



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**“Diseño aerodinámico y prototipado del vehículo
Interprovincial ALFA-700 para Metálicas Pillapa”**

**Villacrés Toalombo, Henry Israel;
Sumi Guamán, Cristian Marcelo**

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO AUTOMOTRIZ

**RIOBAMBA – ECUADOR
2017**

APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

2016-05-05

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

HENRRY ISRAEL VILLACRÉS TOALOMBO

Titulada:

**“DISEÑO AERODINÁMICO Y PROTOTIPADO DEL VEHÍCULO
INTERPROVINCIAL ALFA-700 PARA METÁLICAS PILLAPA”**

Sea aceptado como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO AUTOMOTRIZ

Ing. Carlos José Santillán Mariño
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Edwin Rodolfo Pozo Safla
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Luis Santiago Choto Chariguamán
ASESOR DE TESIS

APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

2016-05-05

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

CRISTIAN MARCELO SUMI GUAMÁN

Titulada:

**“DISEÑO AERODINÁMICO Y PROTOTIPADO DEL VEHÍCULO
INTERPROVINCIAL ALFA-700 PARA METÁLICAS PILLAPA”**

Sea aceptado como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO AUTOMOTRIZ

Ing. Carlos José Santillán Mariño
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Edwin Rodolfo Pozo Safla
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Luis Santiago Choto Chariguamán
ASESOR DE TESIS

ESPOCH

Facultad de Mecánica

EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: HENRRY ISRAEL VILLACRÉS TOALOMBO

TRABAJO DE TITULACIÓN: “DISEÑO AERODINÁMICO Y PROTOTIPADO DEL VEHÍCULO INTERPROVINCIAL ALFA-700 PARA METÁLICAS PILLAPA”

Fecha de Examinación: 2017-02-15

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. José Francisco Pérez Fiallos PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Edwin Rodolfo Pozo Safla DIRECTOR DE TESIS			
Ing. Luis Santiago Choto Chariguamán ASESOR DE TESIS			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. José Francisco Pérez Fiallos
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: CRISTIAN MARCELO SUMI GUAMÁN

TRABAJO DE TITULACIÓN: “DISEÑO AERODINÁMICO Y PROTOTIPADO DEL VEHÍCULO INTERPROVINCIAL ALFA-700 PARA METÁLICAS PILLAPA”

Fecha de Examinación: 2017-02-15

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. José Francisco Pérez Fiallos PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Edwin Rodolfo Pozo Safla DIRECTOR DE TESIS			
Ing. Luis Santiago Choto Chariguamán ASESOR DE TESIS			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. José Francisco Pérez Fiallos
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

DERECHOS DE AