Estudio de la aerodinámica de un producto .....	43
3.2.5.4. Coeficiente aerodinámico .....	45
3.2.5.4.1. Coeficiente de arrastre .....	45
3.2.5.4.2. Coeficiente de empuje lateral $C_y$ .....	48
3.2.5.4.3. Coeficiente de sustentación $C_z$ .....	48
3.2.5.5. Resistencia aerodinámica.....	50
3.2.5.6. ¿Cómo evaluar la calidad aerodinámica de un vehículo?.....	51
3.2.6. Ecuaciones Navier Stokes.....	51
3.2.7. Modelización CFD de flujo turbulento .....	52
3.2.7.1. Modelo de turbulencia de una sola ecuación .....	55
Spalart-Allmaras .....	55
3.2.7.2. Modelos de turbulencia de dos ecuaciones.....	56
Modelo $k - \epsilon$ .....	56

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

Modelo $k - m$ .....	58
Modelo SST $k - m$ (Shear stress transport) .....	58
3.2.8. Método de comparación de los métodos de turbulencia.....	59
4. PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS .....	60
4.1. Alternativa 1: Moro carro eléctrico de tres ruedas.....	60
4.2. Alternativa 2: Vehículo eléctrico cerrado de tres ruedas .....	61
4.3. Alternativa 3: Triciclo eléctrico de carga.....	62
5. MODELACIÓN AERODINÁMICA Y DE FORMA DE LA CARROCERÍA .....	63
5.1. Conceptualización del modelo para las alternativas .....	64
5.2. Objetivos funcionales de las alternativas .....	65
5.3. Alternativa 1: Moto carro eléctrico de tres ruedas.....	66
5.3.1. Lineamientos base de diseños .....	66
5.3.2. Modelado en SolidWorks .....	67
5.3.3. Superficie frontal .....	70
5.4. Alternativa 2: Vehículo eléctrico cerrado de tres ruedas .....	71
5.4.1. Lineamientos base de diseños.....	71
5.4.2. Modelado en SolidWorks .....	72
5.4.3. Superficie frontal .....	75
5.5. Alternativa 3: Triciclo eléctrico de carga.....	75
5.5.1. Lineamientos base de diseños.....	75
5.5.2. Modelado en SolidWorks .....	77
5.5.3. Superficie frontal .....	79

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

6.	ESTUDIO AERODINÁMICO DE LAS ALTERNATIVAS.....	80
6.1.	Parámetros atmosféricos de todas las alternativas de simulación.....	82
6.2.	Configuración de todas las alternativas de simulación (modelo de turbulencia, condiciones de contorno y criterios).....	83
6.2.2.	Condiciones de fronteras de todas las alternativas de simulación .....	85
6.3.	Alternativa 1: Moto carro eléctrico de tres ruedas.....	86
6.3.1.	Geometría.....	86
6.3.1.1.	Volumen de control.....	87
6.3.2.	Mallado .....	88
6.3.3.	Setup .....	90
6.3.4.	Solución .....	90
6.3.4.1.	Control de convergencia .....	90
6.3.5.	Resultados.....	92
6.3.5.1.	Contornos de presión .....	92
6.3.5.2.	Campo vectorial de velocidad.....	93
6.3.5.3.	Cálculos de coeficiente de arrastre sin refinamiento .....	94
6.3.5.4.	Cálculos de coeficiente de arrastre con refinamiento .....	94
6.4.	Alternativa 2: Vehículo eléctrico cerrado de tres ruedas .....	95
6.4.1.	Geometría.....	95
6.4.2.	Mallado .....	96
6.4.3.	Set up .....	96
6.4.4.	Solución .....	97

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

6.4.5.	Resultados .....	97
6.4.5.1.	Contornos de presión .....	97
6.4.5.2.	Campo vectorial de velocidad.....	99
6.4.5.3.	Cálculos de coeficiente de arrastre sin refinamiento .....	100
6.4.5.4.	Cálculos de coeficiente de arrastre con refinamiento .....	100
6.5.	Alternativa 3: Triciclo eléctrico de carga.....	101
6.5.1.	Geometría.....	101
6.5.2.	Mallado .....	102
6.5.3.	Set up .....	102
6.5.4.	Solución .....	103
6.5.5.	Resultados .....	104
6.5.5.1.	Contornos de presión .....	104
6.5.5.2.	Campo vectorial de velocidad.....	106
6.5.5.3.	Cálculos de coeficiente de arrastre sin refinamiento .....	106
6.5.5.4.	Cálculos de coeficiente de arrastre con refinamiento .....	107
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	108
7.1.	Análisis del mallado.....	108
7.1.1.	Malla sin refinamiento .....	108
7.1.1.1.	Alternativa 1.....	108
7.1.1.2.	Alternativa 2.....	110
7.1.1.3.	Alternativa 3.....	112
7.1.2.	Malla con refinamiento .....	114

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

7.1.2.1.	Alternativa 1.....	114
7.1.2.2.	Alternativa 2.....	116
7.1.2.3.	Alternativa 3.....	117
7.2.	Evaluación de alternativas .....	119
7.3.	Análisis de la alternativa ganadora .....	121
7.3.1.	Características de la superficie, capa, límite y contornos de presión.....	121
7.3.2.	Gradientes de velocidad sobre la superficie de la carrocería.....	122
7.3.3.	Variación del coeficiente de arrastre como una función de la velocidad .....	123
7.3.4.	Variación de la potencia de arrastre como una función de la velocidad.....	124
8.	CONCLUSIONES .....	125
9.	RECOMENDACIONES.....	128
10.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	129
11.	ANEXOS .....	135

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

## Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Influencia de los tipos de traseras sobre diferentes coeficientes aerodinámicos.</i> .....	31
Tabla 2 <i>Objetivos funcionales de las tres alternativas</i> .....	66
Tabla 3 <i>Dimensionamiento del vehículo uno</i> .....	66
Tabla 4 <i>Dimensionamiento del vehículo dos</i> .....	71
Tabla 5 <i>Consideraciones finales del vehículo dos</i> .....	71
Tabla 6 <i>Dimensionamiento del vehículo tres</i> .....	75
Tabla 7 <i>Consideraciones finales del vehículo tres</i> .....	76
Tabla 8 <i>Parámetros atmosféricos de la simulación</i> .....	82
Tabla 9 <i>Condiciones de la simulación para el modelo <math>k-\epsilon</math></i> .....	84
Tabla 10 <i>Límite del contorno de todas las alternativas de simulación</i> .....	85
Tabla 11 <i>Resultados del modelado aerodinámico con una velocidad constante de 90 km/h</i> .....	119
Tabla 12 <i>Evaluación de las alternativas de acuerdo a la prioridad de los parámetros técnicos</i> .....	120
Tabla 13 <i>Datos para la gráfica del mallado sin refinamiento</i> .....	135
Tabla 14 <i>Datos para la gráfica del mallado sin refinamiento</i> .....	136
Tabla 15 <i>Datos para la gráfica del mallado sin refinamiento</i> .....	137
Tabla 16 <i>Datos para la gráfica del mallado con refinamiento</i> .....	138
Tabla 17 <i>Datos para la gráfica del mallado con refinamiento</i> .....	139
Tabla 18 <i>Datos para la gráfica del mallado con refinamiento</i> .....	140
Tabla 19 <i>Matriz de Calidad QFD</i> .....	142

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Carrocería de un vehículo</i> .....	26
Figura 2 <i>Incidencia del capot y parabrisas</i> .....	28
Figura 3 <i>Formas usuales de la trasera de vehículos</i> .....	29
Figura 4 <i>Influencia de la pendiente de la superficie trasera en el <math>C_x</math></i> .....	30
Figura 5 <i>Comportamiento del efecto Venturi en los vehículos</i> .....	34
Figura 6 <i>Las etapas de formación de la capa límite</i> .....	35
Figura 7 <i>Comportamiento del flujo laminar</i> .....	36
Figura 8 <i>Comportamiento del flujo turbulento</i> .....	37
Figura 9 <i>Flujo de fluidos incompresibles en tuberías</i> .....	39
Figura 10 <i>Sistema de coordenadas en direcciones de las fuerzas aerodinámicas</i> .....	42
Figura 11 <i>Diferentes coeficientes <math>C_x</math> según su forma</i> .....	47
Figura 12 <i>Valores de coeficientes de arrastre y sustentación para algunas configuraciones</i> .....	49
Figura 13 <i>La ecuación de Navier Stokes</i> Nota: La imagen representa la ecuación de Navier Stokes. <i>Nota:</i> Tomado de: Navier- Stokes Equations (2019) poro Connor (2019) ¿Qué es la ecuación de Navier- Stokes? Definición. Thermal Engineering. ....	52
Figura 14 <i>Flujo turbulento</i> .....	53
Figura 15 <i>Modelización de la dinámica de fluidos computacional del flujo turbulento</i> ..	54
Figura 16 <i>La formulación para la energía cinética turbulenta <math>k</math></i> .....	56

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

Figura 17 <i>La formulación para el índice de disipación turbulenta <math>\epsilon</math></i> .....	57
Figura 18 <i>Coefficientes del modelo <math>k-\epsilon</math></i> .....	58
Figura 19 <i>Moto carro eléctrico de tres ruedas</i> .....	61
Figura 20 <i>Vehículo eléctrico cerrado de tres ruedas</i> .....	61
Figura 21 <i>Triciclo eléctrico de carga</i> .....	63
Figura 22 <i>Acinonyx jubatus</i> .....	64
Figura 23 <i>Vista frontal de la alternativa uno</i> .....	67
Figura 24 <i>Vista posterior de la alternativa uno</i> .....	68
Figura 25 <i>Vista derecha de la alternativa uno</i> .....	68
Figura 26 <i>Vista izquierda de la alternativa uno</i> .....	69
Figura 27 <i>Vista superior e inferior de la alternativa uno</i> .....	69
Figura 28 <i>Área obtenida a través del plano frontal en SolidWorks de la alternativa uno</i>	70
Figura 29 <i>Vista frontal de la alternativa dos</i> .....	72
Figura 30 <i>Vista posterior de la alternativa dos</i> .....	72
Figura 31 <i>Vista derecha de la alternativa dos</i> .....	73
Figura 32 <i>Vista izquierda de la alternativa dos</i> .....	73
Figura 33 <i>Vista superior e inferior de la alternativa dos</i> .....	74
Figura 34 <i>Área obtenida a través del plano frontal en SolidWorks de la alternativa dos</i>	75
Figura 35 <i>Vista frontal de la alternativa tres</i> .....	77
Figura 36 <i>Vista posterior de la alternativa tres</i> .....	77
Figura 37 <i>Vista derecha de la alternativa tres</i> .....	78
Figura 38 <i>Vista izquierda de la alternativa tres</i> .....	78

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

Figura 39 <i>Vista superior e inferior de la alternativa tres</i> .....	79
Figura 40 <i>Área obtenida a través del plano frontal en SolidWorks de la alternativa tres</i>	80
Figura 41 <i>Interfaz del Workbench de ANSYS</i> .....	81
Figura 42 <i>Detalles para la simulación de la alternativa uno</i> .....	84
Figura 43 <i>Condiciones de todas las alternativas de simulación</i> .....	86
Figura 44 <i>Geometría de la alternativa uno sintetizada</i> .....	87
Figura 45 <i>Parámetros establecidos para el volumen de control de la alternativa uno</i> ....	87
Figura 46 <i>Detalles del mallado para la simulación de la alternativa uno</i> .....	89
Figura 47 <i>Modelo mallado para la simulación de la alternativa uno</i> .....	89
Figura 48 <i>Visualización de la zona de estudio para la simulación de la alternativa uno</i>	90
Figura 49 <i>Residuales de convergencia del análisis aerodinámico del vehículo uno</i> .....	91
Figura 50 <i>Contorno de presión para el vehículo uno</i> .....	92
Figura 51 <i>Distribución de presión en el vehículo uno</i> .....	92
Figura 52 <i>Campo vectorial de velocidad en el vehículo uno</i> .....	93
Figura 53 <i>Geometría de la alternativa dos sintetizada</i> .....	95
Figura 54 <i>Modelo mallado para la simulación de la alternativa dos</i> .....	96
Figura 55 <i>Visualización de la zona de estudio para la simulación de la alternativa dos</i>	96
Figura 56 <i>Residuales de convergencia del análisis aerodinámico del modelo dos</i> .....	97
Figura 57 <i>Contornos de presión para el vehículo dos</i> .....	97
Figura 58 <i>Distribución de presión en el vehículo dos</i> .....	98
Figura 59 <i>Campo V vehículo dos</i> .....	99
Figura 60 <i>Geometría de la alternativa tres sintetizada</i> .....	101

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

Figura 61 <i>Modelo mallado para la simulación de la alternativa tres</i> .....	102
Figura 62 <i>Visualización de la zona de estudio para la simulación de la alternativa tres</i> .....	102
Figura 63 <i>Residuales de convergencia del análisis aerodinámico del vehículo tres</i> .....	103
Figura 64 <i>Contorno de presión para el vehículo tres</i> .....	104
Figura 65 <i>Distribución de presión en el vehículo tres</i> .....	105
Figura 66 <i>Campo vectorial de velocidad en el vehículo tres</i> .....	106
Figura 67 <i>Gráfico de número de elementos vs coeficiente de arrastre</i> .....	108
Figura 68 <i>Mallado superficial tipo tetraédrico</i> .....	110
Figura 69 <i>Grafica de número de elementos vs coeficiente de arrastre</i> .....	111
Figura 70 <i>Mallado superficial tipo tetraédrico</i> .....	111
Figura 71 <i>Grafica de número de elementos vs coeficiente de arrastre</i> .....	112
Figura 72 <i>Mallado superficial tipo tetraédrico</i> .....	113
Figura 73 <i>Gráfica de número de elementos vs coeficiente de arrastre</i> .....	114
Figura 74 <i>Áreas superficiales de mayor relevancia</i> .....	115
Figura 75 <i>Gráfica de número de elementos vs coeficiente de arrastre</i> .....	116
Figura 76 <i>Áreas superficiales de mayor relevancia</i> .....	117
Figura 77 <i>Gráfica de número de elementos vs coeficiente de arrastre</i> .....	118
Figura 78 <i>Áreas superficiales de mayor relevancia</i> .....	118
Figura 79 <i>Variación de la fuerza de arrastre en función de los elementos de refinamiento del mallado</i> .....	121
Figura 80 <i>Contorno de presión sobre la carrocería</i> .....	122

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

Figura 81 <i>Gradientes de velocidad sobre la sección específica y análisis visual a su comportamiento .....</i>	122
Figura 82 <i>Variación del coeficiente de arrastre como función de la velocidad .....</i>	124
Figura 83 <i>Variación de la potencia necesaria para vencer la resistencia al arrastre ...</i>	124

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

**Apéndices**

Anexo 1. – Datos de malla.....	135
Anexo 2– Matriz de calidad QFD.....	142
Anexo 3 – Plano general de la alternativa de la carrocería seleccionada (Alternativa 2	144

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

### **Glosario**

**CI:** Carrocería

**CEI:** Carrocería de vehículo eléctrico

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

### Resumen

**Título:** Estudio aerodinámico de tres alternativas de carrocería para un vehículo eléctrico utilitario de tres ruedas monoplaza\*

**Autor:** Angélica Melissa Gómez Goneo y David Fernando Nieto Gómez\*\*

**Palabras Clave:** Diseño de carrocería, Vehículo eléctrico, Aerodinámica

**Descripción:** La tesis tiene como objetivo principal simular CE1 de utilitario de tres ruedas y un asiento, con el propósito de reducir el consumo de potencia debido a la resistencia al aire. Esto tiene como objetivo apoyar el compromiso de la UIS de promover y adaptar el uso de energías limpias para impulsar la movilidad sostenible y proteger el medio ambiente. En primer lugar, se busca simular la CE1 del vehículo eléctrico, que debe incluir tracción trasera, una distancia entre ejes de 1400 mm y cumplir con la velocidad máxima establecida por el código nacional de tránsito terrestre, Además, se busca analizar el rendimiento aerodinámico de tres diseños distintos para un vehículo utilitario de carga de tres ruedas. El objetivo es examinar la interacción entre el flujo de aire y la estructura del vehículo, con el fin de identificar posibles mejoras en la eficiencia aerodinámica y, en consecuencia, reducir el consumo de energía. Finalmente, se llevará a cabo un análisis aerodinámico utilizando el software de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) ANSYS. Este análisis permitirá obtener información detallada sobre el flujo de aire alrededor del vehículo y determinar las áreas de mayor resistencia aerodinámica. Con esta información, se buscará optimizar el diseño de la C1 para maximizar el aprovechamiento de la potencia y buscará alcanzar una disminución sustancial en el consumo de energía. Debido a la resistencia al aire. Se presenta la simulación de la CE1 utilitario de tres ruedas, con el objetivo de reducir el consumo de potencia debido a la resistencia al aire. Se plantean objetivos específicos que incluyen el diseño de la C1, la evaluación del comportamiento aerodinámico y el análisis detallado utilizando el software de CFD.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Ingeniería Mecánica. Director: Jabid Eduardo Quiroga Méndez. Doctor en Ingeniería Mecánica. Codirector: William Pinto Hernández. Doctor en Ciencias de Ingeniería Mecánica.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

**Abstract**

**Title:** Aerodynamic Study of Three Bodywork Alternatives for a Single-Seater Three-Wheeled Electric Utility Vehicle\*

**Author(s):** Angélica Melissa Gómez Goneo and David Fernando Nieto Gómez\*\*

**Key Words:** Bodywork Design, Electric Vehicle, Aerodynamics

**Description:** The main objective of the thesis is to simulate CE1 of a three-wheeled, single-seat utility vehicle, with the purpose of reducing power consumption due to air resistance. This aims to support the commitment of the UIS to promote and adapt the use of clean energy to promote sustainable mobility and protect the environment. First, it seeks to simulate the CE1 of the electric vehicle, which must include rear-wheel drive, a 1400 mm wheelbase and comply with the maximum speed established by the national land traffic code, In addition, it seeks to analyze the aerodynamic performance of three different designs for a three-wheeled cargo utility vehicle. The objective is to examine the interaction between airflow and vehicle structure in order to identify possible improvements in aerodynamic efficiency and, consequently, reduce energy consumption. Finally, an aerodynamic analysis will be carried out using ANSYS Computational Fluid Dynamics (CFD) software. This analysis will allow obtaining detailed information about the air flow around the vehicle and determine the areas of greatest aerodynamic drag. With this information, we will seek to optimize the design of the C1 to maximize power utilization and seek to achieve a substantial decrease in energy consumption. Due to air resistance. In summary, the simulation of the three-wheeled utility CE1 is presented, with the objective of reducing power consumption due to air resistance. Specific objectives are set out including the design of the C1, evaluation of aerodynamic behavior and detailed analysis using CFD software. The end result will be an optimized design that contributes to sustainable mobility and environmental care.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Mechanical Engineering. Director: Jabid Eduardo Quiroga Gómez. PhD in Mechanical Engineering. Co-Director: William Pinto Hernández. PhD in Mechanical Engineering Sciences.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

### **Planteamiento del Problema**

Con el desarrollo del hombre en sociedad se ha visto necesaria la movilización y la expansión. Dicha evolución trae consigo un crecimiento constante de suelos de uso de transporte vial terrestre, a pesar de que se cuente con un sistema de tránsito, se evidencian múltiples problemas viales, que no hace del todo óptimo el transporte, lo que promueve una participación constante de la ingeniería mecánica que tiene por fin la estructura de máquinas, equipos, sistemas mecánicos con el fin de ofrecer una alternativa que permita al ser humano facilitar su vida, disminuyendo su esfuerzo físico y fomentando el desarrollo social y económico. A pesar de que existe un avance tecnológico de automovilismo no se evidencia un alivio a la problemática en el sistema de tránsito de las principales ciudades de Colombia, por lo tanto, resulta necesaria el diseño de una C1 que represente una propuesta de mejora para la movilidad vial.

La configuración estructural y estética de un vehículo eléctrico de tres ruedas monoplaza trae consigo una carrocería más segura, que al ser un vehículo eléctrico utilitario representa una reducción en la contaminación del medio ambiente y favorece la movilidad sostenible al reemplazar vehículos viejos de acarreos o domicilios que contaminan y ocupan espacio, por otra parte, representa un ahorro de consumo de potencia por resistencia al aire.

El bienestar y la comodidad de los ciudadanos se ve directamente afectados por la calidad y la disponibilidad del transporte público en áreas urbanas, pues este arraiga conexiones directas con economía, empleo, salud pública, medio ambiente etc...Según Vasconcellos & Mendoza (2016) El observatorio de Movilidad Urbana (OMU) ha implementado un análisis que se desarrolla durante varios años, este proceso se inició en el año 2010 con 15 áreas metropolitanas

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

y en el año 2016 alcanzó una totalidad de 29, dicho esto, se toma como base para comprender características específicas de movilidad, transporte y tránsito en la zona urbana.

Los objetivos de dicho análisis sintetizan 5 factores importantes: El primero de ellos hace referencia al presente desafío de seguridad vial, enfocado en los motociclistas y peatones, ya que los actores viales más afectados por los siniestros son los motociclistas y los peatones. Durante el transcurso del año, se han registrado 623 accidentes de tránsito desde enero hasta marzo, cifra preocupante, ya que es colateral del problema sanitario del Covid.

En segunda instancia se presenta un problema del uso de suelos para la creación de carriles mono-funcionales como la creación de vías segregadas para ciclistas, la cual es muy variables, Bogotá o Medellín cuentan con extensas redes de vías exclusivas para bicicletas, pero Barranquilla que cuentan con pocos kilómetros. En tercera instancia, el uso del suelo urbano para el transporte no solo de personas si no también el transporte de los materiales y alimentos que las personas consumen en su día a día.

El cuarto se centra en la movilidad de materiales y alimentos en las ciudades, cabe recalcar que las persona que ejercen esta labor en el país no cuentan con un sistema de seguridad laboral apto, ya que al considerar las personas que ejercen como domiciliarios, los vehículos son cargan con componentes que no sopesan la carga provocando accidentes de tránsito, formación de trancones que duran tiempos prolongados en la ciudad y vías peligrosas.

Por último, la sostenibilidad ambiental es una preocupación muy importante, ya que se evidencia que tienen un impacto directo en algunos animales debido a la contaminación acústica y ambiental. Debido a los altos niveles de material particulado PM 2,5 y los episodios recurrentes de contaminación atmosférica en Bucaramanga y Girón, existe la posibilidad de

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

declarar un "estado de prevención" (p. 15) debido a la mala calidad del aire. Estos niveles superan los límites permitidos para una exposición de 24 horas, este contexto presenta una posible amenaza para la salud de individuos particularmente susceptibles, tales como mujeres embarazadas, infantes y ancianos (BADILLO J, LATORRE L, OREJARENA C, PINZON E. 2018)

A partir de los aspectos previamente analizados, se considera oportuno plantear un sistema que sustituya y mejore los medios de transporte tradicionales por opciones más eficientes y menos perjudiciales para la movilidad y el entorno. El modelado de un vehículo que cuente con un sistema no contaminante y seguro, este modelo aerodinámico cuenta con una fuente energética con un motor eléctrico que tiene por objetivo reducir en gran medida la contaminación ambiental, a pesar de esto, el consumo de energía del vehículo aumenta a medida que se enfrenta al viento, y cuanto más rápido se desplaza, más energía se consume. La resistencia aerodinámica está estrechamente relacionada con la forma y el área frontal del diseño del automóvil. Los vehículos con formas más suaves experimentan una reducción significativa en su resistencia aerodinámica, lo que puede representar un beneficio adicional de aproximadamente el 20% o 30%, ya que los vehículos que entregan mercancías utilitarias tiene la necesidad de aumentar su velocidad por cuestiones de tiempo, debido a que las entregas tienen que hacerse a horas determinadas, la resistencia al avance causada por la corriente de aire es una variable fundamental en el análisis aerodinámico destinado a mejorar la eficiencia de cualquier medio de transporte. Como señala Artés (2011), el consumo de potencia debido a este factor puede pasar de ser insignificante a ser significativo cuando un vehículo o medio de transporte incrementa su

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

velocidad, esto conlleva a incrementar la resistencia al avance. Esto a su vez resulta en un aumento significativo en el consumo de energía (p. 1).

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

### **Objetivos**

#### **1.1. Objetivo general**

Simular tres propuestas de un vehículo eléctrico utilitario de tres ruedas monoplaza generando un análisis aerodinámico para alcanzar una reducción en el consumo de la potencia por resistencia al aire, que permita seguir contribuyendo con la misión de la Universidad Industrial de Santander en incentivar y adaptar el uso de energías limpias para la movilidad sostenible y cuidado del medio ambiente.

#### **1.2. Objetivos específicos**

- Revisar la literatura para plantear posibles configuraciones de vehículo eléctrico utilitario monoplaza, el cual debe comprender: Tracción trasera; una distancia entre ejes de 1400 mm y una velocidad máxima establecida para estos vehículos por el código nacional de tránsito terrestre (Ley 769 de 2002).
- Concebir tres alternativas de carrocería las cuales deben comprender la biónica de la cabeza de chita guepardo y realizar el análisis aerodinámico de cada alternativa del vehículo mediante un software de CFD como lo es Ansys.
- Determinar la mejor configuración del comportamiento aerodinámico de tres modelos para un vehículo eléctrico utilitario de carga monoplaza de tres ruedas para obtener el mejor aprovechamiento de la potencia basado en la matriz de selección QFD.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

### **Marco teórico**

Este capítulo describe la teoría y los conceptos necesarios para comprender la técnica desarrollada del proyecto.

#### **1.3. Análisis de la información recopilada**

La información recopilada con base de aerodinámica de los fluidos a través de la simulación de las alternativas planteadas en CFD se da con el fin de lograr conocimiento indispensable a través de libros, artículos, investigaciones, tesis, entre otros documentos guía.

##### ***1.3.1. Libro***

En su libro "Mecánica de fluidos", Mott (2006) ofrece conocimientos sobre los fundamentos de la mecánica de fluidos y su aplicación en problemas prácticos, permitiendo a los lectores diseñar y analizar sistemas prácticos de flujo de fluidos.

##### ***1.3.2. Artículo***

Bhaskar, C., Rawat, K., Minhaj, M., Kumar, MS & D, N. (2021). se lleva a cabo una investigación enfocada en el estudio y diseño de un vehículo de tres ruedas. El objetivo principal es validar las limitaciones del vehículo mediante un análisis aerodinámico de las fuerzas de arrastre y sustentación a las que se enfrenta. Este estudio nos permite identificar los componentes más adecuados para su utilización en el diseño, considerando la simplificación en su fabricación y su eficiencia en condiciones óptimas.

##### ***1.3.3. Proyecto de grado***

El proyecto de Gonzales & Picón (2013) presenta como concepto principal el diseño de carenado con análisis aerodinámico mediante el uso de software especializados tales como Catia,

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

SolidWorks, ANSYS, JavaFoil, entre otros. Tomando como bases el componente teórico, las propiedades y simulaciones del análisis capaz de desarrollar esto.

### **1.4. Marco conceptual**

#### ***1.4.1. La carrocería***

De acuerdo con Muñoz y Ardila (2020), la carrocería se refiere al componente del vehículo que tiene un impacto importante en aspectos como la apariencia visual, el rendimiento aerodinámico y la seguridad de los ocupantes. El diseño de la carrocería es crucial para lograr un óptimo desempeño en la carretera y garantizar la seguridad de quienes viajan en el vehículo.

#### **Figura 1**

*Carrocería de un vehículo*



*Nota:* La figura presenta la estructura básica de un vehículo. Carrocería de los coches, de Mario Tixces (2017)

#### ***1.4.2. Tipos de carrocería***

A partir de lo planteado por Rosero (2009) se estable los distintos tipos de carrocería, estos se basan en unas condiciones específicas, las cuales son:

- Chasis con carrocería separada

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

La carrocería está constituido a través de que los componentes mecánicos están soportados por el propio chasis, por lo que el vehículo puede dar marcha aún sin

carrocería. Esta carrocería se instala en vehículos todoterrenos y vehículos de uso exclusivo industrial.

- C1 monocasco

Un tipo de C1 construida en una sola pieza (Un chasis ligero con piso particular), contribuyendo los componentes de la carrocería a la resistencia del conjunto como una sola pieza soldada entre sí. Los capos, las puertas y guardafangos son los únicos elementos desarmables en este tipo de C1.

- C1 auto portante

Es un conjunto de piezas que componen a toda la C1 uniéndose mediante soldadura por resistencia proporcionando una fácil reparación, por lo que en la actualidad es la que más se emplea.

### **Según su volumen**

Con base a lo planteado en LoctiteTeroson (2020), los tipos de carrocería según su volumen son:

- **Monovolumen:** La sección del motor, la cabina y el área de carga están concebidas y ensambladas como una sola estructura. Esto implica que estos elementos están vinculados y conforman una entidad integrada. En resumen, el compartimento exterior del vehículo engloba un diseño integrado que incluye el motor, la cabina y el maletero.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

- Dos volúmenes: El compartimento del motor se encuentra de manera separada e independiente, mientras que la cabina y el maletero están combinados en una sola unidad. En este diseño, la cabina del vehículo y el área de carga trasera (maletero) están integrados en una estructura conjunta, lo que permite optimizar el espacio y la funcionalidad del vehículo.
- Tres volúmenes: Cada espacio forma un volumen independiente.

### *1.4.3. Partes de la CI del vehículo para el análisis aerodinámico*

- Parte delantera

Nos enfocaremos en el capó, siendo la tapa del vehículo, su función principal es proteger y suministrar seguridad al conductor, también al motor y al resto de componentes del vehículo.

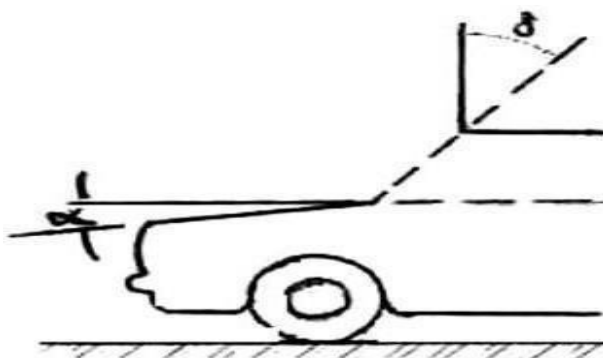
Para el análisis aerodinámico, el capó es la capa límite que altera la ruta de flujo para los costados o la parte superior del vehículo.

Un ángulo de capot elevado ayuda a suavizar el flujo del aire reduciendo la resistencia aerodinámica, pero está limitado por los requisitos de espacio para los componentes internos al motor. Aumentar la inclinación del parabrisas puede disminuir notablemente la resistencia aerodinámica, sin embargo, esto podría comprometer la seguridad del conductor, ya que permite una mayor penetración de los rayos solares y reduce la altura disponible en el techo.

## **Figura 2**

*Incidencia del capot y parabrisas*

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA



*Nota:* La imagen presenta la incidencia del capot y parabrisas respecto a la resistencia aerodinámica. Tomado de: Incidencia del Capot y Parabrisas. Fraija. I(2006) PRPSPECTIVA 4(2) 66-70.

El efecto de la inclinación del parabrisas tiende a reducirse con un aumento en el ángulo de inclinación. Además, tiene un efecto beneficioso sobre el efecto trasero sobre el coeficiente  $C_x$

$$0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ \quad (1)$$

- Parte trasera

Los distintos perfiles longitudinales en la parte posterior del vehículo tienen un impacto importante en la resistencia aerodinámica que enfrenta durante su desplazamiento. Estas formas producen flujos de aire distintos, lo cual afecta la presión en la parte trasera y las pérdidas debidas a la viscosidad del fluido.

### Figura 3

*Formas usuales de la trasera de vehículos*



## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

*Nota:* La figura representa las formas más usuales de la parte trasera de los vehículos.

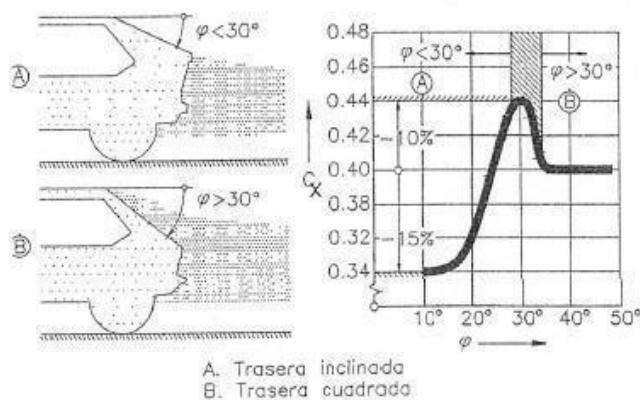
Tomado de: Formas Usuales de la trasera de los vehículos.

Cuando se trata de una carrocería con forma trasera cuadrada, que es común en furgonetas, se observan separaciones de flujo que generan vórtices en dirección perpendicular al flujo principal, es decir, de manera transversal al vehículo. Este fenómeno se considera un flujo bidimensional. Por otro lado, en el caso de una parte trasera inclinada, se caracteriza por generar un flujo que presenta dos vórtices alineados en la dirección longitudinal., y el ángulo de inclinación con respecto al techo suele ser pequeño. En cuanto a una parte trasera escalonada, produce un flujo que combina características de los casos anteriores. Se pone de manifiesto la influencia del ángulo de pendiente de la superficie trasera sobre el coeficiente aerodinámico  $C_x$  y se establece un criterio para definir el límite entre las formas ‘cuadrada’ e ‘inclinada’ caracterizada por flujos diferentes. Este límite se encuentra para valores del ángulo ( $\varphi$ ):

$$28^\circ \leq \varphi \leq 32^\circ \quad (2)$$

### Figura 4

*Influencia de la pendiente de la superficie trasera en el  $C_x$*



## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

*Nota:* La imagen ilustra el impacto de la inclinación de la superficie trasera.

**Tabla 1**

*Influencia de los tipos de traseras sobre diferentes coeficientes aerodinámicos.*

<b>1 </b>	<b><math>C_x</math></b>	<b><math>C_z</math> (eje trasero)</b>	<b><math>C_v</math> (eje trasero)</b>
Cuadrada	Moderada	Baja	Alta
Inclinada	Baja	Baja	Alta
En escalón	Alta	Alta	Moderada

*Nota:* La tabla representa la teoría de las influencias de los tipos traseros sobre la diferencia de coeficiente.

- Spoiler

Un spoiler es un dispositivo aerodinámico montado en la parte trasera del vehículo, típicamente en el maletero o en el techo. Su función principal es alterar el aire que circula alrededor del vehículo para mejorar la estabilidad y la eficiencia aerodinámica.

Los spoilers pueden tener varias formas y tamaños, pero generalmente están diseñados para reducir gasto aerodinámico o la turbulencia del flujo de aire. Esto puede ayudar a aumentar la eficiencia del combustible y mejorar la capacidad de manejo del vehículo, especialmente a altas velocidades.

Además de su función aerodinámica, los spoilers también pueden tener propósitos estéticos y de estilo, añadiendo un aspecto deportivo o agresivo al vehículo. En algunos casos, los spoilers también pueden proporcionar refrigeración adicional al motor o al sistema de frenos al dirigir el aire hacia ciertas áreas del vehículo.

- Difusor

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

Un difusor en un vehículo es un componente aerodinámico diseñado para mejorar el flujo de aire debajo del automóvil. Se encuentra típicamente en la parte trasera del vehículo, debajo del parachoques, y su función principal es acelerar el flujo de aire que se desplaza debajo del vehículo.

Cuando un automóvil se mueve a alta velocidad, el aire que pasa por debajo del chasis tiende a crear una zona de alta presión. Esto puede generar elevación (lift), lo que reduce la estabilidad del vehículo y puede disminuir su agarre a la carretera.

El difusor está diseñado para contrarrestar este efecto al expandir el flujo y reducir la presión debajo del vehículo. Al hacerlo, crea un área de mínima presión que deja el vehículo pegado al suelo, mejorando la estabilidad y el agarre en la carretera. Esto es especialmente importante en vehículos de alto rendimiento, como los coches deportivos o de carreras, donde la estabilidad.

### ***1.4.4. Fundamento de análisis aerodinámico en los vehículos***

Según Jim Lucas (2014) en su documento ¿qué es la aerodinámica? Estipula que los fundamentos para el análisis aerodinámico en los vehículos es el siguiente:

#### **1.4.4.1. Aerodinámica**

Es el estudio de la dinámica del aire y otros fluidos gaseiformes empleados en el movimiento entorno a las cosas. La aerodinámica se enfoca en la resistencia y la sustentación causadas por el aire que fluye sobre y alrededor de los sólidos. La razón más importante del análisis aerodinámico es de aviones y automóviles. (Jim Lucas, 2014, p.2).

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

### 1.4.4.2. Principio de Bernulli

Es un concepto de mucha importancia en la mecánica de fluidos estableciendo lo siguiente, en un flujo que permanece constante, la suma de la presión dinámica y la presión estática serán constante en una línea de corriente, cuando la velocidad del aire se incrementa, la presión se minimiza, y viceversa. Este efecto es muy usado con la finalidad de explicar fenómenos como el vuelo de los aves, la teoría de los tubos de Venturi, entre otros.

$$P + \rho(v^2) + \rho gh = \text{Constante} \quad (3)$$

Donde:

P → Presión estática.

$\rho$  → Densidad.

v → Velocidad.

g → Aceleración debida a la gravedad.

h → Altura.

### 1.4.4.3. Efecto Venturi

El fenómeno Venturi ocurre cuando un flujo pasa a través de una sección estrecha, lo que queda como resultado un incremento de la velocidad del flujo y se minimiza la presión. Este efecto se describe mediante la aplicación del fenómeno energético de Bernoulli y la preservación de la materia con el principio de continuidad, lo que facilita el cálculo del flujo en este tipo de configuración.

#### *Túneles Venturi en los automóviles*

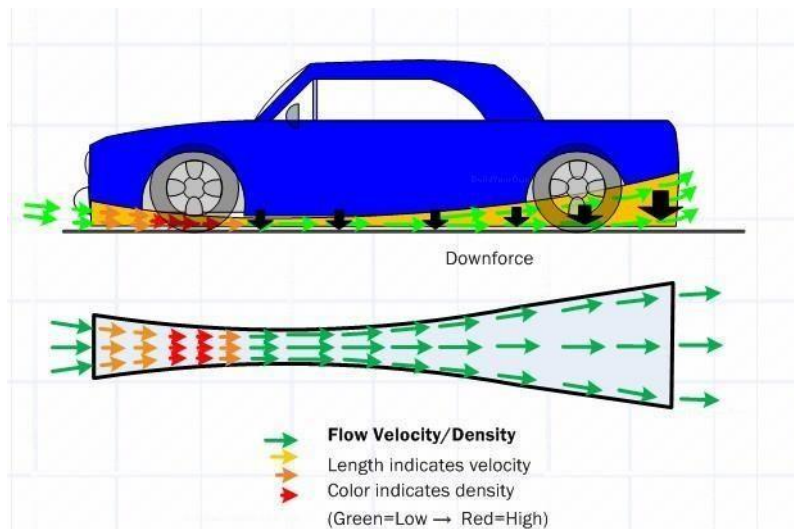
## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

Son secciones cortadas en el piso del vehículo, generando un área limitada debajo del auto en la cual se acelera el aire. Este aire acelerado crea una superficie de baja presión que efectivamente crea un efecto de succión debajo del automóvil, creando una carga aerodinámica.

En otras palabras, el ‘túnel’ en el piso del automóvil tendrá una amplia abertura al frente para recolectar una cierta cantidad de aire. En seguida se comienza a reducir, aumentando la rapidez del flujo de aire debajo del automóvil, lo que también reduce la presión debajo del automóvil. Los tubos Venturi se cortan en la parte inferior del piso del automóvil para crear carga aerodinámica. Esto facilita un concepto conocido como efecto suelo.

### Figura 5

*Comportamiento del efecto Venturi en los vehículos*



*Nota:* La figura representa el comportamiento del efecto Venturi en los vehículos.

#### 1.4.4.4. Propiedades de los fluidos

##### *Viscosidad*

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

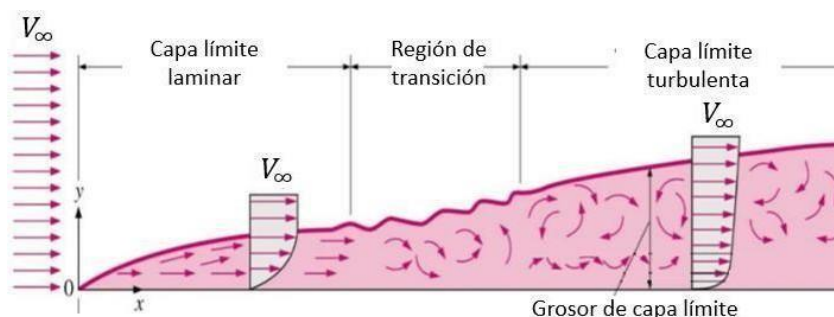
Es la medida en la que un fluido se resiste al movimiento. En los líquidos, la resistencia al movimiento se debe a la atracción entre moléculas, mientras que, en los gases, el desorden molecular causa colisiones entre las moléculas reduciendo el flujo.

### *Capa límite*

Es una fina capa de aire que se origina sobre la superficie de un objeto (en este caso sobre la carrocería) cuando se desplaza a través del aire. Este aire interactúa con la superficie del objeto y se desacelera gradualmente desde la velocidad del aire libre hasta los puntos de estancamiento (cero), en la superficie misma del objeto (C1). La interacción entre la capa límite y aire exterior puede afectar la fuerza de arrastre total experimentada por el objeto (C1). El control de la capa límite son aspectos cruciales en el diseño de vehículos y estructuras para minimizar la resistencia aerodinámica y mejorar la eficiencia.

### **Figura 6**

*Las etapas de formación de la capa límite*



*Nota:* La figura muestra las etapas de formación de la capa límite.

### *Coefficiente de fricción*

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

Es una constante adimensional que indica el nivel de fricción entre la superficie de dos cuerpos en este caso la carrocería del vehículo y las partículas del aire, considerando el esfuerzo cortante, la densidad del fluido y viscosidad, la velocidad en la que se dirige el vehículo.

$$Cf = \frac{r}{2\rho(V\infty)} \quad (4)$$

Según Joseph Katz en el libro Race Car Aerodynamics: Designing for speed propone las conclusiones siguientes:

- El coeficiente de fricción se minimiza al aumentar el número de Reynolds en flujos de comportamiento laminar.
- El coeficiente de fricción es significativamente más alto en capas límites turbulentas.

### 1.4.4.5. Tipo de flujos

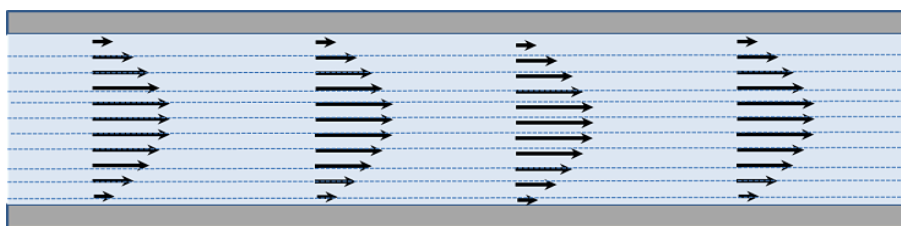
#### *Flujo laminar*

Este se refiere a una forma de movimiento del aire (o cualquier otro fluido) en la que las líneas de movimientos de las partículas se dirigen en capas paralelas y ordenadas. Para este flujo, el air se mueve en trayectorias suaves, sin perturbaciones significativas. Este flujo generalmente se produce a bajas velocidades y bajo ciertas condiciones específicas de geometría y viscosidad del fluido. Es importante en aerodinámica porque puede tener un impacto en la resistencia y en otros aspectos del comportamiento del fluido alrededor de un objeto en movimiento.

#### **Figura 7**

*Comportamiento del flujo laminar*

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA



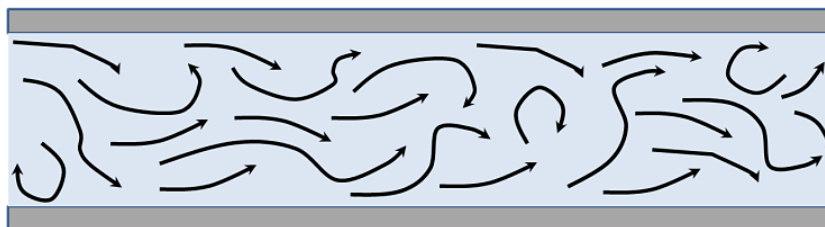
*Nota:* esta imagen muestra el comportamiento del flujo laminar. Tomado de: ¿Qué es el flujo turbulento? (2021) IQR. Flujo

### ***Flujo turbulento***

Este se refiere a una forma de movimiento del aire (o cualquier otro fluido) en la que las partículas del aire se mueven de manera caótica y desordenada. En este tipo de flujo, las partículas se mezclan entre sí y se producen vórtices y remolinos a diferentes escalas, lo que queda en una variación impredecible en la velocidad y la presión a lo largo del flujo. El flujo turbulento es común en condiciones de alta velocidad, en áreas de geometría compleja o irregular, o cuando el fluido tiene una alta viscosidad. En aerodinámica, el flujo turbulento puede afectar significativamente la resistencia, la estabilidad y otros aspectos del comportamiento del fluido alrededor de un objeto en movimiento.

### **Figura 8**

*Comportamiento del flujo turbulento*



*Nota:* La imagen muestra el comportamiento del flujo turbulento. Tomado de: Comparación de flujo laminar y flujo turbulento. (2021) IQR. Flujo

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

### 1.4.4.6. Número de Reynolds

Este factor es una cantidad adimensional que se usa en el campo y análisis de fluidos para caracterizar el comportamiento de un flujo en síntesis con su viscosidad, densidad y velocidad. Es una variable importante que me permite conocer si el flujo es laminar o turbulento... Este número es crucial en el diseño y análisis de sistemas que involucran fluidos, como tuberías, aviones, automóviles y bombas, entre otros

$$RE = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} \quad (4)$$

dónde:

V → Es la velocidad del flujo.

D → Es la dimensión lineal característica (longitud recorrida del fluido, etc.).

$\rho$  → Es la densidad del fluido.

$\mu$  → Es la viscosidad dinámica.

$\nu$  → Es la viscosidad cinemática.

Dado el número de Reynolds, se deben considerar los siguientes rangos para cada tipo de régimen o flujo:

- Flujo laminar:  $Re \leq 2000$
- Flujo transitorio:  $2000 \leq Re \leq 4000$
- Flujo turbulento:  $Re \geq 4000$

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

### 1.4.4.6.1. Diámetro hidráulico

Es un parámetro utilizado en ingeniería hidráulica para caracterizar la sección transversal efectiva de un conducto por el cual fluye un fluido. Este no es necesariamente el mismo que el diámetro geométrico del conducto. Se calcula de manera diferente según el tipo de flujo y la forma transversal. Es importante al poder determinar la velocidad del flujo, la resistencia al flujo, se utiliza en el cálculo de numerosas fórmulas y ecuaciones en la ingeniería hidráulica.

$$Re_D = \frac{\rho v D_h}{\mu} = \frac{v D_h}{\nu}$$

Donde:

$$D_h: \frac{4A}{P} \quad (5)$$

Siendo:

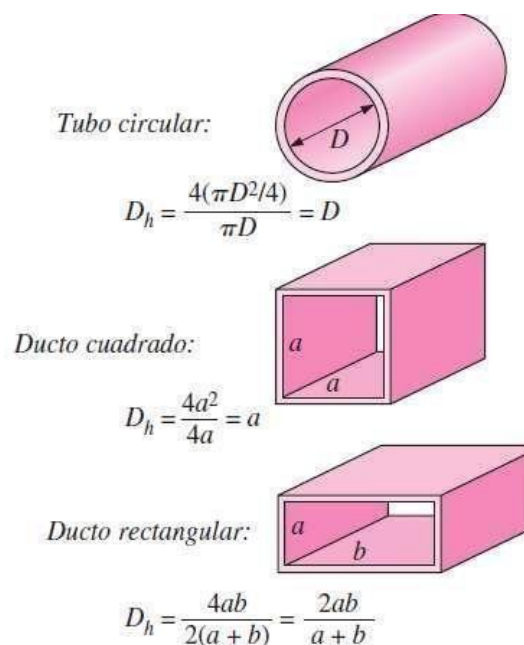
A → El área transversal.

P → El perímetro humedecido de la sección transversal. El perímetro mojado para un canal es el perímetro total de todas las paredes del canal que están en contacto con el flujo.

### Figura 9

*Flujo de fluidos incompresibles en tuberías*

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA



*Nota:* La figura presenta el Flujo de fluidos incomprensibles en tuberías. Tomado de: Fluidos incomprensibles en tuberías (2019) Connor. N ¿Qué es el diámetro hidráulico? Thermal Engineering.

#### 1.4.5. Aerodinámica de los vehículos

A partir de lo planteado por Jim Lucas (2014) se entiende que desde los inicios de los automóviles se usaban la estructura de C1 aerodinámicas, demostrando que la resistencia del viento dificultaba notablemente la velocidad dado que los motores estaban más eficaces y por ende los automóviles más veloces.

De los diversos fundamentos aerodinámicos para los automóviles de carreras animismos se adaptan a los vehículos regulares. Por lo tanto, se utiliza lo que dijo el Dr. Joe David, docente de ingeniería mecánica y aeroespacial en relación con la aerodinámica de un automóvil de carrera ‘La mayor parte de la potencia generada por un motor de carreras se consume por el aire

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

a alta presión que empuja la parte delantera del automóvil y el aire a baja presión, un vacío parcial, que arrastra el automóvil desde atrás. (Jim Lucas ,2014. p,2)

Los automóviles están proyectados para que a medida que incrementa la velocidad, el viento actúe como una fuerza en dirección abajo para perseverar el dominio de la dirección y la desaceleración. En consecuencia, el crecimiento de esta fuerza, incrementa el gasto de combustible y restringe la velocidad, así que la resistencia no sería el característico factor a tener en cuenta sino también estas dos fuerzas.

### **1.4.5.1. Desarrollo de la aerodinámica del vehículo**

El estudio aerodinámico del automóvil C1 implica investigar cómo el aire interactúa con el vehículo según su diseño. Por lo tanto, es crucial realizar una investigación detallada de la aerodinámica del vehículo, ya que la forma en que el aire circula alrededor del automóvil afecta significativamente:

- Eficiencia.
- El consumo de combustible.
- El flujo de aire a ciertos componentes del vehículo.
- La estabilidad a altas velocidades.
- La reacción en el automóvil ante un viento lateral.
- La resistencia al avance.

Por lo tanto, una investigación adecuada en aerodinámica permitirá que el vehículo se convierta en un modelo más ecológico al reducir su consumo de combustible. Esto significa que el vehículo empleará menos potencia

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

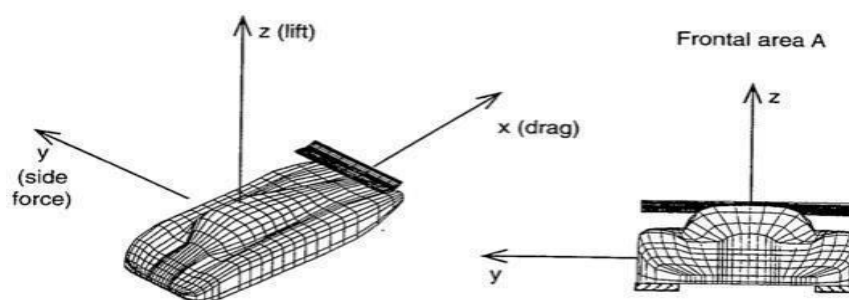
### 1.4.5.2. Fuerzas aerodinámicas actuando sobre un vehículo

Los efectos fundamentales que experimenta en el cuerpo e influyen en su movimiento son la fuerza de arrastre (**drag**) y sustentación (**lift**).

En el contexto de los vehículos, el "drag" se refiere a la fuerza que actúa en la dirección de avance o retroceso, generando resistencia al movimiento longitudinal del automóvil. Por otro lado, el "lift" es una fuerza vertical que, en el caso de las aeronaves, permite su ascenso y sustentación en el aire. Sin embargo, en el contexto de los automóviles, su objetivo es generar el efecto contrario. Esta fuerza también es vertical, pero está dirigida hacia el suelo y tiene el efecto de presionar el vehículo contra el pavimento.

#### Figura 10

*Sistema de coordenadas en direcciones de las fuerzas aerodinámicas*



*Nota:* En la figura se muestra el sistema usado para definir las direcciones de las fuerzas aerodinámicas en un vehículo según Katz (2006) citado por Gamboa (2016).

La carga aerodinámica es creada por la diferencia de presión. Hay un espacio entre el chasis de un coche y el asfalto. Con una altura de la habitación más baja, el aire que fluye se acelera, creando una zona de descomprimida o de baja presión. Dado que la presión sobre el

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

vehículo es mayor que la presión debajo, existe una fuerza vertical que empuja el automóvil hacia abajo.

Las siguientes ecuaciones se emplean para obtener ambas fuerzas son:

$$D = \frac{1}{2} \rho A C_D V^2 \qquad L = \frac{1}{2} \rho A C_L V^2 \qquad (6)$$

D → Es el drag

L → Se refiere a la fuerza vertical generada sobre un objeto, ya sea hacia arriba (lift) o hacia abajo (downforce en negativo).

$\rho$  → Se refiere a la cantidad de partículas de aire por unidad de volumen.

A → Hace referencia a la superficie expuesta por la parte frontal del vehículo. V → Es la velocidad a la que circula.

$C_D$  y  $C_L$  → Son los coeficientes de drag y de lift.

La velocidad es el parámetro que tiene el mayor efecto en ambas fuerzas, y se puede ver que la velocidad está al cuadrado. Esto indica que el efecto aerodinámico es insignificante a velocidades muy bajas, su efecto es muy significativo cuando el vehículo viaja a altas velocidades. (Fernández, 2019.p.1)

### 1.4.5.3. Estudio de la aerodinámica de un producto

La calidad aerodinámica es un factor crucial en un análisis de diseño de carrocería de un vehículo, ya que afecta directamente aspectos como la estabilidad, el efecto suelo y el aumento en el desgaste energético, ya sea en forma de combustible o de potencia eléctrica. Por lo tanto, la forma de la C<sub>L</sub> y su aerodinámica determinarán estos aspectos de manera significativa

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

Cuando un vehículo viaja a alta velocidad, debe expulsar una cantidad importante de aire, y también ayuda a llenar el vacío que se produce después de adelantar, por lo que la resistencia al avance se convierte en una carga para el motor. Puede proporcionar. Capacidad de moverse a velocidades más altas, lo que aumenta el consumo de energía. El arrastre dependerá tanto de las propiedades del aire como de las características de forma del objeto sólido, en este caso, la rugosidad de la superficie, la forma del objeto, la superficie de contacto con el viento y, lo más crucial, la velocidad de referencia entre el sólido ( $C_1$ ) y el viento deben tenerse en cuenta.

La fuerza total aplicada en el centro de presión de la carrocería se calcula sumando todas las presiones que actúan sobre los elementos de la superficie. Al dividir esta fuerza en dos componentes, una en la dirección del movimiento del vehículo y otra perpendicular a esta fuerza, la primera componente de la fuerza se denomina resistencia inducida cuando se conoce la dirección del movimiento del vehículo, o, en caso contrario, la del fluido. La segunda fuerza, opuesta al movimiento hacia adelante del vehículo, se denomina sustentación o tracción, y puede hacer que el vehículo se adhiera o se levante del suelo.

Al sumar todas las fuerzas de rozamiento que intervienen en los diferentes puntos de la carrocería, el resultado obtenido es la fuerza total de arrastre del aire.

Dada la complejidad de los efectos que se producen cuando un vehículo interactúa con el aire, se busca simplificar el estudio. Se trabajan estas relaciones utilizando coeficientes exclusivos, lo que permite deducir los efectos o defectos aerodinámicos sobre el vehículo monoplaza al obtener datos de modelos ya acreditados.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

### 1.4.5.4. Coeficiente aerodinámico

Los coeficientes aerodinámicos son valores adimensionales que se utilizan para describir y cuantificar los efectos aerodinámicos sobre un objeto en movimiento, como un automóvil, una aeronave o un cuerpo en movimiento. Estos coeficientes se derivan de pruebas en túneles de viento o mediante simulaciones computacionales y son útiles para predecir el comportamiento aerodinámico de un objeto en diversas condiciones.

#### 1.4.5.4.1. Coeficiente de arrastre

Se denomina coeficiente de arrastre, porque la  $x$  indica una dirección en un eje de tres coordenadas. En otros términos, de mencionar al coeficiente de arrastre es ( $C_d$ ).

Es el coeficiente más influyente en el comportamiento del vehículo por su aerodinámica y desplazamiento en el aire. A menor sea el  $C_x$  en un vehículo, menos tiende a sufrir los efectos del aire.

Mediante el coeficiente de arrastre ( $C_x$ ) se especifica la cantidad de arrastre sobre un objeto. No solo depende de la forma del objeto, asimismo de otros factores, como

- La velocidad.
- La rugosidad de la superficie.
- La densidad del aire.
- Si el flujo es laminar (suave) o turbulento.

El coeficiente de arrastre para los automóviles utilitarios es de:

$$0.40 \leq C_x \leq 0.80$$

(7)

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

Por lo regular, el computo se define a través de simulaciones por computadora o en túnel de viento por su nivel de complejidad.

A continuación, la expresión utilizada para obtener el coeficiente de arrastre es:

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho (v^2) A}$$

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho (v^2) A} \quad (8)$$

Siendo:

$F_x$  → Es la Fuerza de arrastre experimentada por el vehículo.

$\rho$  → Es la densidad del fluido en el que se mueve el cuerpo.

$v$  → Es la velocidad relativa de la corriente de aire

incidente en el vehículo.  $A$  → Es el área de referencia,

suele emplearse el área frontal del mismo.

Seguidamente, se modela **la relación de potencia** requerida por el vehículo para vencerla fuerza de arrastre que ejerce el flujo de aire sobre él.

$$\text{Potencia} = \frac{C_x \cdot a \cdot v^3}{1225} \quad (9)$$

Siendo:

$C_x$  → Es el coeficiente de arrastre.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

$a \rightarrow$  Se refiere al tamaño o superficie frontal del vehículo

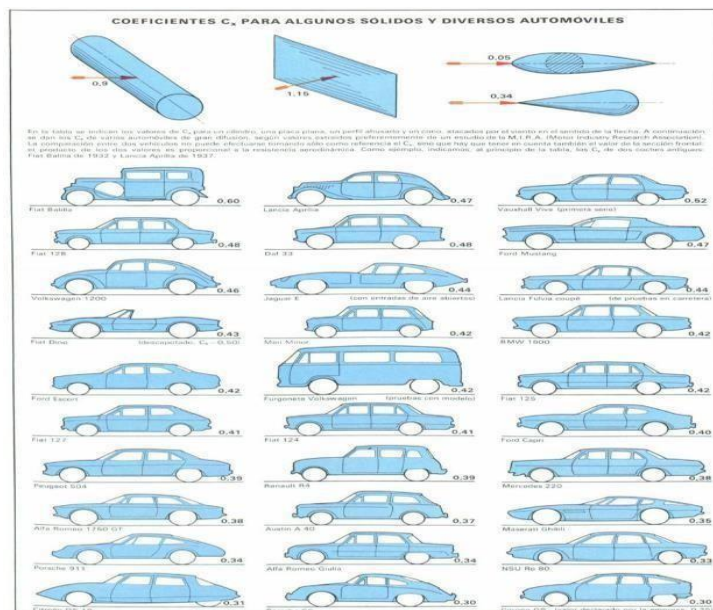
expuesta al flujo de aire.

$v \rightarrow$  Se refiere a la velocidad relativa del flujo de aire que incide

sobre el vehículo.

### Figura 11

*Diferentes coeficientes  $C_x$  según su forma*



*Nota:* La imagen muestra los Diferentes coeficientes  $C_x$  según su forma. Tomado de:

Comparación de formas. (2015) Technical courses, Estudio de la aerodinámica de un vehículo.

Technical courses

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

### **1.4.5.4.2. Coeficiente de empuje lateral $C_y$**

Se refiere al coeficiente que deriva y se usa para medir el efecto del aire suministrado al costado del vehículo, que afecta la estabilidad del vehículo y, por lo tanto, degrada el andar y la trayectoria del vehículo debido a la deriva de las llantas.

### **1.4.5.4.3. Coeficiente de sustentación $C_z$**

Es un coeficiente que expresa la capacidad de generar fuerza en una dirección vertical a la velocidad del movimiento. En lo que a la industria del automóvil se refiere, se centra en esta fuerza vertical descendente para presionar el vehículo contra el asfalto, dotando al vehículo de mayor tracción y mejorando su estabilidad.

Debido a la tracción o sustentación del vehículo con respecto al suelo se denomina coeficiente de sustentación ( $C_z$ ). En otros términos, de mencionar al coeficiente de sustentación es ( $C_l$ ).

Dependiendo de la geometría del vehículo, estos coeficientes pueden tener valores diferentes siendo el valor del factor de sustentación afectado principalmente del objeto que se está probando.

A continuación, la expresión utilizada para obtener el coeficiente de arrastre es:

$$C_l = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho (v^2) A} \quad (10)$$

Siendo:

$F_L \rightarrow$  Es la fuerza de sustentación experimentada por el vehículo.

$\rho \rightarrow$  Es la densidad del fluido en el que se mueve el cuerpo.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

$v \rightarrow$  Es la velocidad relativa de la corriente de aire

incidente en el vehículo.


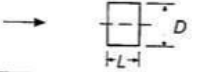
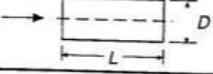

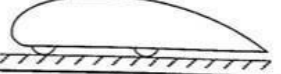


$A \rightarrow$  Es el área de referencia, suele emplearse el área

frontal del mismo.

En este caso, el área considerada será la sección en planta del cuerpo que se examina.

**Figura 12**

*Valores de coeficientes de arrastre y sustentación para algunas configuraciones*

			$C_L$	$C_D$
1	Circular plate		0	1.17
2	Circular cylinder $L/D < 1$		0	1.15
3	Circular cylinder $L/D > 2$		0	0.82
4	Low drag body of revolution		0	0.04
5	Low drag vehicle near the ground		0.18	0.15
6	Generic automobile		0.32	0.43
7	Prototype race car		-3.00	0.75

*Nota:* La figura presenta los valores de coeficientes de arrastre y sustentación para algunas configuraciones. Tomado de: Typical and drag coefficients for several

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

configurations(2006) Katz, J. (2006). Race Car Aerodynamics: Designing for Speed. Cambridge, Massachusetts, USA: Bentley Publishers.

### 1.4.5.5. Resistencia aerodinámica

Según Jim Luca (2014): La resistencia aerodinámica dependerá de cuatro factores:

$$R_x = \frac{1}{2} (\rho_{\text{aire}}) (v^2) (A) (C_x) \quad (11)$$

Siendo:

$\rho$  → Es la densidad del fluido en el que se mueve el cuerpo.

$v$  → Es la velocidad relativa de la corriente de aire

incidente en el vehículo.

$A$  → Es el área de referencia, suele emplearse el área

frontal del mismo.

$C_x$  → Es el coeficiente de resistencia aerodinámica.

Según la NASA, es la resistencia ocasionada al encontrarse con un objeto sólido (automóvil), produciendo resistencia en la dirección del movimiento del aire.

El coeficiente de arrastre ( $C_x$ ) es uno de los datos más significativos para calcular la resistencia aerodinámica. Otro punto de referencia importante es la superficie frontal del automóvil. La elección de esta superficie frontal se basa en la suposición de que detrás del área más grande hay un punto donde ocurre la separación del flujo aerodinámico del cuerpo. Esta

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

separación del flujo es la principal causa de la resistencia aerodinámica en los automóviles de producción.

### **1.4.5.6. ¿Cómo evaluar la calidad aerodinámica de un vehículo?**

Para evaluar la aerodinámica de un vehículo, los fabricantes recurren a los túneles de viento, herramientas avanzadas que posibilitan la realización de pruebas y cálculos en un entorno controlado. ( $C_x$ ,  $C_z$ ,  $R_x$ ,  $SC_x$ ) y conocer la velocidad del aire, densidad, ref. y elevación generada por el vehículo por área o factor de forma.

Para realizar estas pruebas en túnel de viento es necesario construir un prototipo de vehículo, lo que requiere una gran cantidad de costos. Para el desarrollo, los cálculos numéricos se realizan utilizando el software CFD, que proporciona cálculos y estudios rápidos a costos de desarrollo muy bajos en comparación con el análisis directo en túneles de viento.

Entre los programas que se utilizan códigos CFD que están disponibles en la actualidad para realizar un análisis aerodinámico en los vehículos a desarrollar se trabajara con ANSYS FLUENT Flow Science.

### **1.4.6. Ecuaciones Navier Stokes**

En la dinámica de los fluidos, las ecuaciones de Navier-Stokes son un conjunto de ecuaciones que modelan el movimiento tridimensional de fluidos viscosos. Estas ecuaciones se derivan de los principios de conservación de la energía térmica y mecánica.

Las ecuaciones de Navier-Stokes consisten en una ecuación de conservación de la masa que varía en función del tiempo, tres ecuaciones de conservación del impulso (una para cada dirección espacial) y una ecuación de conservación de la energía, todas ellas dependientes del

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

tiempo. Estas ecuaciones son fundamentales en la descripción matemática del movimiento de fluidos viscosos y se utilizan ampliamente en la mecánica de fluidos y la ingeniería.

### Figura 13

*La ecuación de Navier Stokes* **Nota: La imagen representa la ecuación de Navier Stokes.**

**Gradiente de presión**  
Los fluidos tienden a seguir la dirección donde existe el mayor cambio de presión.

**Término que representa la difusión**  
En los fluidos Newtonianos la viscosidad opera como difusión del momento

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V}$$

**Derivada Total**  
Representa el cambio de velocidad con respecto al tiempo e incluye un término de conectividad

**Término que representa las fuerzas que interactúan**  
Fuerzas externas, como la gravitacional, que actúan en el fluido

$$\rho \left[ \frac{\partial V}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) V \right]$$

término de convectividad

*Nota:* Tomado de: Navier- Stokes Equations (2019) poro Connor (2019) ¿Qué es la ecuación de Navier- Stokes? Definición. Thermal Engineering.

#### 1.4.7. Modelización CFD de flujo turbulento

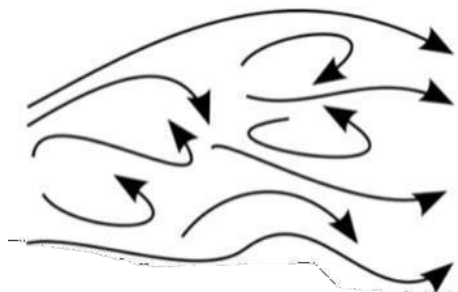
Se encuentran dos enfoques básicos para el diseño y análisis de sistemas de ingeniería que involucran el flujo de fluidos: experimental y computacional. En primera instancia, los modelos suelen crearse para probarlos en túneles de viento u otras instalaciones, mientras que, en segunda instancia, las ecuaciones diferenciales se resuelven metódica o computarizado. En nuestro caso, emplearemos la **dinámica de fluidos computacional (CFD)**.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

Para la representación del flujo turbulento se dificulta más que la simulación de flujo laminar, por causa de que específicamente, el campo de flujo turbulento es continuamente no estático y tridimensional; las estructuras de vórtice giratorio aleatorio llamadas remolinos surgen de todas las direcciones del flujo turbulento. (Fig. 13).

### Figura 14

*Flujo turbulento*



*Nota:* La figura muestra el movimiento régimen turbulento. Tomado de: Movimiento régimen Turbulento (2021) López (2021) Estudio de la cavitación en una turbina en modo Bomba. [Tesis de grado] Universitat Politècnica de Catalunya.

Al cuantificar la dinámica de fluidos computacional utilizan una técnica llamada simulación numérica directa (SND, Direct Numerical Simulation, DNS siendo su abreviatura en inglés), tiene como propósito resolver el movimiento inestable en flujos turbulentos completamente a cualquier proporción. Los resultados de SND no son posibles con las computadoras actuales. De modo que, se ejecutan suposiciones simplificadoras para modelar campos turbulentos complejos con un alto número de Reynolds.

La siguiente etapa es el modelado de remolinos grandes (SRG, Large Eddy Simulation, LES siendo su abreviatura en inglés), aprovechando las propiedades inestables de los remolinos

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

turbulentos se pueden obtener a gran escala modelando pequeños remolinos disipados.

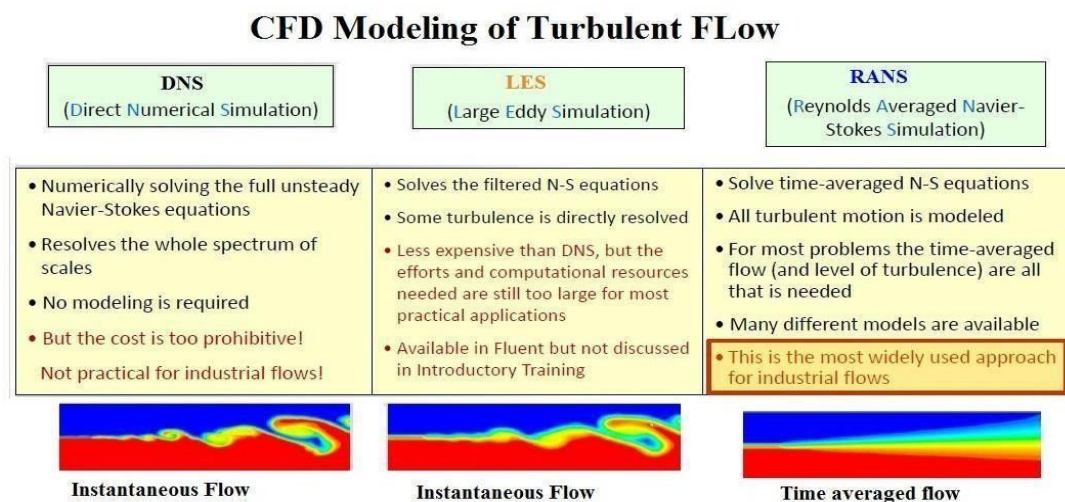
Básicamente, se supone que los remolinos turbulentos más pequeños son isotrópicos. SRG requiere muchos menos recursos computacionales porque no necesita resolver los remolinos más pequeños en el campo de flujo.

La siguiente etapa para reducir la complejidad es modelar todos los remolinos inestables con algún modelo de turbulencia. No se ha hecho ningún intento por resolver la naturaleza inestable de los remolinos de cualquier tamaño. En su lugar, se utilizan los modelos matemáticos para exponer el aumento de la intensidad de la mezcla y la difusión debido a la turbulencia de los remolinos. Para simplificar, solo se consideran flujos incompresibles en estado estacionario. Usando el modelo de turbulencia, las ecuaciones de Navier-Stokes (NSRP, Reynold-Averaged Navier Stokes, RANS siendo su abreviatura en inglés).

### **Figura 15**

*Modelización de la dinámica de fluidos computacional del flujo turbulento*

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA



*Nota:* La imagen presenta la modelización de la dinámica de fluidos computacional del flujo turbulento. Tomado de: CFD Modeling Of turbulent Flow (2019) Sharad & Pachpute (2019) Turbulent Flow: Physics and Methods of Investigations. CFD Flow Engineering

Diversos modelos de turbulencia están presentes para su manejo práctico, incluidos: modelos algebraicos, modelos de una ecuación, modelos de dos ecuaciones y modelos de tensión de Reynolds. Los cuatro modelos de turbulencia más populares son el modelo Spalart-Allmaras, el modelo  $k-\epsilon$ , el modelo  $k-\omega$  y el modelo  $k-\omega$  SST. Posteriormente, desglosaremos concisamente los modelos de turbulencia más importantes que se pueden utilizar en nuestras alternativas para la problemática, para luego optar el modelo que mejor se adapte a las características de nuestra simulación CFD.

### 1.4.7.1. Modelo de turbulencia de una sola ecuación

#### *Spalart-Allmaras*

Es un modelo de viscosidad turbulenta de una sola ecuación utilizado en la dinámica de fluidos computacional (CFD). Fue desarrollado para predecir el comportamiento de flujos

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

turbulentos de manera eficiente y precisa, especialmente en aplicaciones aerodinámicas. Este modelo simplifica la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes al introducir una sola ecuación de transporte para predecir la viscosidad turbulenta en el flujo. A través de esta relación, el modelo predice la viscosidad turbulenta en todo el dominio del flujo, lo que permite calcular de manera eficiente los efectos de la turbulencia en una amplia gama de aplicaciones. El modelo de Spalart-Allmaras ha demostrado ser efectivo en muchas aplicaciones de ingeniería, incluidos los diseños aerodinámicos de aeronaves y vehículo.

### 1.4.7.2. Modelos de turbulencia de dos ecuaciones

#### *Modelo $k - \varepsilon$*

Es un modelo de turbulencia muy frecuente en la práctica industrial debido a su confiabilidad y su costo computacional inferior. Se basa en solucionar dos ecuaciones: Para el transporte de energía cinética turbulenta  $k$  y para la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta  $\varepsilon$  en casos de bajos gradientes de presión adversa. El flujo cerca de las paredes se modela con funciones de pared, por tanto, por lo que no se simula. Se puede aplicar para estudios estáticos o dependientes del tiempo. A continuación, se presentan las ecuaciones matemáticas:

#### **Figura 16**

*La formulación para la energía cinética turbulenta  $k$*

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \mu_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

*Nota:* La figura muestra la formulación para la energía cinética turbulenta  $k$ . Tomado de:

Ecuaciones de transporte para el modelo Realizable K- $\varepsilon$  (2019) Mendoza & Vera (2019) Estudio

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

de diferentes modelos de turbulencia para obtener las curvas características de un perfil naca 2415 mediante la simulación tridimensional de flujos de fluidos. Revista Bistua Facultad de ciencias básicas 17(3): 43-51

### Figura 17

*La formulación para el índice de disipación turbulenta  $\varepsilon$*

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon\mu_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} (G_\kappa + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} + S_\varepsilon$$

*Nota:* La figura muestra la formulación para la energía cinética turbulenta k. Tomado de:

Ecuaciones de transporte para el modelo Realizable K-  $\varepsilon$  (2019) Mendoza & Vera (2019) Estudio de diferentes modelos de turbulencia para obtener las curvas características de un perfil naca 2415 mediante la simulación tridimensional de flujos de fluidos. Revista Bistua Facultad de ciencias básicas 17(3): 43-51.

Donde:

$G_\kappa \rightarrow$  Se trata de la producción de energía cinética turbulenta ocasionada por las variaciones en las velocidades promedio.

$G_b \rightarrow$  Es la generación de energía cinética debido a la flotabilidad.

$Y_M \rightarrow$  Se refiere a la aportación de la expansión fluctuante en la turbulencia compresible a la tasa general de disipación.

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon} \rightarrow$  Son constantes.

$\sigma_\kappa$  y  $\sigma_\varepsilon \rightarrow$  Son los números de Prandtl para  $\kappa$  y  $\varepsilon$ , respectivamente.

$S_\kappa$  y  $S_\varepsilon \rightarrow$  Son términos definidos por el usuario.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

Dónde:

**Figura 18**

*Coeficientes del modelo  $k-\varepsilon$*

Constante $C_{1\varepsilon}$	1.44
Constante $C_{2\varepsilon}$	1.92
Constante $C_{3\varepsilon}$	$C_{\varepsilon}^3 = \tanh \left  \frac{\nu}{u} \right $
Número de Prandtl de energía cinética de turbulencia ( $\sigma_k$ )	1
Número de Prandtl de índice de disipación de turbulencia ( $\sigma_\varepsilon$ )	1.3
$C_\mu$	0.09

*Nota:* La tabla establece los Coeficientes del modelo  $k - \varepsilon$ . Adaptada de: Modelos de turbulencia (2020) TPC (2020) Definición de las especificaciones físicas, Modelos de turbulencia.

Support.PTC.

***Modelo  $k - m$*** 

Según Toapanta et al (2019) Es un modelo semejante al modelo  $k - \varepsilon$ , tiene como propósito pronosticar la turbulencia, pero en tal caso la tasa específica de disipación de energía cinética ( $\omega$ ). Por su parte, López (2017) menciona que es un modelo no-lineal, menos robusto, sirve tanto para un bajo número de Reynolds como un alto número de Reynolds y ajustado para las capas límites alrededor de las superficies de las paredes.

***Modelo SST  $k - m$  (Shear stress transport)***

El modelo de transporte de esfuerzo cortante (SST) es un modelo de turbulencia producido por la unión del modelo  $k - \omega$  y del modelo  $k - \varepsilon$ . La adopción de  $k - \omega$  en las condiciones de contorno interno permite que el modelo se aplique directamente a la pared, y la

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

adopción de la capa  $k - \varepsilon$  en los regímenes externos elimina la insensibilidad a la turbulencia de contorno.

Según Bayona, C, Londoño, L & Nieto. E (2015) El modelo SST proporciona amortiguamiento de onda básica para evitar la propagación de ondas de alta inclinación. Esta atenuación es causada por el crecimiento de la viscosidad turbulenta alrededor del aire por el aumento de la energía cinética turbulenta ( $k$ ). (P.59)

### ***1.4.8. Método de comparación de los métodos de turbulencia***

En este análisis, se evaluaron cuatro modelos de turbulencia tanto de una ecuación como dos ecuaciones. Estos modelos son: Spalart-Allmaras,  $k-\varepsilon$ ,  $k-\omega$  y  $k-\omega$  SST.

El modelo Spalart-Allmaras no está calculado para flujos manufacturados, por lo que origina errores aproximadamente superiores para flujos de corte libre. Además, es ineficaz para predecir el colapso en un flujo turbulento isotrópico homogéneo. Sin embargo, cuando se emplean los modelos de turbulencia de dos ecuaciones se deben especificar dos condiciones de contorno adicionales para las propiedades de turbulencia en la entrada y salida del dominio computacional. De manera que, el modelo  $k-\omega$  proporciona una nueva fórmula para los tratamientos de paredes que pueden hacerlos más precisos y resistentes a las condiciones ambientales interiores, pero no es la opción más adecuada para nuestro programa de ANSYS FLUENT porque la duración del cálculo es transigente y la duración de respuesta es de días. Mientras que, el modelo SST  $k - \omega$  brinda e incluye modificaciones para efectos de bajo número de Reynolds, compresibilidad y dispersión de flujo de corte.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

El modelo K-épsilon se utiliza para simular el comportamiento de los remolinos generados por el flujo de aire, sin importar el número de Reynolds, a través de la geometría de la superficie diseñada. Este modelo no requiere una gran cantidad de recursos computacionales y se puede implementar utilizando el software Ansys Workbench. Al utilizar este modelo, es posible tomar decisiones de diseño más fundamentadas al coordinar todos los datos de simulación en una única plataforma. Por lo tanto, se considera el enfoque más adecuado para investigaciones relacionadas con este tema.

### PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS

El concepto básico de las diferentes alternativas de C1 de los vehículos que se muestran es su función y estética, tanto exterior como interior, ya que su éxito depende del funcionamiento aerodinámico como la estética.

Es en esta sección donde se dibujan los primeros bocetos a mano, utilizando elementos clásicos como lápices, plantillas de reglas curvas, los propios dibujos. Como se mostrará a continuación, el trabajo finaliza con la mejor solución de diseño en el modelo mencionado, que en este caso está en función de superar los parámetros establecidos, técnicos y, más importante, la factibilidad y facilidad de construcción.

#### **1.5. Alternativa 1: Moro carro eléctrico de tres ruedas**

El modelo de este vehículo es de gran utilidad en el sector comercial por sus características físicas y su capacidad de carga. Su compartimiento de carga se encuentra ubicado en la parte trasera y separada de la cabina del conductor, dicho espacio es una superficie rectangular cerrada en la cual se moviliza la mayor cantidad de carga posible, el diseño cerrado de este permite una disminución de la resistencia al aire lo que provoca un menor consumo

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

energético. Por otra parte, la cabina del conductor también tiene un diseño cerrado, que establece más seguridad, ya que cuenta con un sistema de puertas y ventanas que protegen al conductor de impactos y un cinturón que refuerza la seguridad de quien maneja.

### **Figura 19**

*Moto carro eléctrico de tres ruedas*



*Nota:* La figura muestra el modelo de Moto carro eléctrico de tres ruedas. Creación propia.

### **1.6. Alternativa 2: Vehículo eléctrico cerrado de tres ruedas**

El modelo de este vehículo es de gran utilidad en el sector comercial por sus características físicas y su capacidad de carga. Su compartimiento de carga se encuentra ubicado en la parte trasera pero unido a la cabina del conductor, el diseño cerrado de este conjunto permite una disminución de la resistencia al avance lo que provoca un menor consumo energético. Por otra parte, es más seguro, ya que cuenta con un sistema de puertas y ventanas que protegen al conductor de impactos y un cinturón que refuerza la seguridad de quien maneja.

### **Figura 20**

*Vehículo eléctrico cerrado de tres ruedas*

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA



*Nota:* La imagen muestra la alternativa dos del vehículo eléctrico cerrado de tres ruedas.

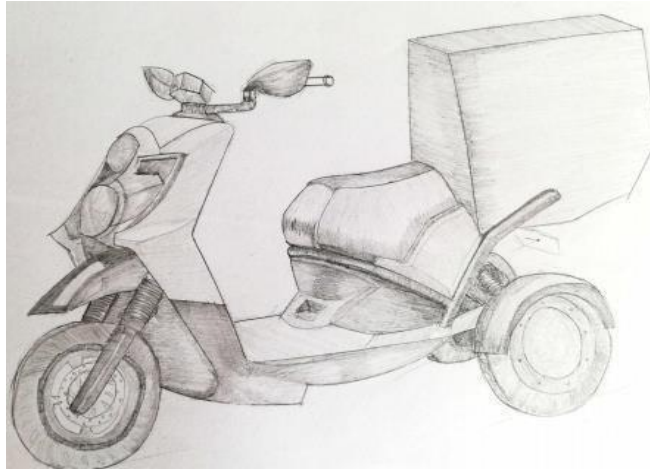
### **1.7. Alternativa 3: Triciclo eléctrico de carga**

El modelo de este vehículo permite el rápido ensamblaje de sus piezas lo que economiza el proceso de construcción. En vista de que cuenta con una estructura de triciclo representa un mejor posicionamiento para la seguridad y estabilidad del conductor en contraposición a las motos convencionales. A pesar de esto cuenta con superficies irregulares que alteran el flujo de aire convirtiéndolo en turbulento, es decir, formando remolinos de aire que aumentan la resistencia al avance.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

### Figura 21

*Triciclo eléctrico de carga*



*Nota:* La figura muestra la tercera alternativa del modelo de un triciclo eléctrico de carga.

### **MODELACIÓN AERODINÁMICA Y DE FORMA DE LA CARROCERÍA**

Para distinguir las necesidades de los modelos se tiene que tener en cuenta desde el comienzo que, un cambio en la aerodinámica de un vehículo no significa un cambio en el modelo del vehículo. Sin embargo, se puede garantizar que el desarrollo y las modificaciones de los componentes aerodinámicos individuales son visibles en el uso y consumo de la potencia del motor.

Esto generalmente ocurre cuando un vehículo que se mueve en cierta dirección y velocidad en relación con un fluido genera de cargas dinámicas por parte del fluido durante su movimiento dinámico configura la distribución de cargas estáticas en el cuerpo haciéndolo moverse hacia adelante o rebotar, lo que hace que se mueva, como agarrarse en la vía o despegar de ella.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

De manera que, respecto a las especificaciones de las alternativas a modelar se comprende que su fin es limitar cargas aerodinámicas desde una perspectiva innovadora y confortable.

### **1.8. Conceptualización del modelo para las alternativas**

Para distinguir las necesidades de los modelos se tiene que tener en cuenta desde el comienzo que, un cambio en la aerodinámica de un vehículo no significa un cambio en el modelo del vehículo. Sin embargo, se puede garantizar que el desarrollo y las modificaciones de los componentes aerodinámicos individuales son visibles en el uso y consumo de la potencia del motor.

Esto generalmente ocurre cuando un vehículo que se mueve en cierta dirección y velocidad en relación con un fluido genera de cargas dinámicas por parte del fluido durante su movimiento dinámico configura la distribución de cargas estáticas en el cuerpo haciéndolo moverse hacia adelante o rebotar, lo que hace que se mueva, como agarrarse en la vía o despegar de ella.

De manera que, respecto a las especificaciones de las alternativas a modelar se comprende que su fin es limitar cargas aerodinámicas desde una perspectiva innovadora y confortable.

### **Figura 22**

*Acinonyx jubatus*

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA



Nota: La imagen muestra al *Acinonyx Jubatus*. Tomado de: Guepardo o Chita (2023)

Deanimal Enciclopedia Animal.

Con el objetivo fundamental de la reducción del arrastre aerodinámico se plantean tres diferentes alternativas para llevar a cabo una semejanza de la cabeza del *acinonyx jubatus* (Guepardo) para la C1 del vehículo, y que a la vez presente confort, seguridad y estética fundamental para garantizar un óptimo alcance comercial.

### 1.9. Objetivos funcionales de las alternativas

Definidas las tres alternativas al desarrollar objetivos funcionales, el principal interés es satisfacer los requerimientos del consumidor y garantizar el cumplimiento de los parámetros técnicos para la C1 de un vehículo eléctrico utilitario monoplaça óptimo.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

**Tabla 2***Objetivos funcionales de las tres alternativas*

Requerimientos del consumidor	Especificaciones técnicas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad.</li> <li>• Volumen de carga.</li> <li>• Consumo energético.</li> <li>• Seguridad automotriz.</li> <li>• Estética vehicular.</li> <li>• <u>Mantenimiento.</u></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Innovación.</li> <li>• Diseño esterilizado.</li> <li>• Confort del habitáculo.</li> <li>• Resistencia aerodinámica.</li> <li>• Capacidad visual desde el habitáculo.</li> </ul>

*Nota:* La tabla representa un análisis de los requerimientos del consumidos frente a las especificaciones técnicas de este. Creación propia.

**1.10. Alternativa 1: Moto carro eléctrico de tres ruedas****1.10.1. Lineamientos base de diseños**

La línea base representa el punto inicial del proyecto, siendo el modelo base del vehículo y las primeras mediciones de sus parámetros más cruciales. Esta línea de base ilustra el diseño completo y definitivo del vehículo, incluyendo aspectos como la altura máxima, las dimensiones de ancho y largo, la distancia al suelo y los diámetros de las ruedas.

**Tabla 3***Dimensionamiento del vehículo uno*

Parámetro	Valor (mm)
Largo	2660
Ancho	1260
Alto	1200
Distancia	1400

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

entre ejes	
Rueda ( $\emptyset$ )	450

*Nota:* La tabla representa el dimensionamiento del vehículo uno.

Con respecto a otro tipo de consideraciones finales:

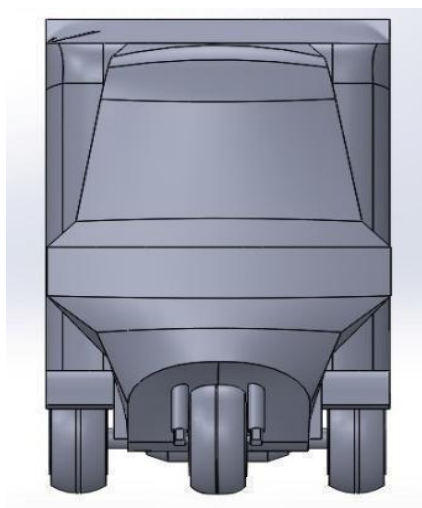
Parámetro	Descripción
Carrocería	Monoplaza
Numero de puertas	2

*Nota:* La tabla representa las consideraciones finales del vehículo uno

### 1.10.2. Modelado en SolidWorks

#### Figura 23

*Vista frontal de la alternativa uno*



*Nota:* La Figura muestra la vista frontal de la alternativa uno.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

**Figura 24**

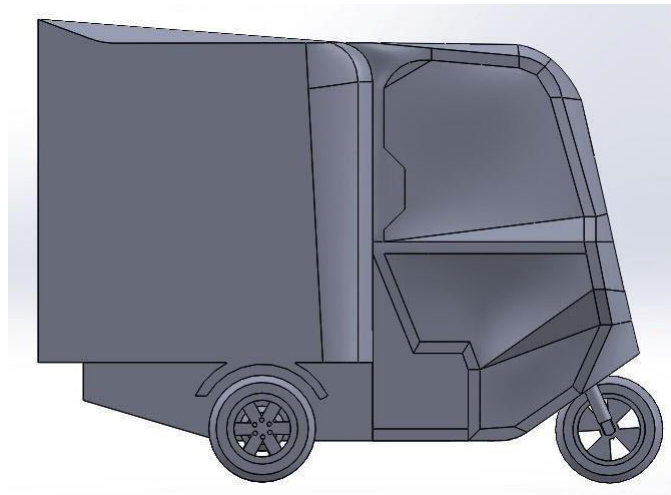
*Vista posterior de la alternativa uno*



*Nota:* La imagen muestra la vista posterior de la alternativa uno

**Figura 25**

*Vista derecha de la alternativa uno*

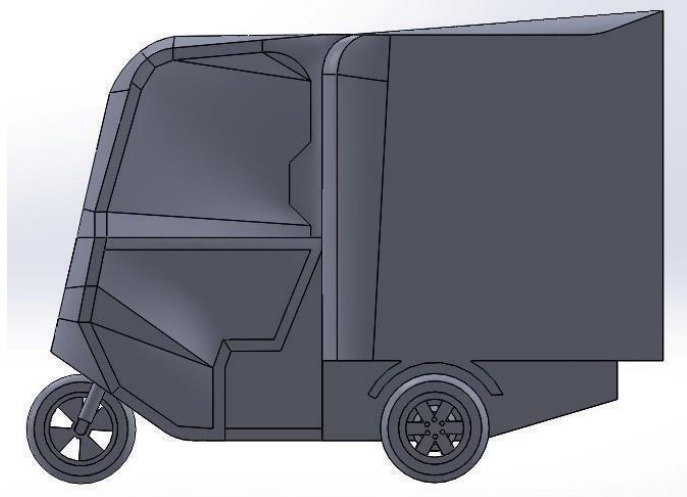


*Nota:* La figura muestra la vista derecha de la alternativa uno.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

**Figura 26**

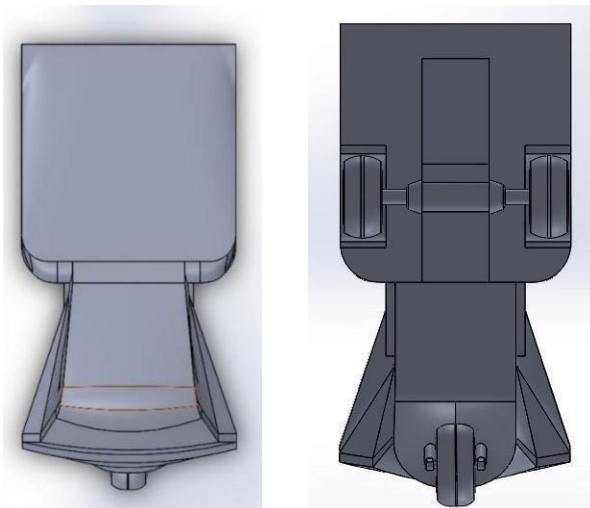
*Vista izquierda de la alternativa uno*



*Nota:* La imagen demuestra la vista izquierda de la alternativa uno.

**Figura 27**

*Vista superior e inferior de la alternativa uno*



*Nota:* La figura muestra la vista superior e inferior de la alternativa uno

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

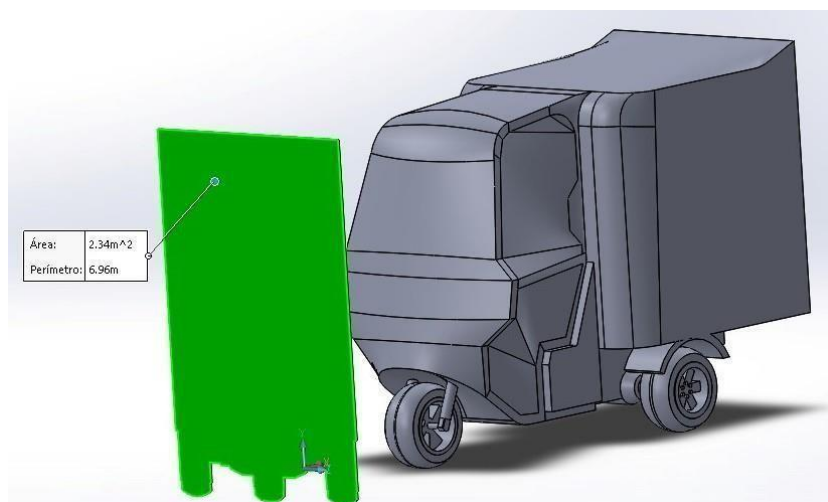
### *1.10.3. Superficie frontal*

Es el espacio que abarca en un plano perpendicular a la dirección longitudinal del automóvil, donde se encuentra la forma y contorno frontal o trasero del vehículo. En este caso, se examinará el área frontal en SolidWorks para obtener el área con más exactitud al ser un parámetro fundamental para el análisis aerodinámico.

$$\text{Área} = 2.34 \text{ m}^2$$

### **Figura 28**

*Área obtenida a través del plano frontal en SolidWorks de la alternativa uno*



## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

Nota: La figura representa el área obtenido a través del plano frontal en SolidWorks de la alternativa uno

### 1.11. Alternativa 2: Vehículo eléctrico cerrado de tres ruedas

#### 1.11.1. Lineamientos base de diseños

**Tabla 4**

*Dimensionamiento del vehículo dos*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor (mm)</b>
Largo	1900
Ancho	1000
Alto	1300
Distancia entre ejes	1400
Rueda ( $\emptyset$ )	450

*Nota:* La tabla representa las dimensiones del vehículo dos. Creación propia. Con respecto a otro tipo de consideraciones finales.

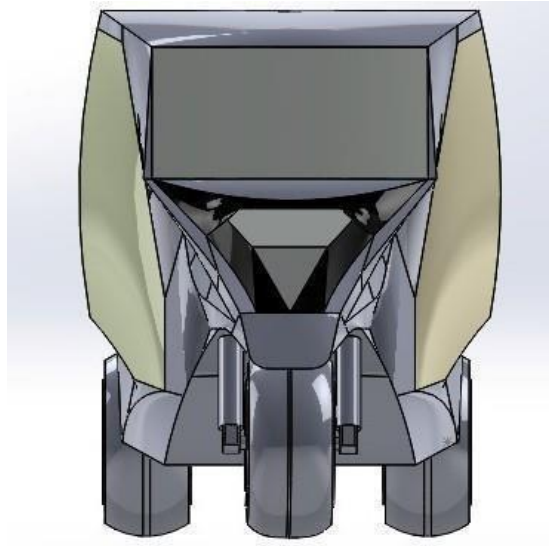
**Tabla 5**

*Consideraciones finales del vehículo dos*

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
Carrocería	Monoplaza
Numero de puertas	2

*Nota:* La tabla representa las consideraciones finales del vehículo dos.

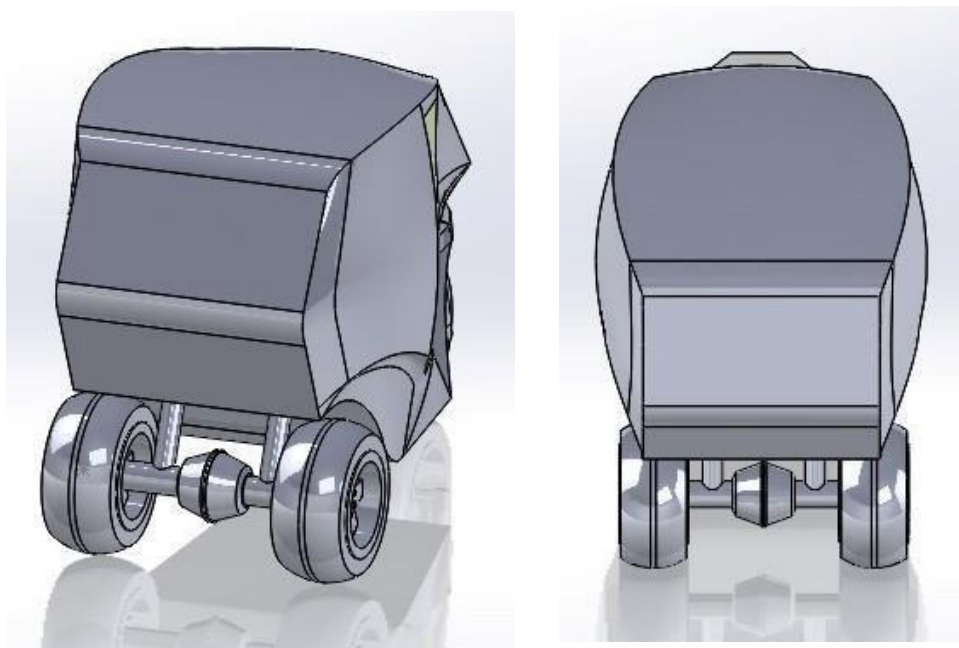
## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

*1.11.2. Modelado en SolidWorks***Figura 29***Vista frontal de la alternativa dos*

*Nota:* La figura demuestra la vista frontal del vehículo dos.

**Figura 30***Vista posterior de la alternativa dos*

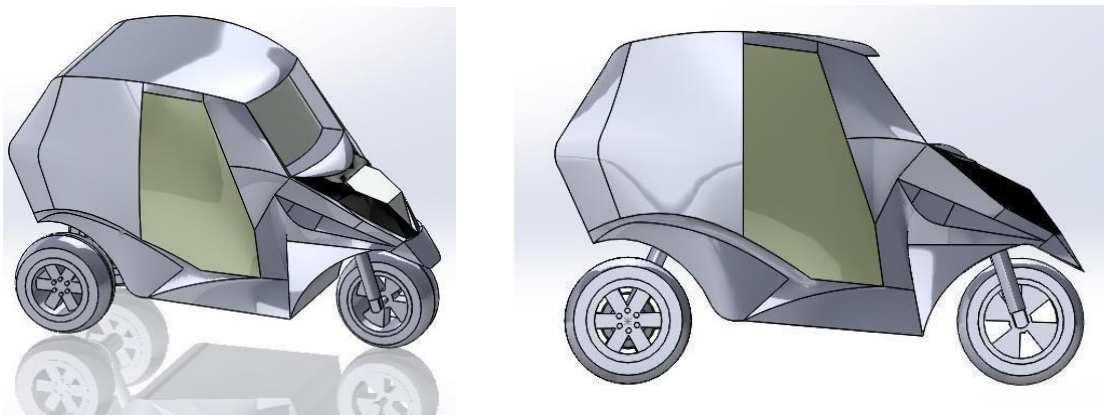
## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA



*Nota:* La figura muestra la vista posterior de la alternativa dos.

**Figura 31**

*Vista derecha de la alternativa dos*

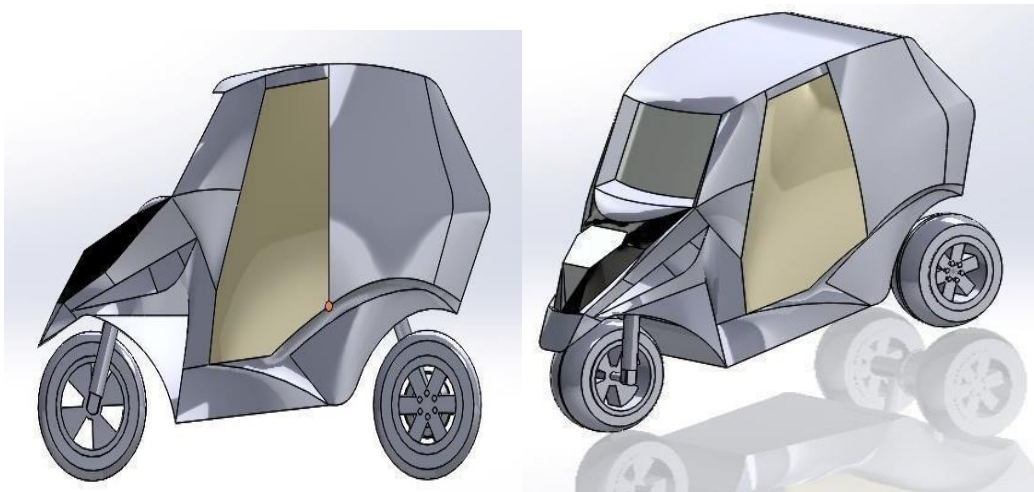


*Nota:* La figura muestra la vista derecha de la alternativa dos

**Figura 32**

*Vista izquierda de la alternativa dos*

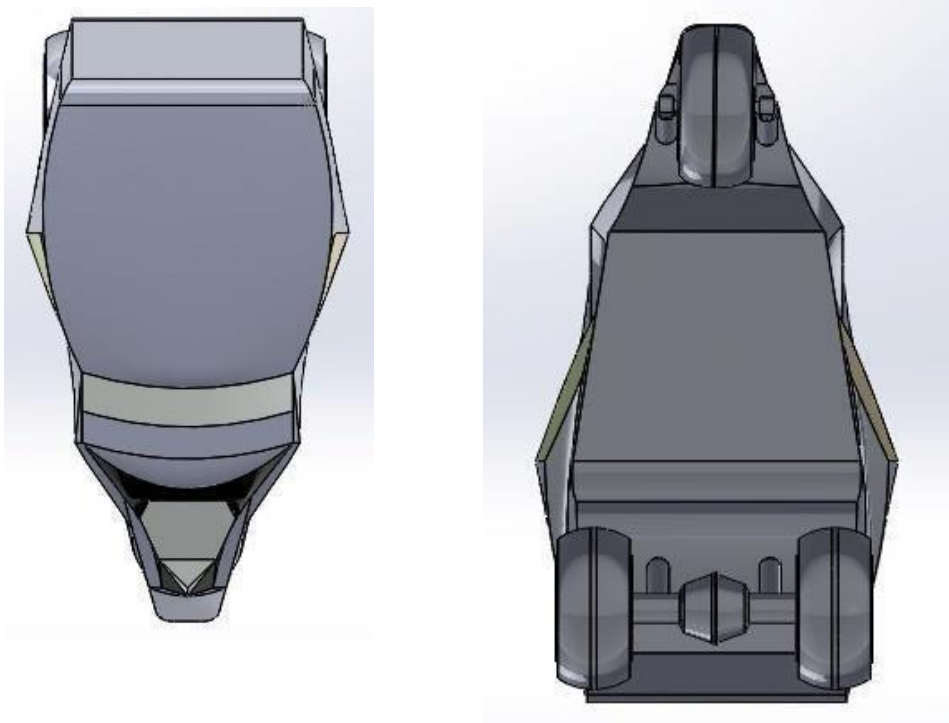
## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA



*Nota:* La figura muestra la vista izquierda de la alternativa dos

**Figura 33**

*Vista superior e inferior de la alternativa dos*



## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

*Nota:* La figura muestra la vista superior e inferior de la alternativa dos.

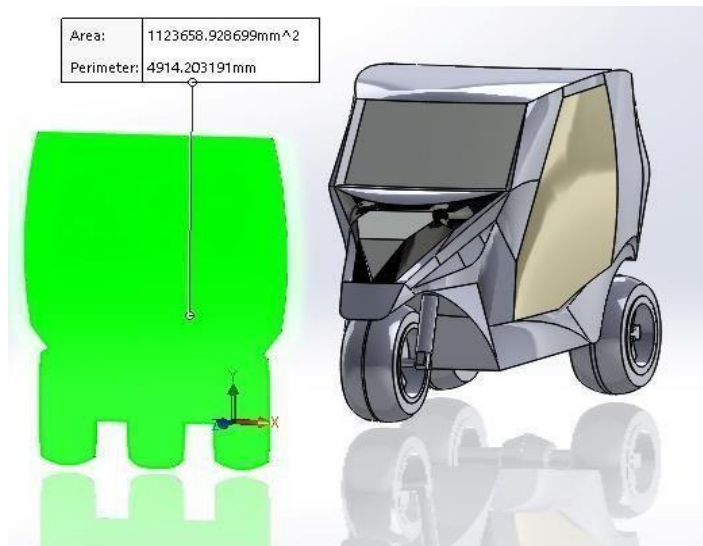
### 1.11.3. Superficie frontal

El área frontal de la alternativa dos en SolidWorks se evidencia que es:

$$\text{Área} = 1123658.699 \text{ mm}^2 = 1.123658699 \text{ m}^2$$

### Figura 34

*Área obtenida a través del plano frontal en SolidWorks de la alternativa dos*



*Nota:* SolidWorks de la alternativa dos.

## 1.12. Alternativa 3: Triciclo eléctrico de carga

### 1.12.1. Lineamientos base de diseños

### Tabla 6

*Dimensionamiento del vehículo tres*

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

<b>Parámetro</b>	<b>Valor (mm)</b>
Largo	1900
Ancho	800
Alto	1000
Distancia entre ejes	1400
Rueda ( $\emptyset$ )	450

*Nota:* La tabla demuestran las dimensiones del vehículo tres.

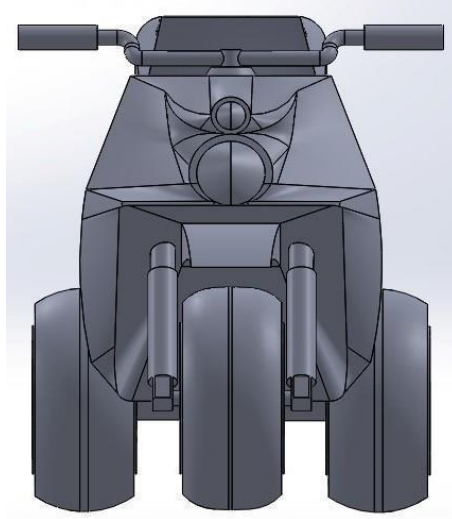
Con respecto a otro tipo de consideraciones finales:

**Tabla 7***Consideraciones finales del vehículo tres*

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
Carrocería	Monoplaza
Numero de puertas	No posee

*Nota:* La tabla representa las consideraciones finales del vehículo tres.

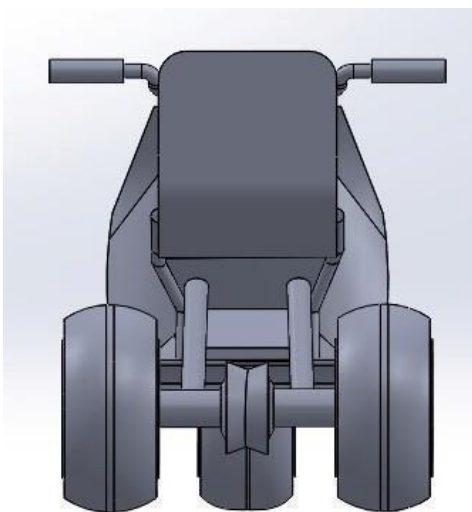
## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

*1.12.2. Modelado en SolidWorks***Figura 35***Vista frontal de la alternativa tres*

*Nota:* La figura demuestra la vista frontal de la alternativa tres.

**Figura 36***Vista posterior de la alternativa tres*

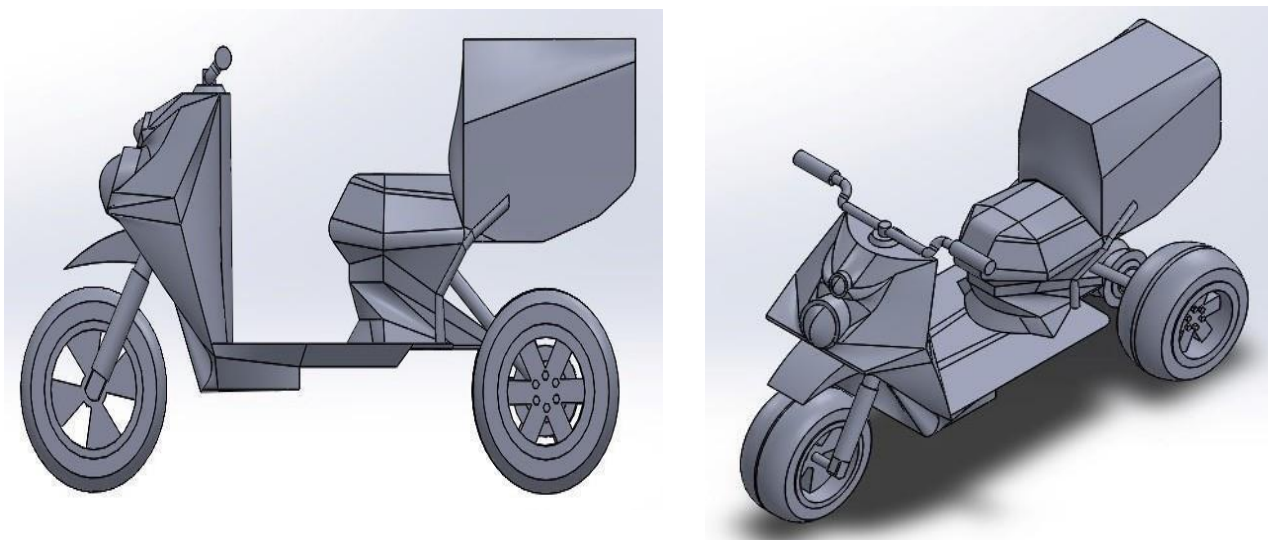
## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA



*Nota:* La figura muestra la vista posterior de la alternativa tres.

**Figura 37**

*Vista derecha de la alternativa tres*

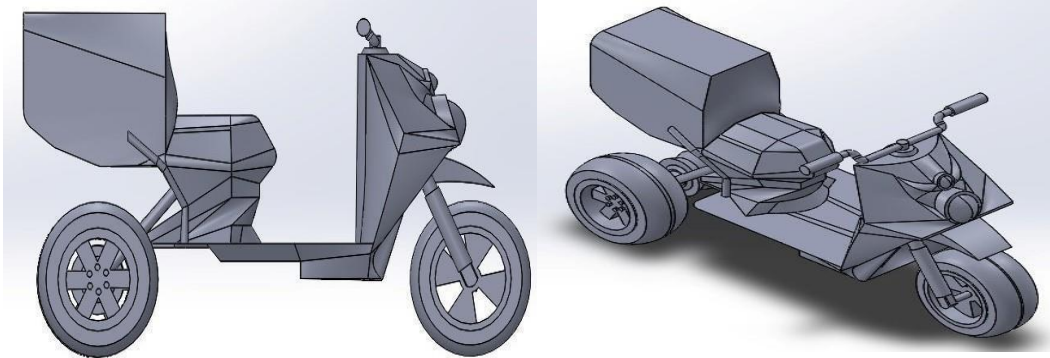


*Nota:* La figura demuestra la vista derecha de la alternativa tres

**Figura 38**

*Vista izquierda de la alternativa tres*

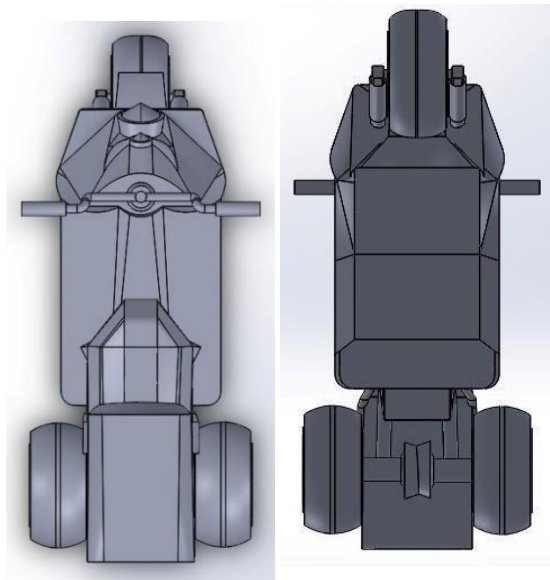
## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA



*Nota:* La figura demuestra la vista izquierda de la alternativa tres

**Figura 39**

*Vista superior e inferior de la alternativa tres*



*Nota:* La imagen muestra la vista superior e inferior de la alternativa tres.

***1.12.3. Superficie frontal***

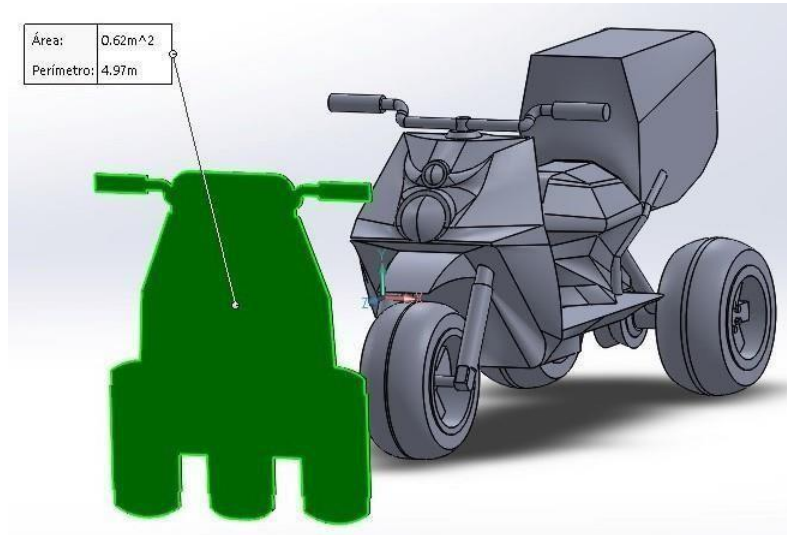
El área frontal de la alternativa dos en SolidWorks se evidencia que es:

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

$$\text{Area} = 0.62 \text{ m}^2$$

### Figura 40

Área obtenida a través del plano frontal en SolidWorks de la alternativa tres



*Nota:* La imagen muestra el área obtenida a través del plano frontal en SolidWorks de la alternativa tres.

### ESTUDIO AERODINÁMICO DE LAS ALTERNATIVAS

Se utilizará el software ANSYS para llevar a cabo el análisis aerodinámico. El enfoque utilizado por este programa para abordar tales problemas se conoce como método de volumen finito. Este método es comúnmente empleado en códigos CFD debido a sus beneficios en cuanto al manejo de memoria y la rapidez de la solución, especialmente para problemas que involucran flujos turbulentos con altos números de Reynolds.

La interfaz del programa es muy intuitiva. Con ANSYS Workbench, puede acceder a los diversos pasos que debe seguir para desarrollar una simulación.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

**Figura 41**

*Interfaz del Workbench de ANSYS*



*Nota:* La figura muestra el Interfaz del Workbench de ANSYS

La estructura general de un programa de análisis de elementos finitos consta de tres partes: pre procesamiento, procesamiento y pos procesamiento. El módulo de pre procesamiento consta de piezas de geometría y malla. Esta sección construirá un modelo capaz de crear geometría, crear líneas, áreas o volúmenes, e incluso exportar geometría desde otro programa de diseño. Una vez que se carga la geometría, se produce el ajuste. En esta sección, utilizamos diferentes modelos de mallas que pueden generarse manualmente o mediante herramientas de generación de mallas automáticas o controladas. La rejilla se considera una de las partes más importantes e importantes, porque depende de la densidad de la rejilla, el tipo de elementos, etc.

El resultado es completamente diferente. La investigación de convergencia debe realizarse en la web para obtener resultados válidos. El procesamiento incluye la aplicación de cargas, la aplicación de condiciones de contorno en nodos y elementos, y la realización de simulaciones numéricas. En esta sección, podemos aplicar propiedades apropiadas a diferentes

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

partes de la geometría, asignar propiedades físicas al fluido y seleccionar métodos de cálculo. Aquí podemos trabajar con valores de fuerza, empuje, desplazamiento, momento o rotación. Finalmente, el posprocesamiento proporciona visualización de los resultados. En este apartado podemos visualizar la geometría con los resultados de nuestro estudio u obtener un diagrama o una tabla de valores numéricos.

### 1.13. Parámetros atmosféricos de todas las alternativas de simulación

El estudio de la C1 debe llevarse a cabo considerando diversos parámetros, teniendo en cuenta las condiciones y requisitos detallados en la matriz QFD (Anexo A). Esta matriz describe el escenario más desfavorable, es decir, las condiciones climáticas que el vehículo podría enfrentar. Para estas condiciones meteorológicas, se tomaron en cuenta parámetros como la presión, altitud, temperatura y velocidad del viento en la ciudad de Bucaramanga.

**Tabla 8**

*Parámetros atmosféricos de la simulación*

<b>Parámetros</b>	<b>V:</b>
Temperatura	25 °C
Presión atmosférica	101.325 kPa
Presión relativa	0 Pa
Densidad	1.225 kg/m <sup>3</sup>
Velocidad	120 km/h
Altitud	959 m.s.n.m

*Nota:* La tabla refleja los datos atmosféricos utilizados en la simulación

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

Según Puerto (2011) La presión atmosférica en Bucaramanga es de 680 mmHg siendo 90.6592 kPa. Pero, este parámetro se regula a 1 atm siendo 101.325 kPa para representar mejor los efectos aerodinámicos.

La velocidad es un parámetro fundamental, puesto que es objeto de análisis. Está sujeta al artículo 107 de la ley 1239 de 2008 del Ministerio de Transporte (2008) al ejecutarse un estudio más adaptado a la realidad donde la ciudadanía infringe los límites de velocidad se estimó que conseguiríamos un análisis más exacto es 120 km/h.

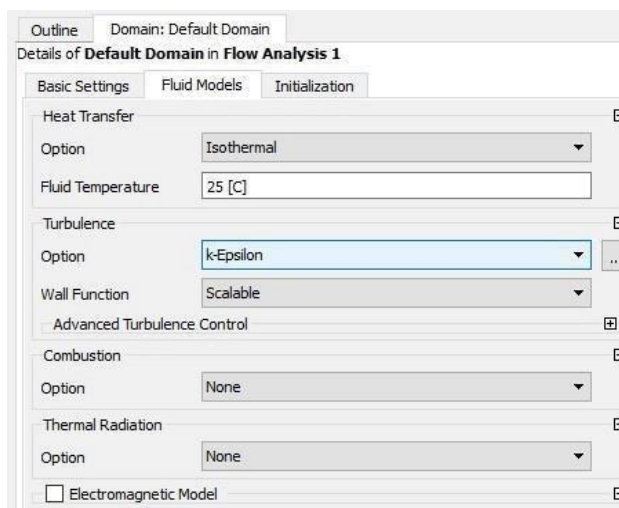
### **1.14. Configuración de todas las alternativas de simulación (modelo de turbulencia, condiciones de contorno y criterios)**

Fue seleccionado de acuerdo con el marco teórico, considerando sus ecuaciones y comparaciones con otros modelos, y se determinó que era el más apropiado entre los estudiados. Además, en el entorno de simulación, se utilizaron líneas isotérmicas para establecer una temperatura del fluido de 25 °C, según los datos atmosféricos proporcionados en la Tabla 10 del apartado de análisis y desarrollo.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

**Figura 42**

*Detalles para la simulación de la alternativa uno*



*Nota:* La figura demuestra los detalles para la simulación de la alternativa número uno.

**Tabla 9**

*Condiciones de la simulación para el modelo  $k-\varepsilon$*

<b>Condiciones de simulación (Set Up)</b>
Modelo de turbulencia $K-\varepsilon$
Outlet; Average static P = 0
Opening; Opening press P = 0
Inlet; Intensidad de turbulencia en la entrada del 5%
Wall: Free slip Wall
Tipo de análisis: CFD
Tipo de solver: CFX
Orden del elemento; lineal

*Nota:* La tabla demuestra las condiciones de la simulación para el modelo  $k-\varepsilon$ .

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

**6.2.2. Condiciones de fronteras de todas las alternativas de simulación**

Es fundamental determinar los límites del contorno, refinar áreas críticas y ejercer un mayor control sobre ellas durante la configuración y ejecución del análisis conlleva beneficios significativos.

**Tabla 10**

*Límite del contorno de todas las alternativas de simulación*

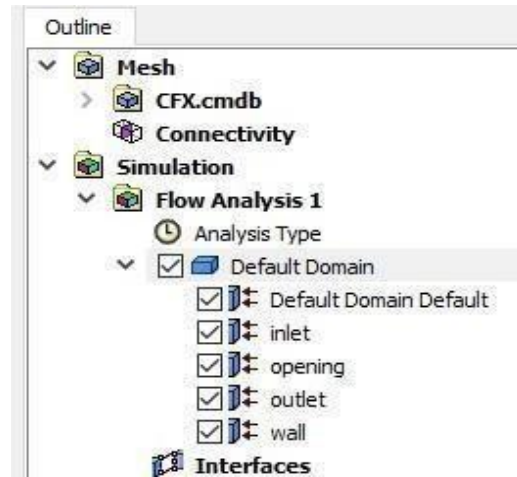
<b>Superficie</b>	<b>Cara</b>	<b>Descripción</b>
Inlet	1	Se refiere al flujo de aire que ingresa y se encuentra con la superficie frontal de la carrocería.
Outlet	2	Se refiere al flujo de aire que ingresa y se encuentra con la frontal de la carrocería.
Opening	3 – 4 - 5	Son las condiciones de contorno alrededor del vehículo.
Wall	6	Es la representación de la superficie del vehículo utilizada como una superficie sólida en el análisis aerodinámico. Esta superficie actúa como una pared virtual sobre la cual se estudian y evalúan los efectos del flujo de aire y las fuerzas aerodinámicas.

*Nota:* La tabla demuestra el límite del contorno de todas las alternativas de solución.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

**Figura 43**

*Condiciones de todas las alternativas de simulación*



*Nota:* La figura demuestra las condiciones de todas las alternativas de simulación.

### **1.15. Alternativa 1: Moto carro eléctrico de tres ruedas**

#### ***1.15.1. Geometría***

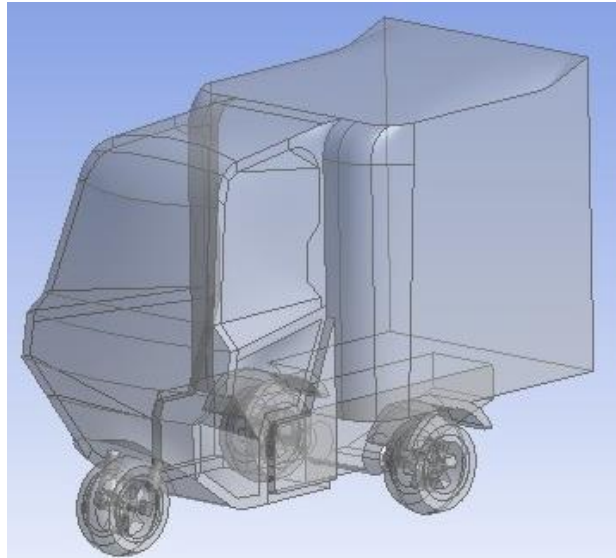
El proceso de preparación de superficies geométricas implica simplificar áreas del modelo con el fin de disminuir la cantidad total de superficies. Esto se realiza para facilitar la creación de una malla utilizando polígonos regulares, lo que permite que el programa trabaje de manera más eficiente y precisa en el análisis y simulación de la geometría.

Al importar el archivo de SolidWorks y generarlo en ANSYS, se observa que se encuentra compuesto de varias partes las cuales se requiere que sean una sola para un proceso de simulación más factible al momento de establecer una malla, de manera que se forma un solo sólido tal como se puede apreciar en la figura 44.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

### Figura 44

*Geometría de la alternativa uno sintetizada*



*Nota:* La figura demuestra la geometría de la alternativa uno sintetizada

#### **1.15.1.1. Volumen de control**

Se define para tener el análisis con las interacciones (aire) que se producen en las inmediaciones del vehículo a través del túnel de viento. Al ser un tipo de análisis que se precisa en el tamaño geométrico y de objeto, no se especifica ningún material o detalle. Se establecen las dimensiones del dominio de simulación para representar el espacio del túnel de viento, donde ocurren todos los procesos físicos relacionados con la aerodinámica del vehículo. Esto implica definir las dimensiones y límites del espacio de simulación que permiten capturar de manera adecuada el flujo de aire y las interacciones con el vehículo en estudio.

### Figura 45

*Parámetros establecidos para el volumen de control de la alternativa uno*

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

Sketching		Modeling	
Details View			
[-] Details of Enclosure1			
Enclosure	Enclosure1		
Shape	Box		
Number of Planes	0		
Cushion	Non-Uniform		
<input type="checkbox"/> FD1, Cushion +X value (>0)	4 m		
<input type="checkbox"/> FD2, Cushion +Y value (>0)	1 m		
<input type="checkbox"/> FD3, Cushion +Z value (>0)	1 m		
<input type="checkbox"/> FD4, Cushion -X value (>0)	3 m		
<input type="checkbox"/> FD5, Cushion -Y value (>0)	1e-08 m		
<input type="checkbox"/> FD6, Cushion -Z value (>0)	1 m		
Target Bodies	All Bodies		
Export Enclosure	Yes		

*Nota:* La figura demuestra los parámetros establecidos para el volumen de control de la alternativa uno

El fondo del volumen de control debe coincidir con las ruedas del vehículo para representar los efectos dinámicos del flujo de fluidos debajo del automóvil.

### ***1.15.2. Mallado***

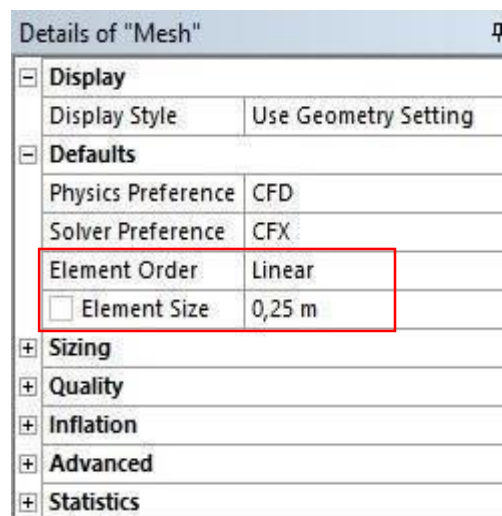
A fin del análisis CFD se debe generar el mallado a través de Ansys, que posee dos componentes principales para ejecutar el estudio: CFX y Fluent. Se optó por el solver CFX debido a su interfaz amigable y a que los recursos computacionales disponibles son suficientes para el alcance de la investigación. Esta elección se basa en la capacidad del solver para resolver de manera eficiente y precisa los problemas relacionados con la aerodinámica del vehículo, brindando resultados confiables y satisfactorios para el estudio en cuestión.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

Con respecto al tamaño del elemento refleja el nivel de detalle que desea obtener de su simulación, ya que cuanto más pequeños sean los elementos, más se acercará al valor exacto de la solución.

### Figura 46

*Detalles del mallado para la simulación de la alternativa uno*

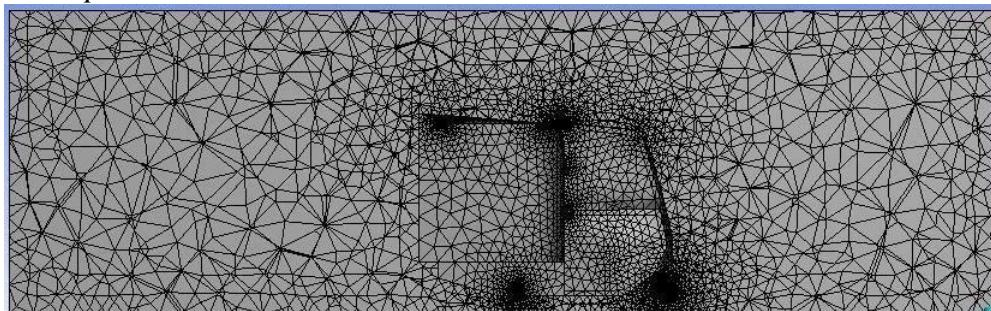


*Nota:* La figura detalla el mallado para la simulación de la alternativa uno. Creación propia.

Al aplicar los parámetros establecidos se observa que los elementos que se encuentran alrededor del automóvil poseen un mayor refinamiento.

### Figura 47

*Modelo mallado para la simulación de la alternativa uno*



## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

*Nota:* La figura es el modelo de mallado para la simulación de la alternativa.

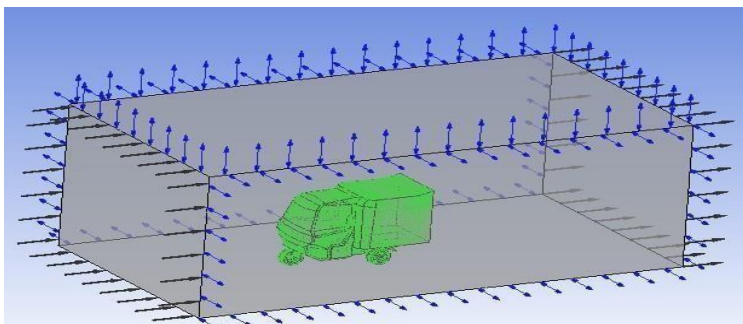
### ***1.15.3. Setup***

El ajuste del software implica configurar los parámetros necesarios y establecer las condiciones de frontera, teniendo en cuenta los marcadores creados en la etapa anterior.

Utilizando Ansys, es factible personalizar estos ajustes en el software se ajusta de acuerdo con los requisitos específicos del problema, como se describe en el capítulo 7.2.

### **Figura 48**

*Visualización de la zona de estudio para la simulación de la alternativa uno*



*Nota:* La figura representa la visualización de la zona de estudio para la simulación de la alternativa uno.

### ***1.15.4. Solución***

#### **1.15.4.1. Control de convergencia**

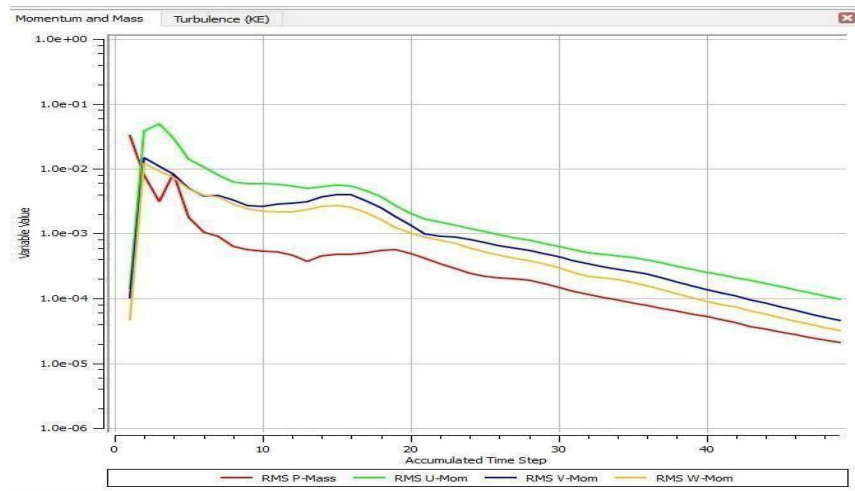
La técnica de volúmenes finitos implica la subdivisión del dominio en volúmenes discretos para llevar a cabo la discretización de las ecuaciones que rigen los fenómenos asociados con la mecánica de fluidos. A cada volumen finito dentro del dominio se le asignan propiedades específicas, lo que facilita la convergencia de la solución numérica de las ecuaciones diferenciales. El residuo, que representa la discrepancia entre el valor real y el valor aproximado, se utiliza como indicador de convergencia en cada elemento. Para evaluar el residuo en la

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

solución global del dominio, se utiliza el método RMS (Root Mean Square), que calcula la raíz cuadrada de la media de los residuos al cuadrado. De esta manera, se logra el control de convergencia, obteniéndose por medio de iteraciones hasta llegar al valor definido, desde  $1e-06$  hasta  $1e0$ .

### Figura 49

*Residuales de convergencia del análisis aerodinámico del vehículo uno*

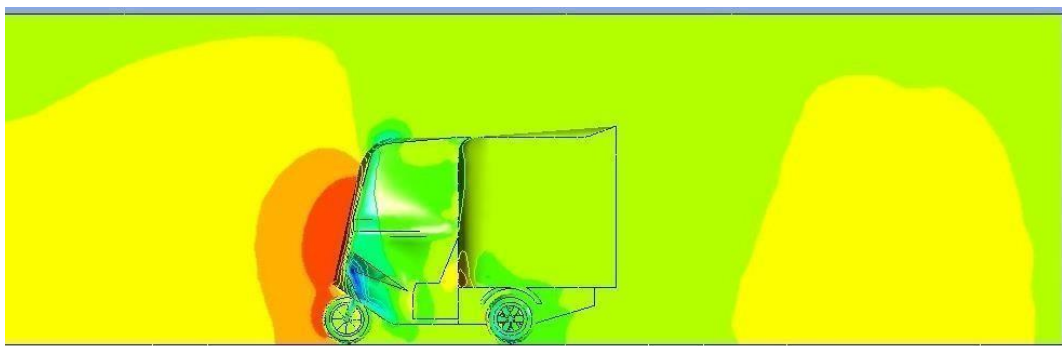


*Nota:* La figura demuestra los residuales de convergencia del análisis de convergencia aerodinámica del vehículo uno.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

**1.15.5. Resultados****1.15.5.1. Contornos de presión****Figura 50**

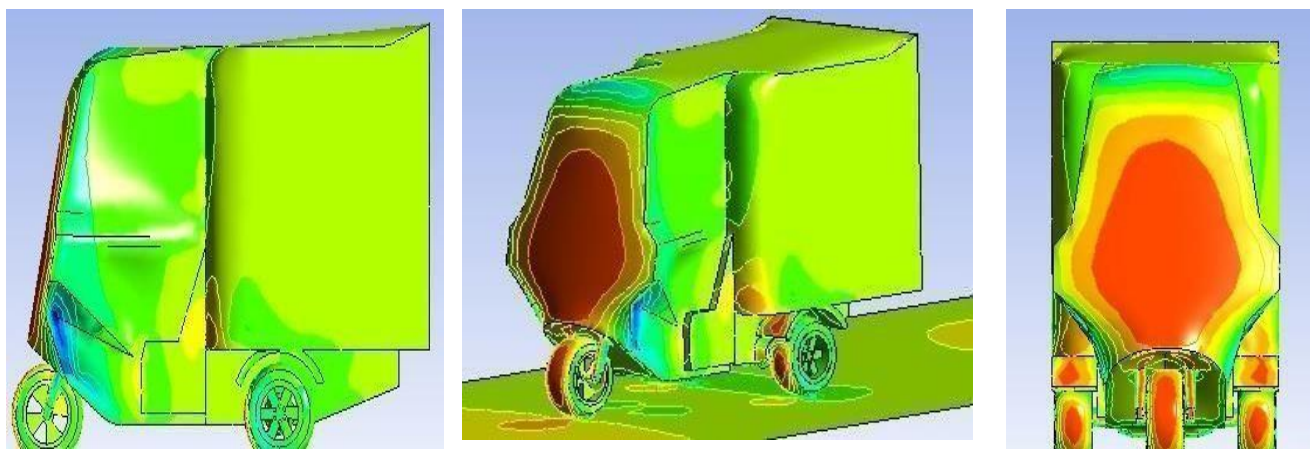
*Contorno de presión para el vehículo uno*



*Nota:* La imagen representa el contorno de presión para el vehículo uno.

**Figura 51**

*Distribución de presión en el vehículo uno*



*Nota:* La imagen muestra la distribución de presión en el primer vehículo

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

La figura 50 y 51 ilustran la distribución de presión alrededor del automóvil, destacando que la mayor concentración se encuentra en la superficie frontal. Los componentes aerodinámicos en la parte superior e inferior de la cabina facilitan el decrecimiento del gradiente de presión en estas áreas, brindando un contorno uniforme y simplificando la resistencia. La presión máxima es 705.37 [Pa] y la presión mínima es  $-1589.81$  [Pa].

### 1.15.5.2. Campo vectorial de velocidad

Se puede evidenciar en la figura 52 el vector de velocidad en torno al automóvil detectando que, en la parte delantera del habitáculo, tal cual, en la parte posterior del vehículo, se hallan gradientes de velocidad considerables.

#### Figura 52

*Campo vectorial de velocidad en el vehículo uno*



*Nota:* se evidencia el vector de velocidad en torno al automóvil detectando que, en la parte delantera del habitáculo, tal cual, en la parte posterior del vehículo, se hallan gradientes de velocidad considerables.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

### 1.15.5.3. Cálculos de coeficiente de arrastre sin refinamiento

Mediante las fórmulas establecida en el capítulo 4.2.5.4.1 sobre los fundamentos del coeficiente de arrastre y potencia se procede a realizar los cálculos con todos los parámetros establecidos.

$$C_x = \frac{2F_x}{\rho \cdot v^2 \cdot A_t} = \frac{2(574.722)}{1.184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(90 \frac{\text{h}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ km}}{1000 \text{ m}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}\right)^2 \cdot 2.34 \text{ m}^2}$$

$$C_x = 0.6638 \quad (12)$$

$$\text{Potencia} = \frac{C_x \cdot a \cdot v^3}{1225} = \frac{0.6638 \cdot 2.34 \text{ m}^2 \cdot \left(90 \frac{\text{h}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ km}}{1000 \text{ m}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}\right)^3}{1225}$$

$$\text{Potencia} = 19.81 \text{ [HP]}$$

*Nota:* La fuerza se arrastre empleada es la promedio calculada a través de las tablas en el ANEXO A.

### 1.15.5.4. Cálculos de coeficiente de arrastre con refinamiento

Mediante las fórmulas establecida en el capítulo 4.2.5.4.1 sobre los fundamentos del coeficiente de arrastre y potencia se procede a realizar los cálculos con todos los parámetros establecidos.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

$$C_x = \frac{2F_x}{\rho \cdot v^2 \cdot A_t} = \frac{2(547.281)}{1.184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (90 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}})^2 \cdot 2.34 \text{ m}^2}$$

$$C_x = 0.6321 \quad (13)$$

$$\text{Potencia} = \frac{C_x \cdot a \cdot v^3}{1225} = \frac{0.6321 \cdot 2.34 \text{ m}^2 \cdot (90 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}})^3}{1225}$$

$$\text{Potencia} = 18.86 \text{ [HP]}$$

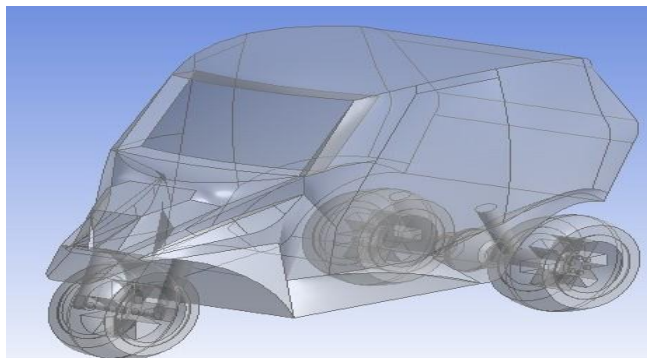
*Nota:* La fuerza de arrastre empleada es la promedio calculada a través de las tablas en el ANEXO A.

### 1.16. Alternativa 2: Vehículo eléctrico cerrado de tres ruedas

#### 1.16.1. Geometría

#### Figura 53

*Geometría de la alternativa dos sintetizada*

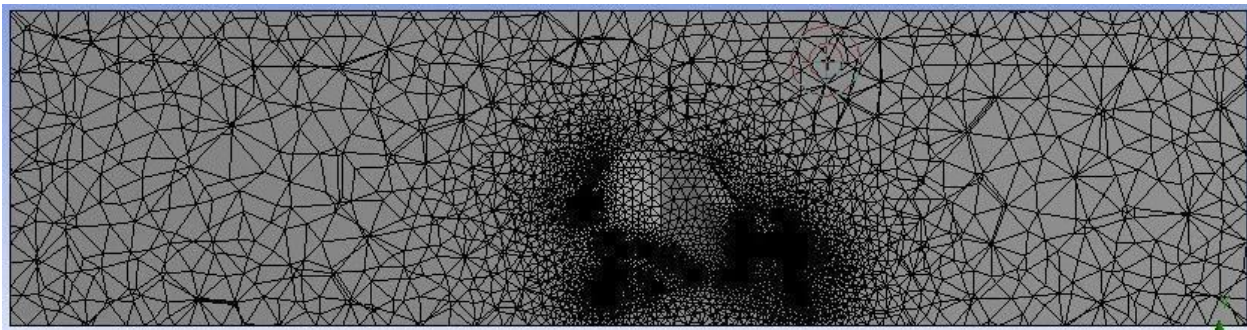


*Nota:* La imagen representa la geometría de la alternativa dos sintetizada.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

**1.16.2. Mallado****Figura 54**

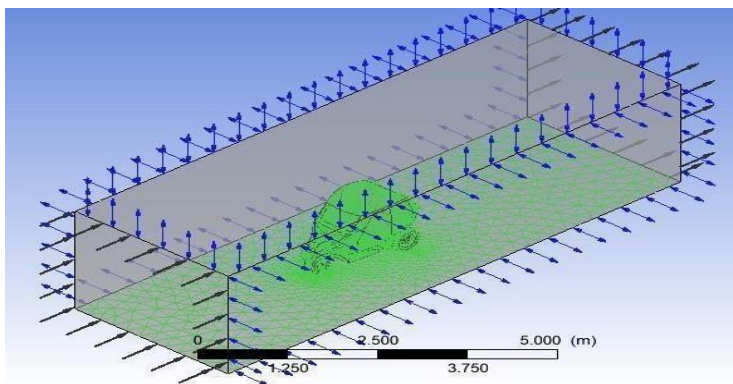
*Modelo mallado para la simulación de la alternativa dos*



*Nota:* La imagen representa el modelo mallado para la simulación de la alternativa dos.

**1.16.3. Set up****Figura 55**

*Visualización de la zona de estudio para la simulación de la alternativa dos*

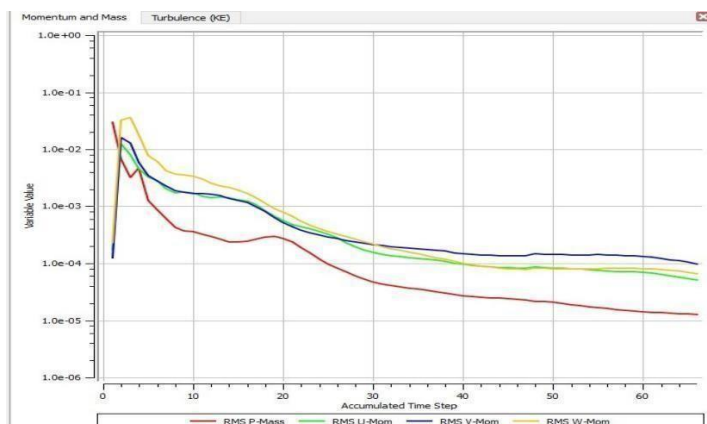


*Nota:* La figura representa la visualización de la zona de estudio para la simulación de la alternativa dos.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

**1.16.4. Solución****Figura 56**

*Residuales de convergencia del análisis aerodinámico del modelo dos*



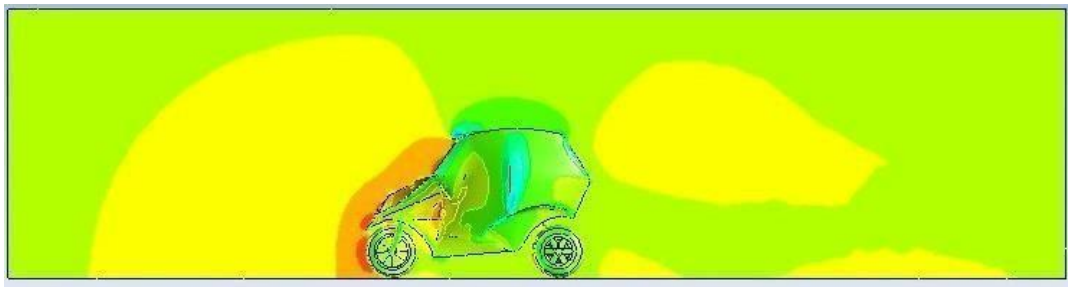
*Nota:* La figura representa las residuales de convergencia del análisis aerodinámico del vehículo dos.

Se evidencia en la figura 55 que el valor RMS (Root Mean Square) se consigue por medio de iteraciones desde  $1e^{-06}$  hasta  $1e^0$  pero en los primeros 10 minutos del tiempo acumulado la variable evaluada (En este caso, la fuerza de arrastre) los valores de RMS U- Mom, RMS V-Mom y RMS W-Mom son semejantes mientras que el valor de RMS P-Mas es diferente mostrando una función decreciente a medida de las iteraciones. Al ser todos los criterios de convergencia definidos se cumplen al mismo tiempo se finaliza la iteración.

**1.16.5. Resultados****1.16.5.1. Contornos de presión****Figura 57**

*Contornos de presión para el vehículo dos*

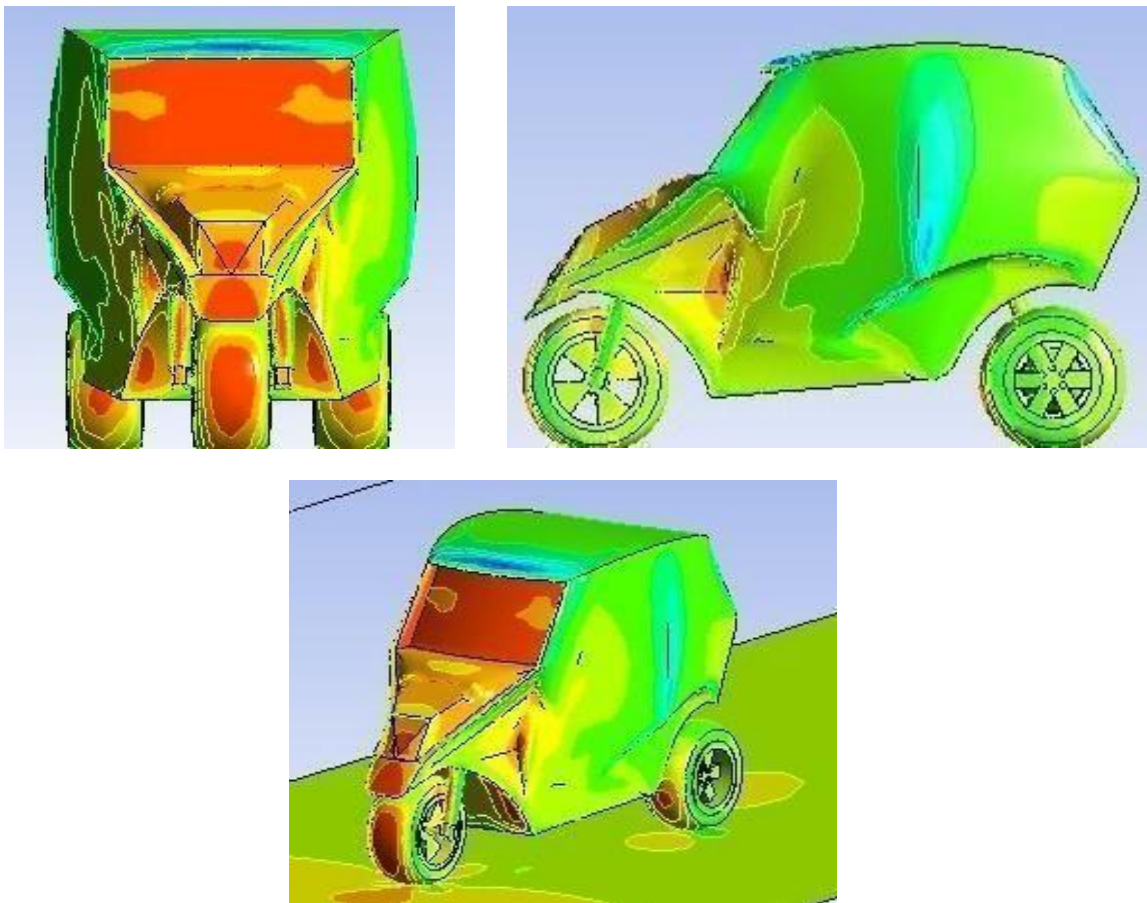
## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA



*Nota:* La imagen ilustra el contorno de presión para la Alternativa 2.

**Figura 58**

*Distribución de presión en el vehículo dos*



*Nota:* La figura es la distribución de presión en el vehículo dos.

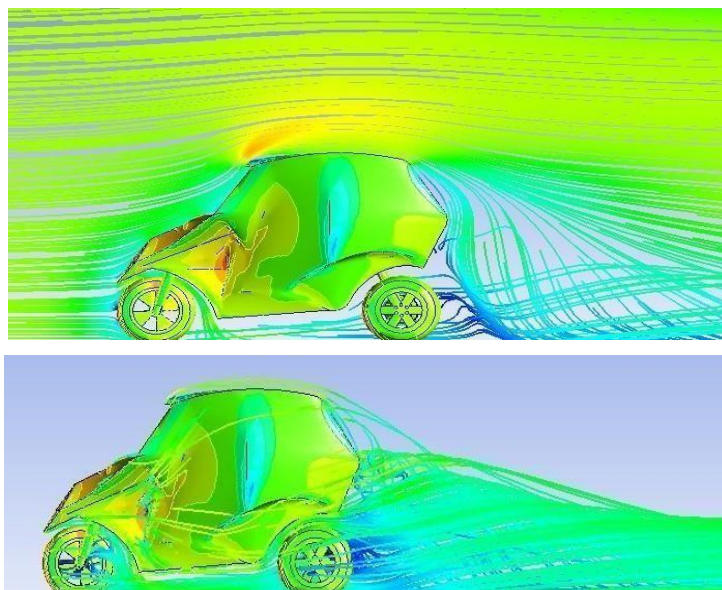
## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

A partir de la figura 56 y figura 57 la distribución de presión en torno al automóvil mostrando que la mayor concentración es en la parte de la superficie frontal (El parabrisas, las ruedas y el capot). De manera que, mientras que se avanza para la parte posterior del vehículo se va reduciendo el gradiente de presión. La presión máxima es 688.883 [Pa] y la presión mínima es -1565.29 [Pa].

### 1.16.5.2. Campo vectorial de velocidad

#### Figura 59

*Campo V vehículo dos*



*Nota:* La figura representa el campo vectorial de la velocidad en el vehículo dos.

La figura 58 muestra en detalle las regiones donde se separa el fluido, donde se forman remolinos y regiones de flujo estancado. Se pueden observar áreas turbulentas donde los remolinos resultantes aumentan el coeficiente de arrastre del vehículo. También se muestran los

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

vectores de velocidad detrás del vehículo. Por lo tanto, es apropiado analizar un sistema que incluya elementos aerodinámicos en estas zonas que reduzcan significativamente la resistencia aerodinámica y las perturbaciones, retardar la separación de la capa límite de la superficie del vehículo podría disminuir el tamaño de la estela y, en consecuencia, el consumo de energía.

### 1.16.5.3. Cálculos de coeficiente de arrastre sin refinamiento

$$C_x = \frac{2F_x}{\rho \cdot v^2 \cdot A_t} = \frac{2(251.557 \text{ N})}{1.184 \text{ m}^3 \cdot (90 \text{ h} \cdot 1 \text{ km} \cdot 3600 \text{ s})^2 \cdot 1.123658699 \text{ m}^2}$$

$$C_x = 0.6054 \quad (14)$$

$$\text{Potencia} = \frac{C_x \cdot a \cdot v^3}{1225} = \frac{0.6054 \cdot 1.123658699 \text{ m} \cdot (90 \text{ h} \cdot 1 \text{ km} \cdot 3600 \text{ s})^3}{1225}$$

$$\text{Potencia} = 8.67 \text{ [HP]}$$

*Nota:* La fuerza de arrastre empleada es la promedio calculada a través de las tablas en el ANEXO A.

### 1.16.5.4. Cálculos de coeficiente de arrastre con refinamiento

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

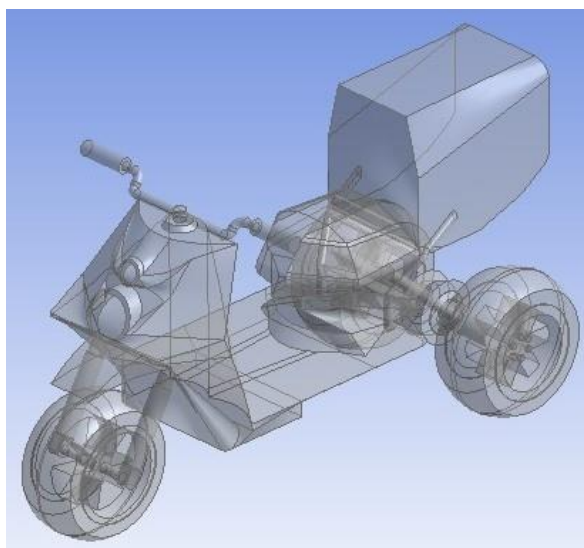
$$C_x = \frac{2F_x}{\rho \cdot v^2 \cdot A_t} = \frac{2(207.353 \text{ N})}{\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (90 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}})^2 \cdot 1.123658699 \text{ m}^2}$$

$$C_x = 0.5009$$

(15)

$$\text{Potencia} = \frac{C_x \cdot a \cdot v^3}{1225} = \frac{0.5009 \cdot 1.123658699 \text{ m}^2 \cdot (90 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}})^3}{1225}$$

$$\text{Potencia} = 7.174 \text{ [HP]}$$

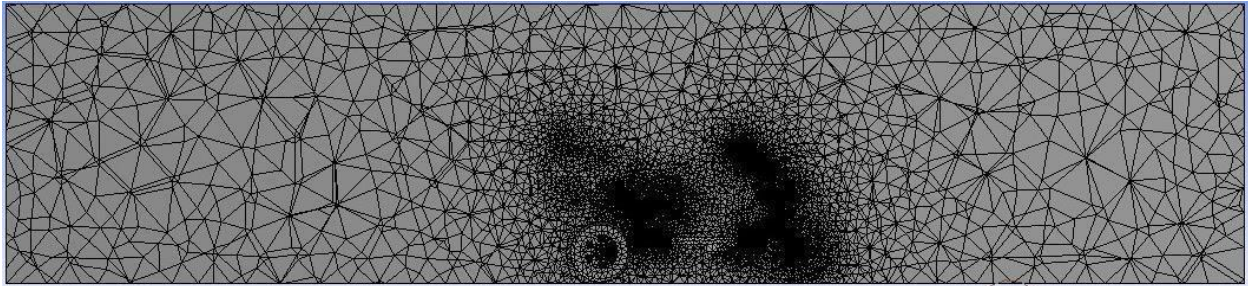
**1.17. Alternativa 3: Triciclo eléctrico de carga****1.17.1. Geometría****Figura 60***Geometría de la alternativa tres sintetizada*

*Nota:* La imagen determina la geometría de la alternativa tres sintetizada.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

**1.17.2. Mallado****Figura 61**

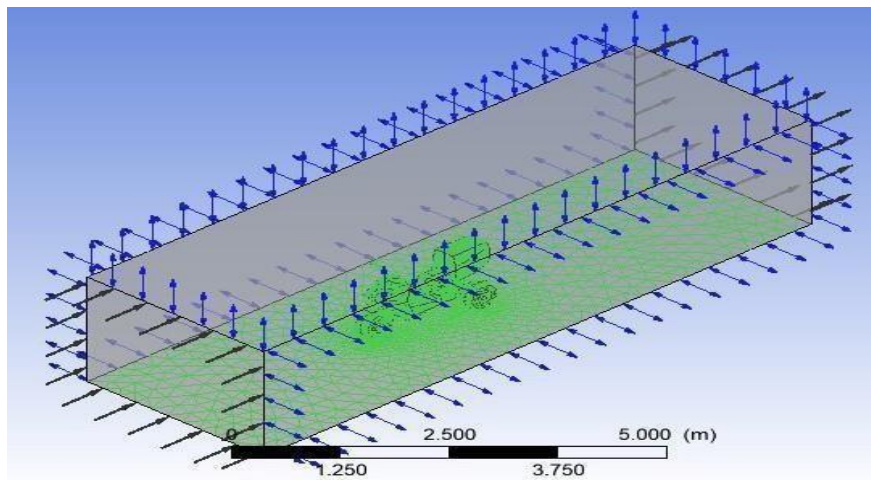
*Modelo mallado para la simulación de la alternativa tres*



*Nota:* La imagen representa el modelo mallado para la simulación de la alternativa tres.

**1.17.3. Set up****Figura 62**

*Visualización de la zona de estudio para la simulación de la alternativa tres*



*Nota:* La imagen representa la visualización de la zona de estudio para la simulación de la alternativa tres.

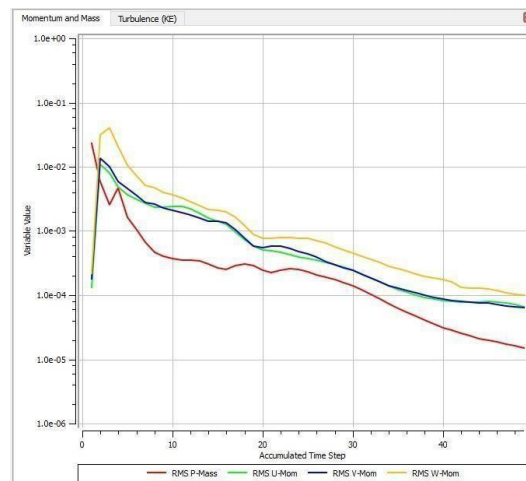
## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

### 1.17.4. Solución

Se evidencia en la figura 62 que el valor RMS (Root Mean Square) los valores de la variable evaluada están en un rango de  $1e^{-04}$  hasta  $1e^{-01}$  durante más de 40 minutos de iteración en el tiempo acumulado presentándose una gráfica decreciendo de todas las variables hasta llegar a una fuerza de arrastre precisa.

### Figura 63

*Residuales de convergencia del análisis aerodinámico del vehículo tres*



*Nota:* La imagen representa los residuales de convergencia del análisis aerodinámico del vehículo tres.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

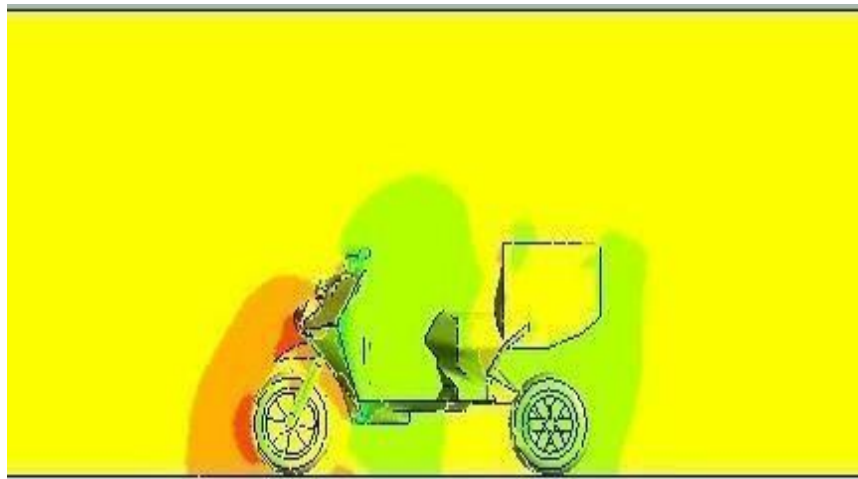
### *1.17.5. Resultados*

#### **1.17.5.1. Contornos de presión**

La figura 63 presenta el contorno de presión en torno al vehículo teniendo como resultado que el campo de presión está entre  $-1950.39$  [Pa] y  $716.401$  [Pa] . Este comportamiento uniforme alrededor del vehículo no se compara con ningún otro observado en los casos anteriores debido a la geometría aplicada. La figura 64 muestra una conveniente apreciación de esta afirmación.

#### **Figura 64**

*Contorno de presión para el vehículo tres*

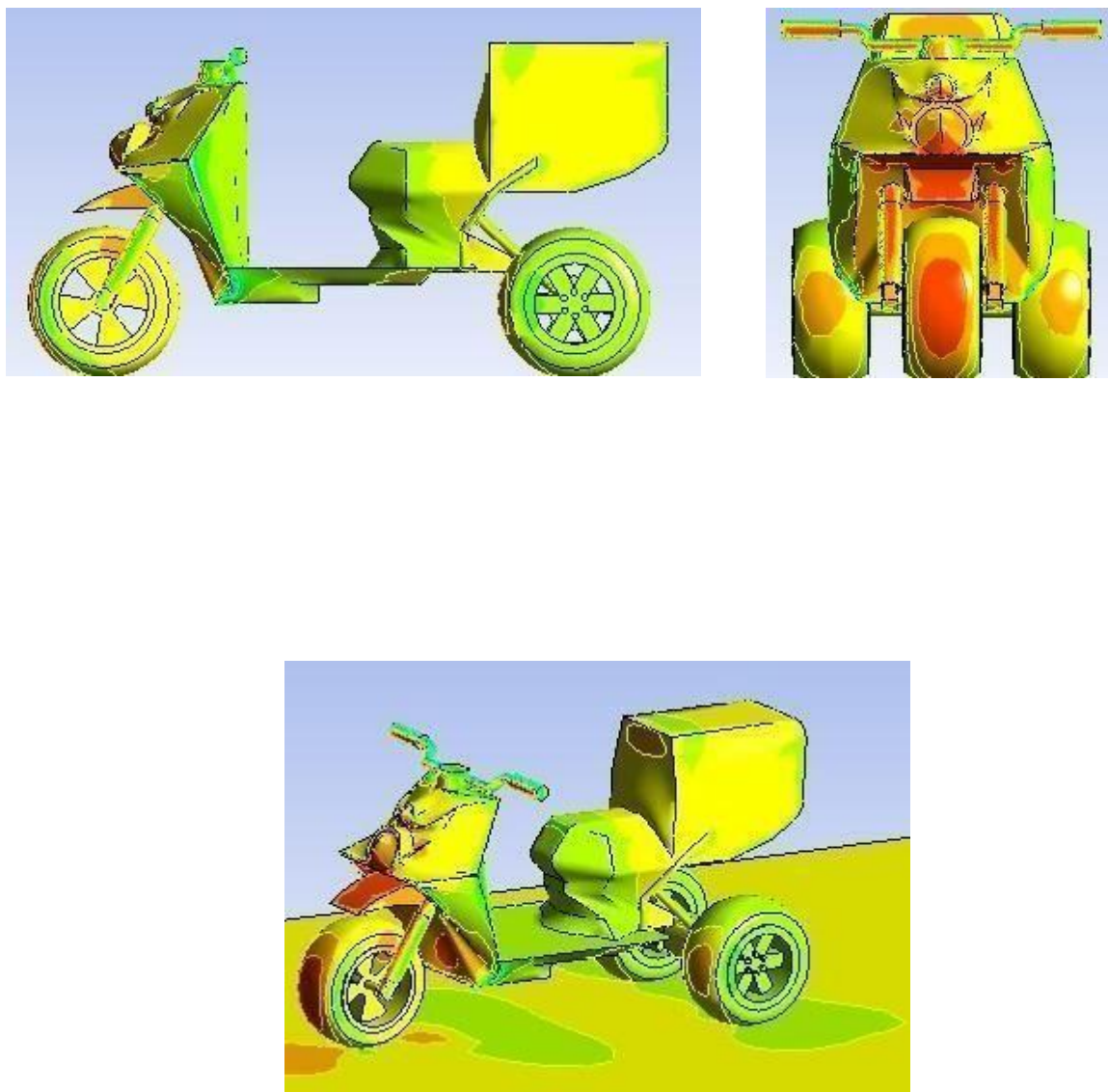


## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

*Nota:* presenta el contorno de presión en torno al vehículo teniendo como resultado que el campo de presión está entre  $-1950.39$  [Pa] y  $716.401$  [Pa]. Este comportamiento uniforme alrededor del vehículo no se compara con ningún otro observado en los casos anteriores debido a la geometría aplicada.

**Figura 65**

*Distribución de presión en el vehículo tres*



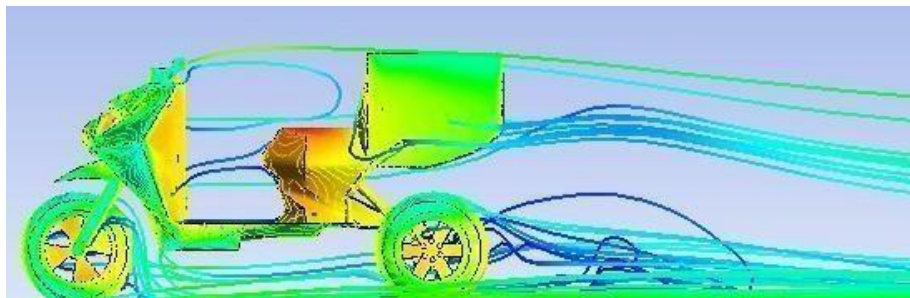
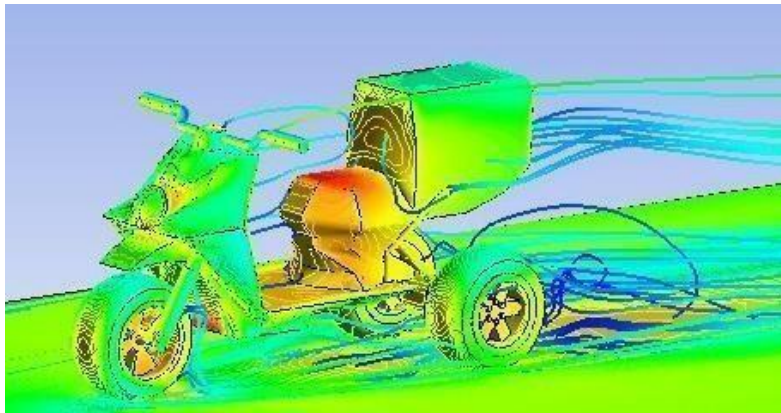
## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

*Nota:* La figura demuestra la distribución de la presión del vehículo tres.

### 1.17.5.2. Campo vectorial de velocidad

#### Figura 66

*Campo vectorial de velocidad en el vehículo tres*



*Nota:* La figura representa el campo vectorial de velocidad en el vehículo tres.

La figura 65 minuciosamente en detalle las zonas como se trasmite la velocidad en el vehículo. Dada la geometría, la resistencia aerodinámica se va incrementando.

### 1.17.5.3. Cálculos de coeficiente de arrastre sin refinamiento

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

$$C_x = \frac{2F_x}{\rho \cdot v^2 \cdot A_t} = \frac{2(182.146 \text{ N})}{\frac{\text{kg}}{\text{km}^3} \cdot \frac{1000 \text{ m}}{\text{h}}^2 \cdot 1.184 \text{ m}^3 \cdot (90 \text{ h} \cdot 1 \text{ km} \cdot 3600 \text{ s}) \cdot 0.62 \text{ m}^2}$$

(16)

$$C_x = 0.7691$$

$$\text{Potencia} = \frac{C_x \cdot a \cdot v^3}{1225} = \frac{0.7691 \cdot 0.62 \text{ m}^2 \cdot (90 \text{ h} \cdot 1 \text{ km} \cdot 3600 \text{ s})^3}{1225}$$

$$\text{Potencia} = 6.082 \text{ [HP]}$$

**1.17.5.4. Cálculos de coeficiente de arrastre con refinamiento**

$$C_x = \frac{2F_x}{\rho \cdot v^2 \cdot A_t} = \frac{2(166.917 \text{ N})}{\frac{\text{kg}}{\text{km}^3} \cdot \frac{1000 \text{ m}}{\text{h}}^2 \cdot 1.184 \text{ m}^3 \cdot (90 \text{ h} \cdot 1 \text{ km} \cdot 3600 \text{ s}) \cdot 0.62 \text{ m}^2}$$

(17)

$$C_x = 0.7048$$

$$\text{Potencia} = \frac{C_x \cdot a \cdot v^3}{1225} = \frac{0.7048 \cdot 0.62 \text{ m}^2 \cdot (90 \text{ h} \cdot 1 \text{ km} \cdot 3600 \text{ s})^3}{1225}$$

$$\text{Potencia} = 5.573 \text{ [HP]}$$

*Nota:* La fuerza de arrastre empleada fue la promedio calculadas de las tablas presentes en el **ANEXO A**.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 1.18. Análisis del mallado

Para obtener resultados precisos, es esencial realizar un análisis exhaustivo y manipulación de los datos recopilados en cada simulación. Esto permite aislar el resultado final y corregir posibles errores derivados del truncamiento de datos, la calidad de la malla y otros aspectos relacionados.

##### *1.18.1. Malla sin refinamiento*

Los modelos sin refinamiento proporcionan una vista general del dominio y de la interfaz sólido-fluido, con elementos de tamaño uniforme que aseguran una homogeneidad en el dominio. Sin embargo, esta malla no se centra en superficies de interés donde ocurren fenómenos relevantes, como la separación de la capa límite, que están asociados con el contorno del vehículo.

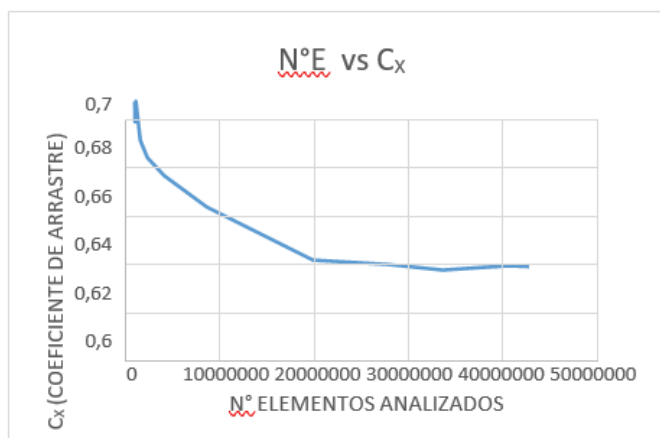
##### **1.18.1.1. Alternativa 1**

La gráfica siguiente representa la variación del coeficiente de arrastre en el eje Y con diferentes cantidades de elementos en la Alternativa 1. La ausencia de refinamiento en áreas críticas de la superficie provoca fluctuaciones en el coeficiente de arrastre, sin lograr estabilizarse en un valor específico. Incluso al emplear un elevado número de elementos, no se alcanza una convergencia estable.

#### **Figura 67**

*Gráfico de número de elementos vs coeficiente de arrastre*

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA



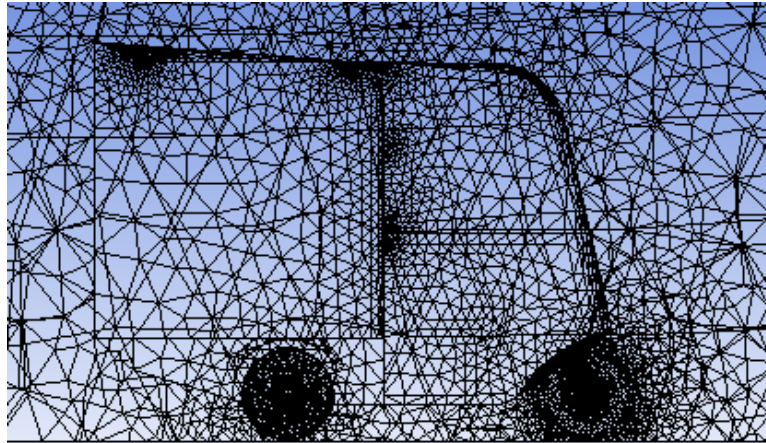
*Nota:* La grafica representa la comparación entre tipo de gráfico y configuración que sucedea través del coeficiente de arrastre vs los números de elementos proporcionados por las tablas en el **ANEXO A**.

Como se observa en Figura 67 se observa que el mallado superficial de la alternativa 1 es de tipo tetraédrica debido a su geometría compleja, con la gráfica anterior podemos dar a conocer los diferentes tipos de estudio hechos a la alternativa 1, teniendo como variable el tamaño de elementos asignado (Element Size).

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

**Figura 68**

*Mallado superficial tipo tetraédrico*



*Nota:* La figura se genera a través del programa empleado para su estudio.

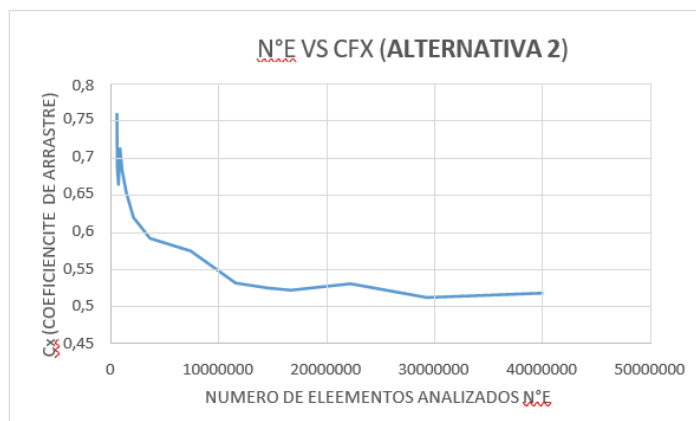
**1.18.1.2. Alternativa 2**

La siguiente gráfica 68 muestra la variación del coeficiente de arrastre a lo largo del eje (Y) en la alternativa 2, en relación con diferentes cantidades de elementos. Se observa que, de manera similar a lo observado en la alternativa 1, la falta de refinamiento en áreas críticas de la superficie provoca fluctuaciones en el coeficiente de arrastre, sin lograr estabilizarse en un valor específico. A pesar de emplear una cantidad considerable de elementos, la convergencia del sistema no se estabiliza de manera consistente.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

**Figura 69**

*Grafica de número de elementos vs coeficiente de arrastre*



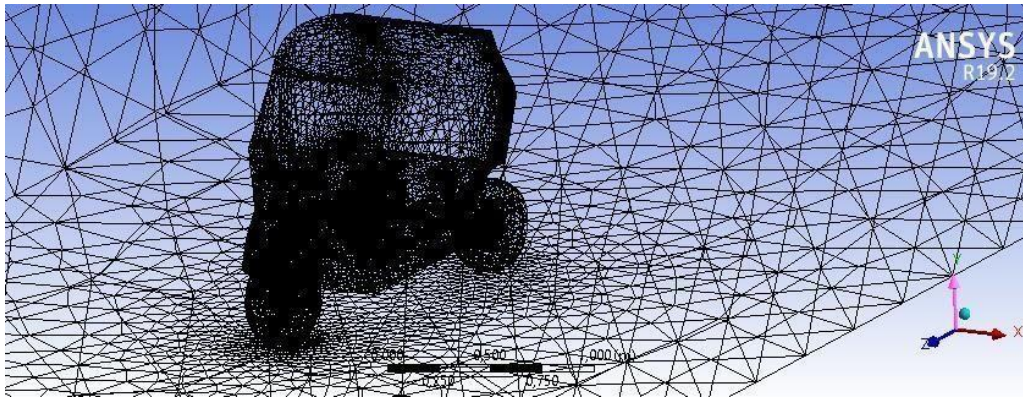
*Nota:* La grafica representa la comparación entre tipo de gráfico y configuración que suceda través del coeficiente de arrastre vs los números de elementos proporcionados por las tablas en el **ANEXO A**.

Como se puede apreciar en la figura 69, el mallado superficial de la alternativa 2 se presenta en forma de tetraedros, lo cual es adecuado para su geometría compleja. Al analizar la gráfica previa, podemos identificar los diversos tipos de análisis realizados en la alternativa 2, utilizando como variable el tamaño de los elementos asignados (Element Size).

**Figura 70**

*Mallado superficial tipo tetraédrico*

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA



*Nota:* La figura se genera a través del programa empleado para su estudio

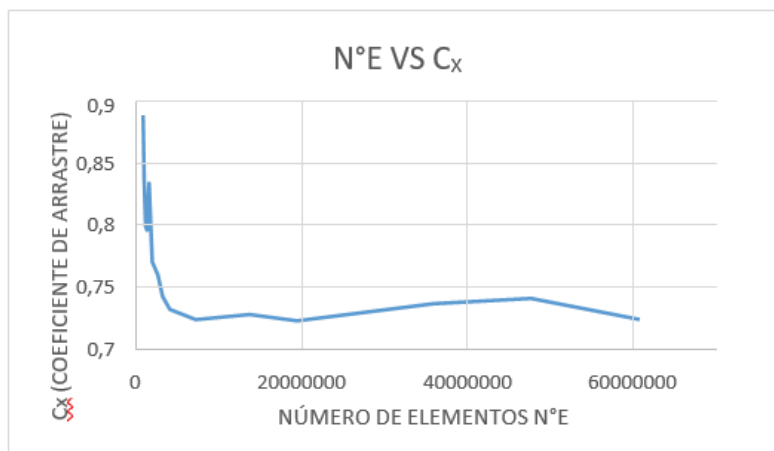
### 1.18.1.3. Alternativa 3

La siguiente figura 70 muestra la variación del coeficiente de arrastre a lo largo del eje (Y) en la alternativa 3, en relación con diferentes cantidades de elementos. Se observa que, de manera similar a lo observado en la alternativa 1 y en la alternativa 2, la falta de refinamiento en áreas críticas de la superficie provoca fluctuaciones en el coeficiente de arrastre, sin lograr estabilizarse en un valor específico. A pesar de emplear una cantidad considerable de elementos, la convergencia del sistema no se estabiliza de manera consistente.

### Figura 71

*Grafica de número de elementos vs coeficiente de arrastre*

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

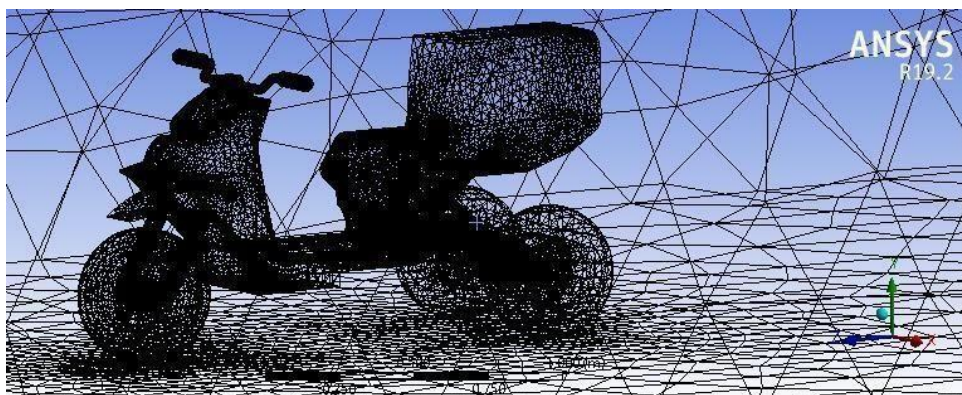


*Nota:* La grafica representa la comparación entre tipo de gráfico y configuración que sucedea través del coeficiente de arrastre vs los números de elementos proporcionados por las tablas en el **ANEXO A**.

Como se puede apreciar en la siguiente imagen, el mallado superficial de la alternativa 3 se presenta en forma de tetraedros, lo cual es apropiado para su geometría compleja. Al analizar la gráfica anterior, podemos identificar los diferentes tipos de análisis llevados a cabo en la alternativa 3, utilizando el tamaño de los elementos asignados como variable (Element size).

**Figura 72**

*Mallado superficial tipo tetraédrico*



## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

*Nota:* La figura se genera a través del programa empleado para su estudio.

### ***1.18.2. Malla con refinamiento***

En un estudio aerodinámico, el refinamiento de la malla ayuda a disminuir el costo computacional asociado con la simulación de áreas menos relevantes, como las regiones distantes de la superficie del automóvil. Este enfoque optimiza el uso de recursos al asignar una resolución más alta únicamente en las áreas críticas donde ocurren los fenómenos aerodinámicos importantes, mientras que se utiliza una resolución más baja en las zonas menos influyentes. Como resultado, se logra una simulación más eficiente sin comprometer la precisión de los resultados aerodinámicos obtenidos.

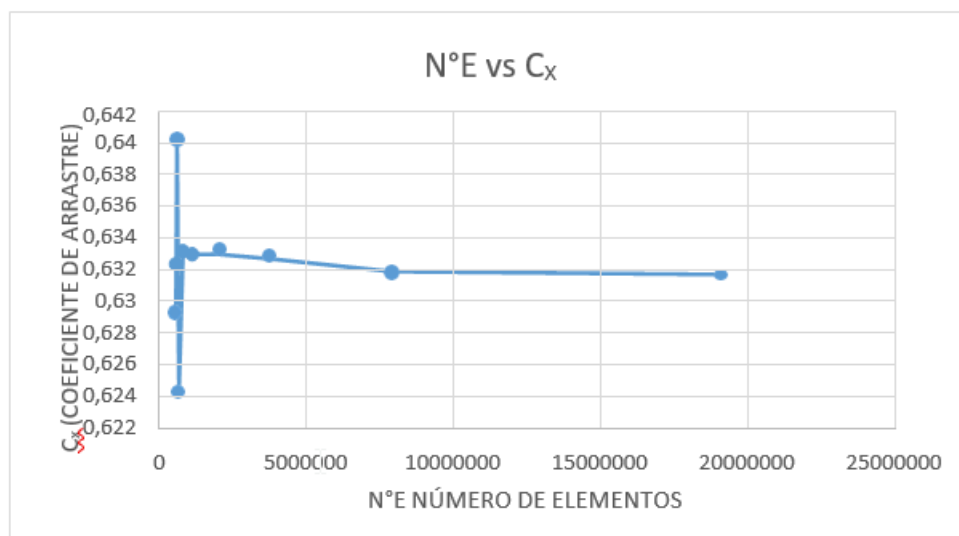
#### **1.18.2.1. Alternativa 1**

Al observar la gráfica y reducir el número de elementos analizados con el refinamiento, se puede apreciar que la variable de interés, en este caso el coeficiente de arrastre (CFX), no experimenta una variación significativa, sino que converge hacia un valor determinado.

#### **Figura 73**

*Gráfica de número de elementos vs coeficiente de arrastre*

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

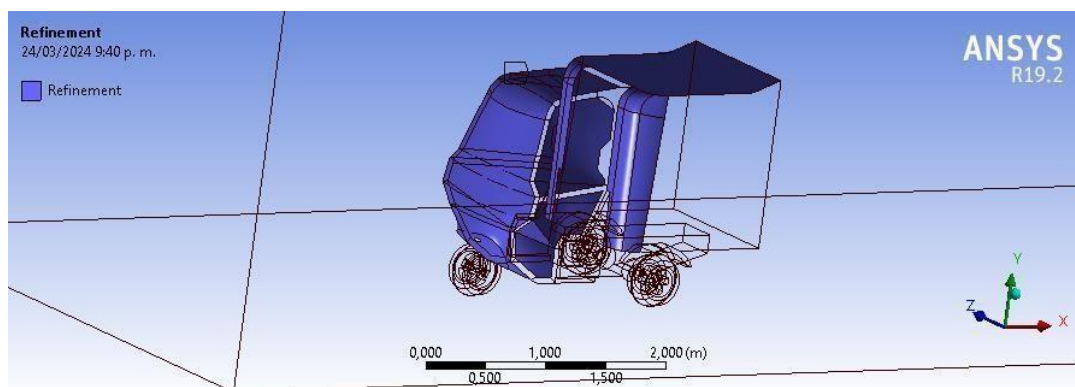


*Nota:* La grafica representa la comparación entre tipo de gráfico y configuración que sucedea través del coeficiente de arrastre vs los números de elementos proporcionados por las tablas en el **ANEXO A**

En la siguiente figura 73 se pueden apreciar las áreas superficiales de mayor relevancia que fueron seleccionadas para el estudio en la alternativa 1, con el objetivo de obtener resultados más precisos y reducir el costo computacional.

### Figura 74

*Áreas superficiales de mayor relevancia*



*Nota:* La figura se genera a través del programa empleado para su estudio

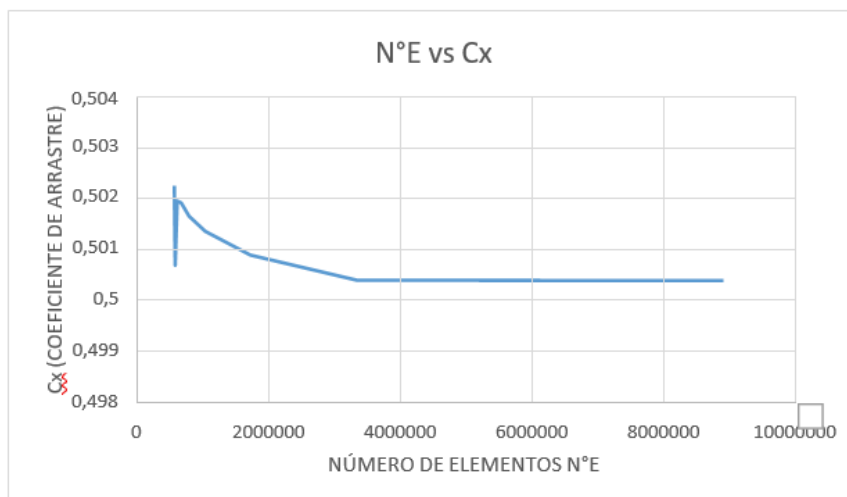
## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

**1.18.2.2. Alternativa 2**

La gráfica muestra cómo el coeficiente de arrastre (eje Y) varía en relación con la variación en el mallado utilizando diferentes elementos de estudio. Se evidencia que al aplicar un refinamiento en las superficies más relevantes, se logra una disminución en el costo computacional. Esta reducción se estabiliza en un valor promedio con un menor número de elementos en comparación con el estudio sin refinamiento.

**Figura 75**

*Gráfica de número de elementos vs coeficiente de arrastre*



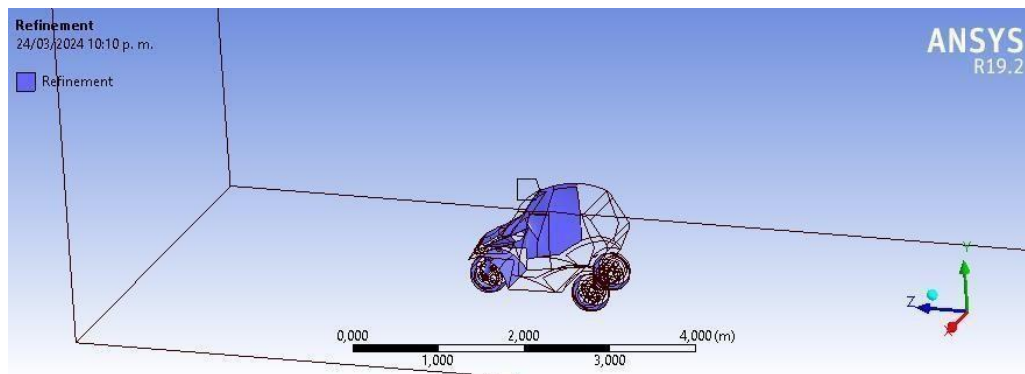
*Nota:* La grafica representa la comparación entre tipo de gráfico y configuración que sucedea través del coeficiente de arrastre vs los números de elementos proporcionados por las tablas en el **ANEXO A**.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

La figura 75 muestra las áreas superficiales más relevantes que se han seleccionado para el estudio en la alternativa 2. El propósito es obtener resultados más precisos y reducir el costo computacional.

### Figura 76

#### *Áreas superficiales de mayor relevancia*



*Nota:* La figura se genera a través del programa empleado para su estudio.

### 1.18.2.3. Alternativa 3

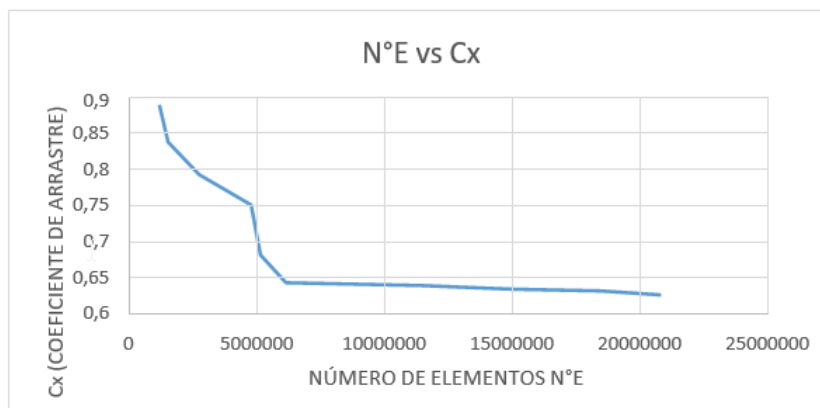
La complejidad geométrica de la alternativa 3 en el estudio indica que logra estabilizarse en un valor promedio del coeficiente de arrastre (eje Y) al aplicar un refinamiento en el malla en las áreas de interés de la superficie de la carrocería. Esto a su vez sugiere que, con un menor número de elementos, se obtiene un valor promedio consistente.

En la imagen se pueden identificar las áreas superficiales más relevantes que han sido seleccionadas para el estudio en la alternativa 2. El objetivo principal es lograr resultados más precisos y reducir el costo computacional.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

**Figura 77**

Gráfica de número de elementos vs coeficiente de arrastre

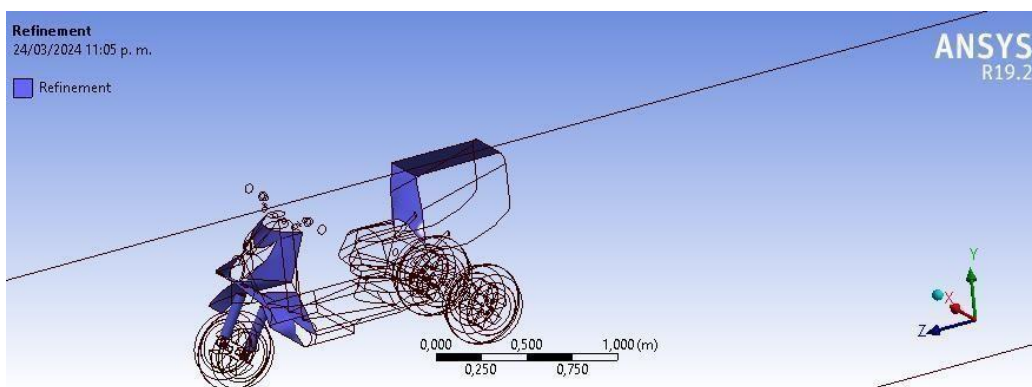


*Nota:* La grafica representa la comparación entre tipo de gráfico y configuración que sucedea través del coeficiente de arrastre vs los números de elementos proporcionados por las tablas en el **ANEXO A**.

En la imagen 78 se pueden identificar las áreas superficiales más relevantes que han sido seleccionadas para el estudio en la alternativa 2. El objetivo principal es lograr resultados más precisos y reducir el costo computacional.

**Figura 78**

Áreas superficiales de mayor relevancia



## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

*Nota:* La figura se genera a través del programa empleado para su estudio.

### 1.19. Evaluación de alternativas

Las variables más relevantes que fueron determinadas con el modelado aerodinámico de cada alternativa usando ANSYS, se pueden comparar en la siguiente tabla.

**Tabla 11**

*Resultados del modelado aerodinámico con una velocidad constante de 90 km/h*

		<b>F<sub>x</sub>[N]</b>	<b>C<sub>x</sub></b>	<b>Potencia [HP]</b>
<b>Sin refinamiento</b>	Alternativa 1	547.722	0.6638	19,81
	Alternativa 2	251,557	0,6054	8,67
	Alternativa 3	182,146	0,7691	6,082
<b>Con refinamiento</b>	Alternativa 1	547,2810	0,6321	18,86
	Alternativa 2	207,353	0.5009	7,174
	Alternativa 3	166,917	0.7048	5,573

*Nota:* La tabla plasma los resultados del modelo aerodinámico con una velocidad constante de 90 Km/h.

El proceso de evaluación de las alternativas se lleva a cabo a partir de una tabla comparativa de los parámetros técnicos considerados en la matriz de selección QFD (ANEXOB). Asignado el porcentaje de prioridad el cumplimiento por parte de las alternativas de cada uno de ellos se puede medir en la siguiente tabla donde se realiza una medición, en lo que 1, es el

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

resultado más bajo, es decir, el menos compatible. hasta 5 donde es la variable que suple con los requerimientos de la población proporcionadas.

**Tabla 12**

*Evaluación de las alternativas de acuerdo a la prioridad de los parámetros técnicos*

EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS								
			Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
PARÁMETROS TÉCNICOS	PRIORIDAD	RELEVANCIA	VALOR	RELEVANCIA	VALOR	RELEVANCIA	VALOR	
<b>Innovación</b>	17%	3,50	0,59	4,50	0,76	4,00	0,68	
<b>Diseño esterilizado</b>	24%	4,00	0,95	4,50	1,07	3,50	0,83	
<b>Confort</b>	14%	4,00	0,55	4,00	0,55	3,00	0,42	
<b>Resistencia aerodinámica</b>	30%	3,7	1,11	5	1,5	3,3	0,99	
<b>Capacidad visual desde el habitáculo</b>	15%	4,00	0,62	4,00	0,62	4,50	0,69	
<b>Puntuación de alternativas</b>		3,83		4,50		3,61		

*Nota:* La tabla demuestra la evaluación de las alternativas conforme a la prioridad de los parámetros técnicos.

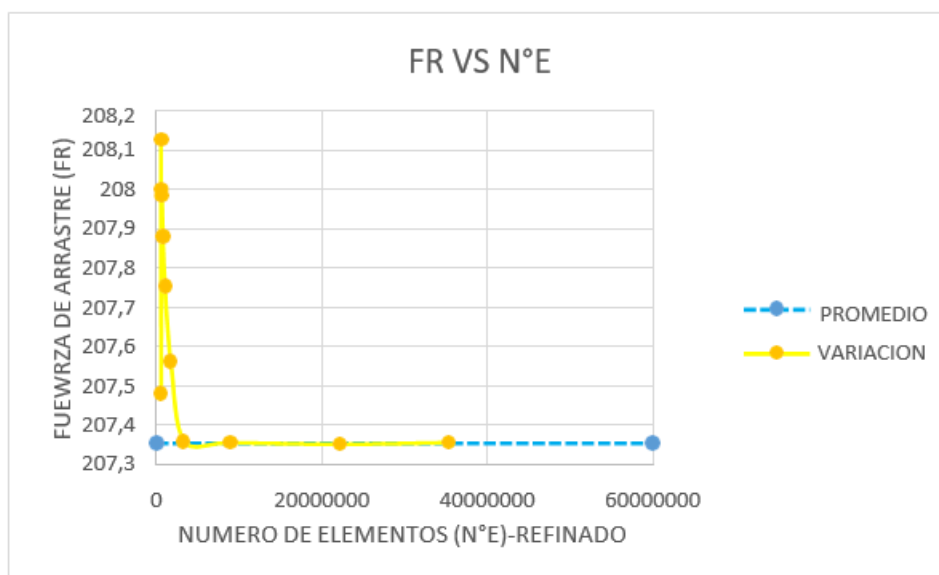
## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

### 1.20. Análisis de la alternativa ganadora

La alternativa 2 se presenta como la opción más viable desde un análisis aerodinámico exhaustivo entre las alternativas desarrolladas en este proyecto. Ahora, vamos a mostrar las especificaciones técnicas consideradas a través de una representación visual de las mismas.

#### Figura 79

*Variación de la fuerza de arrastre en función de los elementos de refinamiento del mallado*



*Nota:* La figura representa la variación de la fuerza de arrastre en función del refinamiento del mallado.

#### 1.20.1. Características de la superficie, capa, límite y contornos de presión

Cuando las partículas de aire impactan en el vehículo, originan zonas de estancamiento con distintos niveles de presión, considerando que la presión de referencia es de 1 atmósfera en la superficie del vehículo. Estas áreas pueden observarse en la representación de contorno de presión, donde se emplean diversos colores para indicar su magnitud, y también se puede

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

apreciar la separación entre estas secciones. Se ha integrado una sección específica en la carrocería, inspirada en el pico de las aves, con el objetivo de reducir la turbulencia en la parte trasera del vehículo.

### Figura 80

*Contorno de presión sobre la carrocería*



*Nota:* La figura demuestra los contornos de presión que inciden sobre la carrocería.

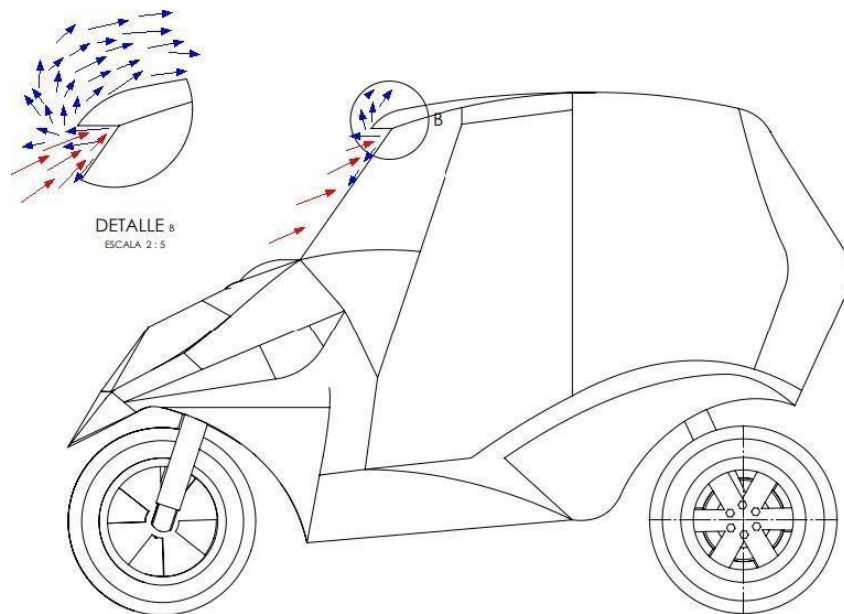
### 1.20.2. Gradientes de velocidad sobre la superficie de la carrocería

Las partículas de aire chocan contra la superficie en la sección incorporada generando turbulencia inducida, con la finalidad de disminuir la nube de turbulencia en la parte trasera del vehículo.

### Figura 81

*Gradientes de velocidad sobre la sección específica y análisis visual a su comportamiento*

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA



*Nota:* La figura ilustra los gradientes de velocidad, que muestran cómo las partículas de viento impactan sobre la carrocería.

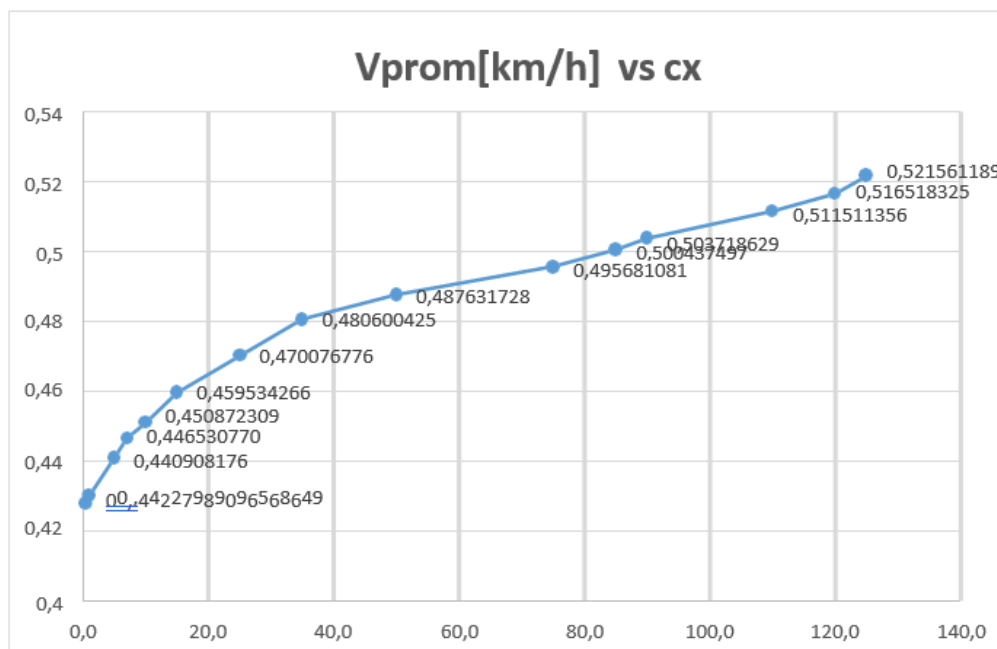
### ***1.20.3. Variación del coeficiente de arrastre como una función de la velocidad***

Un inconveniente de gran relevancia es el aumento del consumo energético al incrementar la velocidad, lo cual es un aspecto de especial interés en este estudio debido a la importancia de reducir esta variable.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

**Figura 82**

*Variación del coeficiente de arrastre como función de la velocidad*



*Nota:* La figura muestra cómo la velocidad afecta el consumo energético, evidenciando que a medida que la velocidad aumenta, también lo hace el coeficiente de arrastre, el cual guarda una relación directa con la potencia consumida.

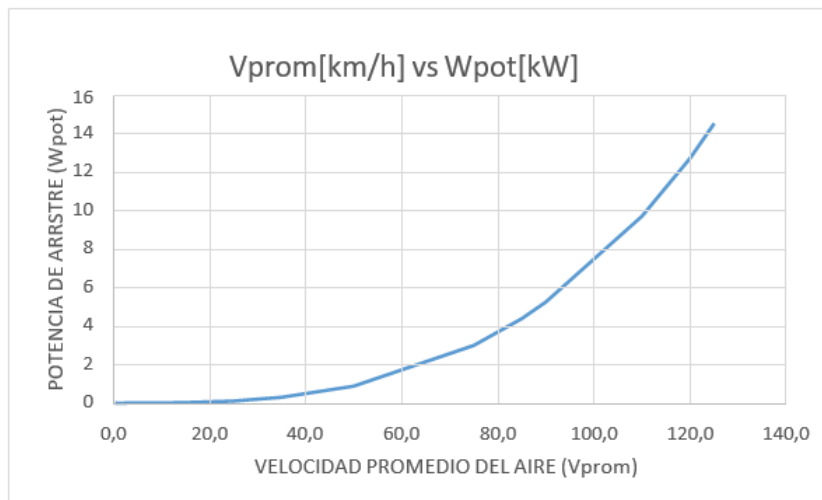
#### ***1.20.4. Variación de la potencia de arrastre como una función de la velocidad***

Se puede visualizar como cambia la potencia necesaria para vencer la resistencia por el arrastre de aire.

**Figura 83**

*Variación de la potencia necesaria para vencer la resistencia al arrastre*

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA



### CONCLUSIONES

Se alcanza a determinar la alternativa aerodinámicamente más recomendable a implementar en el vehículo eléctrico utilitario correspondiente a la alternativa dos: vehículo eléctrico cerrado de tres ruedas siendo de 0.50 encontrándose en el rango de vehículos utilitarios de  $C_x$  en el mercado actual. Asimismo, se consiguieron los valores de los coeficientes de arrastre en cada caso, con la finalidad de encontrar cuantitativamente la elección que tendrá menor gasto de combustible.

Con respecto a la geometría en la alternativa 3: Triciclo eléctrico de carga aumenta su consumo energético por las irregularidades del sistema, debido que al ejecutar la simulación no se comprendió el área en el cual implica que el conductor este presente conduciendo.

Para la segunda alternativa, se propuso implementar un apéndice con el objetivo de reducir la nube de flujo turbulento en la parte trasera del vehículo. Sin embargo, esto a su vez

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

provoca una nube de flujo turbulento prematura en el techo del vehículo, lo que aumenta la resistencia aerodinámica debido al choque de moléculas de aire.

La malla sin refinamiento ofrece una representación integral del dominio y la interfaz sólido-fluido mediante el uso de elementos de tamaño uniforme, asegurando una homogeneidad en todo el dominio. Esta característica facilita una visualización detallada y clara de todas las partes del sistema, lo que simplifica el análisis y la comprensión de la interacción dinámica entre los componentes sólidos y fluidos. Además, al presentarse en forma de tetraedros, es especialmente adecuada para geometrías complejas, lo que mejora la precisión de la simulación en tales contextos.

El refinado en las superficies de interés de la carrocería es una técnica utilizada en diseño computacional para reducir el gasto computacional al enfocarse en áreas específicas que son críticas para el rendimiento o la apariencia del producto final.

Después de determinar que la alternativa más eficiente es la número dos, se concluye que a una velocidad promedio máxima establecida para estos vehículos de 90 km/h, su consumo energético, considerando únicamente la relación entre la geometría y el viento, es de 5.21 kW.

Con el uso excesivo de combustibles contaminantes, se precisa la forma de minimizar el consumo energético, un vehículo utilitario de carga requiere arrastrar un mayor volumen de aire, con una adecuada geometría aerodinámica se disminuye notablemente este consumo.

Se alcanza a determinar la alternativa aerodinámicamente más recomendable a implementar en el vehículo eléctrico utilitario correspondiente a la alternativa dos: vehículo eléctrico cerrado de tres ruedas siendo de 0.50 encontrándose en el rango de vehículos utilitarios

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

de  $C_x$  en el mercado actual. Asimismo, se consiguieron los valores de los coeficientes de arrastre en cada caso, con la finalidad de encontrar cuantitativamente la elección

que tendrá menor gasto de combustible.

El análisis aerodinámico de las diferentes alternativas verifica que el área es un parámetro fundamental en este cómputo siendo inversamente proporcional al coeficiente de arrastre.

El análisis aerodinámico realizado a las diferentes alternativas propuestas para un vehículo eléctrico utilitario de tres ruedas monoplaza determino que la geometría y el diseño esterilizado son factores sustanciales en la relación costo – potencia.

Con respecto a la geometría en la alternativa 3: Triciclo eléctrico de carga aumenta su consumo energético por las irregularidades del sistema, debido que al ejecutar la simulación no se comprendió el área en el cual implica que el conductor este presente conduciendo.

Un factor importante en la reducción de consumo energético es la velocidad a mayor velocidad mayor es el consumo energético.

La malla sin refinamiento ofrece una representación integral del dominio y la interfaz sólido-fluido mediante el uso de elementos de tamaño uniforme, asegurando una homogeneidad en todo el dominio. Esta característica facilita una visualización detallada y clara de todas las partes del sistema, lo que simplifica el análisis y la comprensión de la interacción dinámica entre los componentes sólidos y fluidos. Además, al presentarse en forma de tetraedros, es especialmente adecuada para geometrías complejas, lo que mejora la precisión de la simulación en tales contextos.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

El refinado en las superficies de interés de la carrocería es una técnica utilizada en diseño computacional para reducir el gasto computacional al enfocarse en áreas específicas que son críticas para el rendimiento o la apariencia del producto final.

### **RECOMENDACIONES**

La resistencia de un vehículo al movimiento se ve afectada por la geometría externa de su carrocería y los factores específicos de los componentes externos que la componen, lo que ayuda a reducir o aumentar el efecto final al avance del vehículo. Además, la tendencia en el diseño aerodinámico de automóviles se vuelve cada vez más exigente debido a las regulaciones sobre consumo de energía, requisitos de seguridad, control ambiental y otros aspectos relacionados. Esto se traduce en la necesidad de producir prototipos de diseño que se basen en la complejidad geométrica y en la disponibilidad de equipos para su producción.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Alba, R. Guangasi. D (2018) Análisis aerodinámico de un prototipo de un auto eléctrico biplaza UTA cimi17 [Pppoyecto técnico previo a la obtención del título de ingeniero mecánico] Universidad Técnica de Ambato.

Aparicio Izquierdo, F. Vera, C. y Díaz López, V. (2001). Teoría de los vehículos automóviles. 2ª Ed. Madrid: Dextra.

(2020). Diseño de un prototipo de inyector hidráulico para una picoturbina tipo pelton para el laboratorio de hidráulica de la Universidad Libre.

<https://hdl.handle.net/10901/19357>.

Artés, D. (2011). Enemigos de la eficiencia: La resistencia aerodinámica. Ingeniería de Automóvil. TECMOVIA.

<https://www.diariomotor.com/tecmovia/2011/11/27/enemigos-de-la-eficiencia-la-resistencia-aerodinamica/>

Badillo J., Latorre L., Orejarena C., Pinzón E. (2018). Conocimientos de una comunidad de Bucaramanga sobre la contaminación ambiental y sus efectos en la salud de los niños de 5 a 12 años. [Tesis de grado] Universidad Cooperativa de Colombia.

Bayona, C., Londoño, L. y Nieto, E. (2015). Identificación del modelo de turbulencias más adecuados, utilizando Software de dinámica de fluidos computacional, para el diseño de un vehículo urbano de la competencia SHELL ECO MARATHON. [Tesis de grado] Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

Bhaskar, C., Rawat, K., Minhaj, M., Kumar, M.S. y D, N. (2021). Estudio aerodinámico de una carrocería de tres ruedas. Apuntes de conferencias sobre ingeniería mecánica: 225–230. doi: 10.1007/978-981-15-5947-1\_18

BuildYourOwnRaceCar (2020). Car Aerodynamics Basics and How-to Design Tips.

BuildYourOwnRaceCar. <https://www.buildyourownracecar.com/race-car-aerodynamics-basics-and-design/4/>

Cimbala, J., y Çengel, Y. (2004). Mecánica de Fluidos: Fundamentos y aplicaciones.

New York, Estados Unidos: Mc Graw Hill.

Código Nacional de Tránsito (2002). Ley 769 de 2022. Diario Oficial N° 44.932.

[https://www.oas.org/juridico/spanish/mesicic2\\_col\\_ley\\_769\\_2002.pdf](https://www.oas.org/juridico/spanish/mesicic2_col_ley_769_2002.pdf)

Connor (2019). ¿Qué es la ecuación de Navier-Stokes? Definición. Thermal Engineering.

<https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-ecuacion-de-navier-stokes-definicion/>

Connor, N. (2019). ¿Qué es el diámetro hidráulico? Thermal Engineering.

<https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-diametro-hidraulico-definicion/>

Connor, N. (2020). ¿Qué es el número de Reynolds? Thermal Engineering.

<https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-numero-de-reynolds-definicion/>

Domínguez & Cruz (2022). Principio de Bernoulli. Ingenio y Conciencia Boletín

Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún. Publicación semestral, Vol. 9, No. 18 (2022) 58-65

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

- F. Moukalled, M. Darwish, L. Mangani. (2015). The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics (693-744). New York, Estados Unidos: Springer.
- Fernández (2020). ¿Qué es el número de Reynolds? Aerodinámica F1. Recuperado de <https://www.aerodinamicaf1.com/2020/10/que-es-el-numero-de-reynolds/>
- Fernández, M. (2019). Las fuerzas sobre el monoplaça, drag y lift (o downforce). AerodinámicaF1. Recuperado de <https://www.aerodinamicaf1.com/2019/09/las-fuerzas-sobre-el-monoplaça-drag-y-lift-o-downforce/>
- Fraija, B. I. (2006). Estudio de la aerodinámica en los vehículos. PROSPECTIVA, 4(2), 66-70.
- Gamboa, A. (2016). Implementación de un paquete aerodinámico en un vehículo de fórmula SAE por medio de herramientas computacionales [Tesis de grado] Universidad de los Andes.
- Góngora, G., & Guzmán, J. (2016). Diseño de un paquete aerodinámico para un vehículo de carreras MRT1 [Tesis de grado] Fundación Universidad de América. Recuperado de <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/585/1/4092192-2016-2-IM.pdf>
- Gonzales, J., & Picón, J. (2013). Diseño y análisis de chasis, carenado y parachoques del monoplaça FSO2-*e* formula SENA ECO 2012-2013 con análisis estático, dinámico, armónico, aerodinámico e impacto. [Tesis de grado] Universidad Industrial de Santander. (15-19).

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

IQR (2021). Comparación de flujo laminar y flujo turbulento. IQR.

<https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2021/02/flujo-turbulento-en-ingenieria-quimica.html>

Katz, J. (2006). Race Car Aerodynamics: Designing for Speed, 2nd Edition. Crewe, Inglaterra: Bentley.

Katz, J. (2006). Race Car Aerodynamics: Designing for Speed. Cambridge, Massachusetts, USA: Bentley Publishers.

Loctite, T. (2020). Tipos de carrocerías y sus principales características. Blog de reparación de vehículos. <https://blog.reparacion-vehiculos.es/tipos-de-carrocerias-principales-caracteristicas>

López (2017). Estudio y simulación del conducto de ventilación y de la temperatura del interior de un autobús mediante OpenFOAM. [Tesis de grado] Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (UPM).  
[https://oa.upm.es/49271/1/TFG\\_SERGIO\\_LOPEZ\\_SANCHEZ.pdf](https://oa.upm.es/49271/1/TFG_SERGIO_LOPEZ_SANCHEZ.pdf)

Lopez (2021). Estudio de la cavitación en una turbina en modo Bomba. [Tesis de grado] Universitat Politècnica de Catalunya.

Lucas, J. (2014). ¿Qué es la aerodinámica? Livescience.

<https://www.livescience.com/47930-what-is-aerodynamics.html>

Mendoza, L., & Vera, F. (2019). Estudio de diferentes modelos de turbulencia para obtener las curvas características de un perfil NACA 2415 mediante la simulación tridimensional de flujos de fluidos. Revista Bistua Facultad de Ciencias Básicas, 17(3), 43-51.

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

Muñoz, A. Pérez, K (2002) Diseño y simulación de una carrocería aerodinámica para un vehículo eléctrico tipo coupé [Trabajo de grado para optar a título de Ingeniero Mecánico] Universidad Industrial de Santander.

<https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/ef293e95-4473-4d3d-b494-212f71c992b7/content>

Ministerio de Transporte (2008). Ley 1239 de 2008. Artículo 10. Congreso de la República.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=31604>

Mott, R. (2006). Mecánica de Fluidos (6ta edición). Editorial Pearson Educación.

Muñoz, I., & Ardila, S. (2020). Monografía de Automóviles [Trabajo de Investigación formativa] Universidad Tecnológica de Pereira. (15-35)

Pauta, A., & Sanchez, S. (2014). Diseño y construcción de la carrocería de un vehículo de competencia tipo Formula SAE. [Tesis de grado] Universidad Politécnica Salesiana.

Puerto, E. (2011). Presión atmosférica. Efrain Puerto.

<https://efrainpuerto.com/2011/02/26/f1-2/>

Ramírez, J., & Aguas, J. (2017). Configuración territorial de las provincias de Colombia: ruralidad y redes. Revista CEPAL, 37 (1), 13-20.

[https://www.cepal.org/sites/default/files/news/files/configuracion\\_territorial\\_de\\_las\\_provincias\\_de\\_colombia.pdf](https://www.cepal.org/sites/default/files/news/files/configuracion_territorial_de_las_provincias_de_colombia.pdf)

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

Richmond, G. (2015). Modelos de Turbulencia Introductorio. Tec.ar.cr.

[https://www.tec.ac.cr/sites/default/files/media/doc/modelos\\_de\\_turbulencia\\_introductorio.pdf](https://www.tec.ac.cr/sites/default/files/media/doc/modelos_de_turbulencia_introductorio.pdf)

Rosero, P. (2009). Desarrollo de un reglamento técnico referente a elementos de seguridad para vehículos de categoría M1. [Tesis de grado] Escuela Politécnica del Ejército.

Sharad, C., & Pachuote, P. (2019). Turbulent Flow: Physics and Methods of

Investigations. CFD Flow Engineering. Recuperado de

<https://cfdflowengineering.com/turbulent-flow-physics-and-methods-of-investigations/>

Technical Courses. (2015). Estudio de la aerodinámica de un vehículo. TechnicalCourses.

[http://www.technicalcourses.net/portal/es/blog/blog\\_entrada.php?entrada\\_id=89](http://www.technicalcourses.net/portal/es/blog/blog_entrada.php?entrada_id=89)

Thomas Christian Schuetz. (2015). Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering, Fifth Edition. SAE International.

Toapanta, C., et al. (2019). Estudio numérico y comparativo del efecto de turbulencia en

codos y dobleces para distribución de agua sanitaria. Revista Facultad de

Ingeniería, 28(53). <https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n53.2019.10108>

Universidad Nacional de Colombia (2015). Los motores de combustión interna.

Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

[https://www.imec.unal.edu.co/ingmecanica/ed\\_2015/Mot\\_cin/motores.pdf](https://www.imec.unal.edu.co/ingmecanica/ed_2015/Mot_cin/motores.pdf)

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

## ANEXOS

## Apéndice A – Datos de malla

Tabla 13

*Datos para la gráfica del mallado sin refinamiento*

			Tamaño de elementos[m]	Nodos	Elementos	Fuerza de arrastre[N]	Coefficiente de arrastre Cx
<b>CONSTANTES</b>		1	0,60	56561	297730	605,498	0,699350889
<b>Vprom[km/h]</b>	90	2	0,5	59067	310814	598,314	0,691053361
<b>Area transversal [m<sup>2</sup>]</b>	2,34	3	0,3571	64410	338230	604,789	0,698531994
<b>Densidad atm [kg/ m<sup>3</sup>]</b>	1,184	4	0,2551	76222	399653	605,748	0,69963964
		5	0,1822	102092	536981	601,741	0,69501155
		6	0,1302	162726	863249	591,748	0,683469623
		7	0,0930	304305	1641925	585,478	0,676227766
		8	0,0664	625137	3423570	578,978	0,668720259
		9	0,0474	1421878	7915878	567,782	0,655788866
		10	0,0339	3389661	19112465	548,879	0,633955879

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

11	0,0242	4803550	27157423	547,236	0,632058212
12	0,0173	5809310	32880147	545,236	0,62974821
13	0,0123	6538110	37026983	546,149	0,630802726
14	0,0088	7048280	39929824	546,788	0,631540902
15	0,0063	7412680	42003242	546,478	0,631182721

*Datos de malla sin refinamiento para alternativa 2***Tabla 14***Datos para la gráfica del mallado sin refinamiento*

			Tamaño de elementos [m]	Nodos	Elementos	Fuerza de arrastre[N]	Coefficiente de arrastre C <sub>x</sub>
<b>CONSTANTES</b>		1	0,58	109083	585954	315,478	0,759254892
<b>V<sub>prom</sub>[km/h]</b>	90	2	0,5	116957	627110	285,084	0,686106231
<b>Area transversal [m<sup>2</sup>]</b>	1,123	3	0,3571	135233	725179	275,846	0,663873312
<b>Densidad atm [kg/ m<sup>3</sup>]</b>	1,184	4	0,2551	161983	867870	295,755	0,7111787923
		5	0,1822	200028	1072628	283,458	0,682192968

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

6	0,1302	270740	1452471	271,459	0,653315203
7	0,0930	392587	2112689	257,456	0,61961445
8	0,0664	671627	3649661	245,759	0,591463503
9	0,0474	1344475	7420354	238,745	0,574583043
10	0,0339	2082901	11590863	220,819	0,531444088
11	0,0242	2610348	14569798	218,102	0,524901928
12	0,0173	2987095	16697608	216,894	0,521994657
13	0,0123	3964437	22217473	220,459	0,530574475
14	0,0088	5219009	29303091	212,789	0,512115232
15	0,0063	7126898	40078532	215,254	0,5180477

*Datos de malla sin refinamiento alternativa 3***Tabla 15***Datos para la gráfica del mallado sin refinamiento*

		Tamaño de elementos [m]	Nodos	Elementos	Fuerza de arrastre[N]	Coefficiente de arrastre Cx
<b>CONSTANTES</b>	1	0,58	166401	901558	210,359	0,888340372
<b>Vprom[km/h]</b>	90	0,5	190305	1030532	198,428	0,837956081

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

<b>Area transversal</b> [m <sup>2</sup> ]	0,62	3	0,3571	222596	1204738	189,215	0,799049831
<b>Densidad atm</b> [kg/ m <sup>3</sup> ]	1,184	4	0,2551	258118	1394858	188,478	0,7959375
		5	0,1822	200028	1072628	300616	1623847
		6	0,1302	270740	1452471	371386	2004845
		7	0,0930	392587	2112689	495575	2676944
		8	0,0664	671627	3649661	575575	3247316
		9	0,0474	1344475	7420354	929354	4129710
		10	0,0339	2082901	11590863	119485	7245731
		11	0,0242	2610348	14569798	189485	13748244
		12	0,0173	2987095	16697608	214975	19478532
		13	0,0123	3964437	22217473	2314784	35999967
		14	0,0088	5219009	29303091	2543419	47723929
		15	0,0063	7126898	40078532	2847346	60841179

*Datos de malla con refinamiento para alternativa 1*

**Tabla 16**

*Datos para la gráfica del mallado con refinamiento*

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

		Tamaño de elementos [ ]	Nodos	Elementos	Fuerza de arrastre[N]	Coefficiente de arrastre Cx
<b>CONSTANTES</b>		1	109083	574217	544,789	0,629231924
<b>Vprom[km/h]</b>	90	2	111824	588515	547,459	0,632315777
<b>Area transversal [m<sup>2</sup>]</b>	2,34	3	117410	617270	554,267	0,640179025
<b>Densidad atmoferica [kg/ m<sup>3</sup>]</b>	1,184	4	129607	680707	540,418	0,624183414
		5	155540	818501	548,159	0,633124278
		6	216176	1144677	547,987	0,632925618
		7	359405	1931602	548,0159	0,632958997
		8	5243823	3750793	547,759	0,632662278
		9	1421878	7915878	547,059	0,631853777
		10	3389661	19112465	546,898	0,631667822

*Datos de malla con refinamiento para alternativa 2***Tabla 17***Datos para la gráfica del mallado con refinamiento*

		Tamaño de elementos [m]	Nodos	Elementos	Fuerza de arrastre[N]	Coefficiente de arrastre Cx
<b>CONSTANTES</b>		1	111824	574217	208,125	0,502232143
<b>Vprom[km/h]</b>	90	2	117410	588515	207,4789	0,500673021
<b>Area transversal [m<sup>2</sup>]</b>	1,12	3	129607	617270	208,00156	0,501934266
<b>Densidad atm [kg/ m<sup>3</sup>]</b>	1,184	4	155540	680707	207,985	0,501894305

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

	5	0,525	216176	798501	207,879	0,501638514
	6	0,515	359405	1044677	207,755	0,501339286
	7	0,5000	5243823	1731602	207,562	0,500873552
	8	0,3571	1421878	3350793	207,358	0,500381274
	9	0,2551	3389661	8915878	207,355	0,500374035
	10	0,1822	4526758	22112465	207,351	0,500364382

*Datos de malla con refinamiento para alternativa 3***Tabla 18***Datos para la gráfica del mallado con refinamiento*

		Tamaño de elementos [m]	Nodos	Elementos	Fuerza de arrastre[N]	Coefficiente de arrastre C <sub>x</sub>
<b>CONSTANTES</b>		1 0,6	19478532	1194858	210,359	0,888340372
<b>V<sub>prom</sub>[km/h]</b>	90	2 0,5	2171584	1539296	198,159	0,836820101
<b>Area transversal [m<sup>2</sup>]</b>	0,64	3 0,3571	3485126	2748244	187,569	0,792098818
<b>Densidad atmoferica [kg/ m<sup>3</sup>]</b>	1,184	4 0,2551	3874975	4785324	177,598	0,749991554

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

---

5	0,1822	4159365	5159743	161,248	0,680945946
6	0,1302	4259841	6159748	152,148	0,642516892
7	0,093	5148794	11478974	151,245	0,638703547
8	0,0664	7849489	14789457	150,125	0,633973818
9	0,0474	9148953	15478925	149,998	0,6334375

---

ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

**Apéndice B – Matriz de calidad QFD**

La matriz de calidad implica el desarrollo de productos y servicios que capturan la voz del cliente y la transforman en un diseño desempeño que satisfacen las necesidades y expectativas del mercado

**Tabla 19**

*Matriz de Calidad QFD*

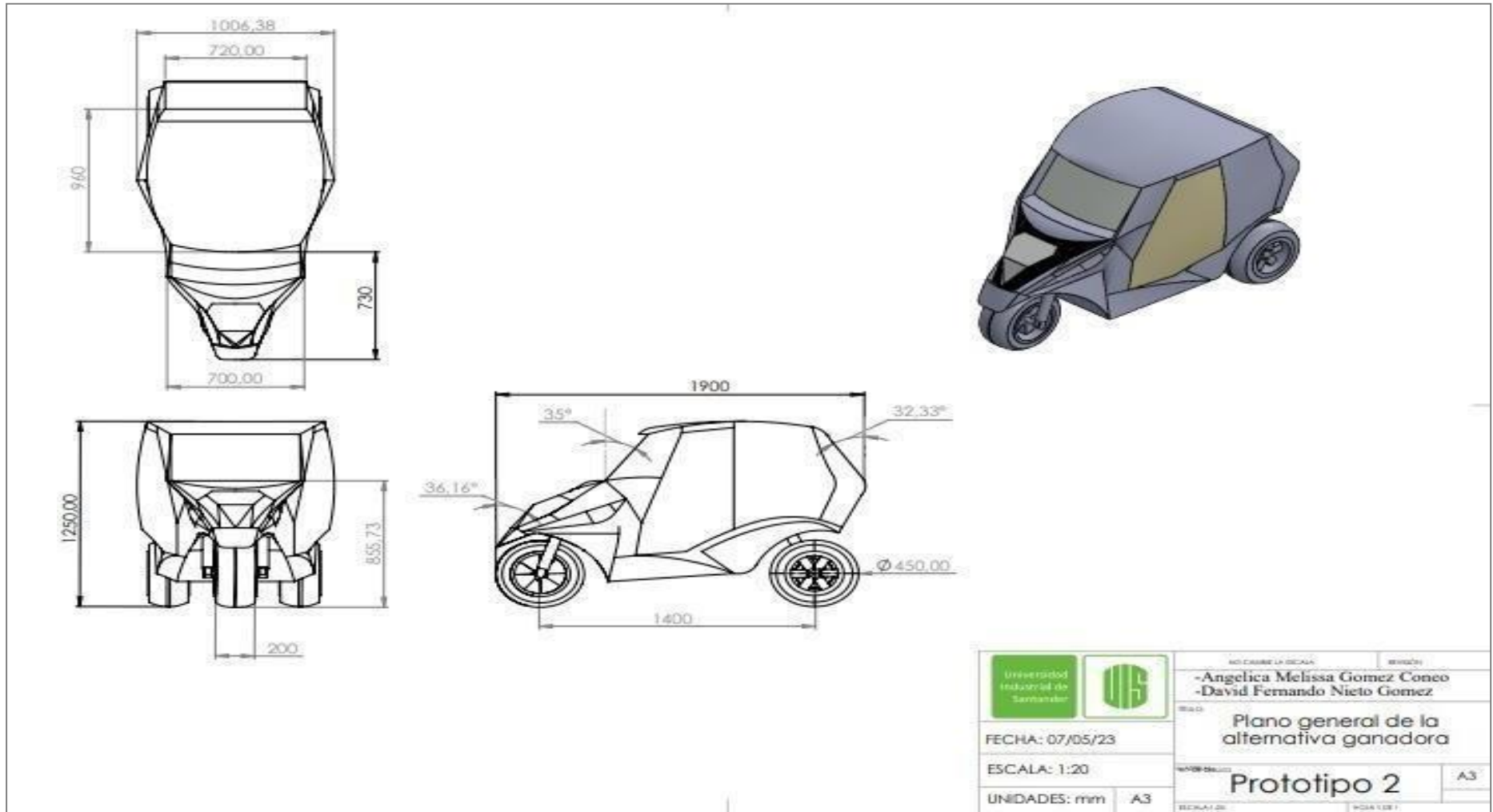
<b>Estimación</b> 9 Alto 3 Moderado 1 Bajo 0 Nulo	PRIORIDAD CONSUMIDOR	% PRIORIDAD	INOVACION		DISEÑO ESTERELIZADO		CONFORT		RESISTENCIA AERODINAMICA		CAPACIDAD VISUAL EN EL HABITACULO	
			VAL	PROD	VAL	PROD	VAL	PROD	VAL	PROD	VAL	PROD
<b>Requerimientos del consumidor</b>												
Velocidad	1	4,8	0	0	3	14	0	0	9	43	0	0
Seguridad automotriz	2	9,5	3	29	9	86	9	86	0	0	9	86
Consumo energético	5	23,8	3	71	9	214	1	24	9	214	3	71

## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

Estetica vehicular	3	14,3	9	129	9	129	3	43	3	43	9	129
Volumen de carga	6	28,6	1	29	0	0	3	86	9	257	0	0
Mantenimiento	4	19,0	3	57	0	0	1	19	0	0	0	0
		Suma		314,3		442,9		257,1		557,1		285,7
Suma de puntaje prioridad	21	Porcentaje		16,9		23,8		13,8		30,0		15,4
Puntaje total	1857	Lugar		3		2		4		1		5

ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA

Apéndice C – Plano general de la alternativa de la carrocería seleccionada (Alternativa 2)



## ESTUDIO AERODINÁMICO DE TRES ALTERNATIVAS DE CARROCERÍA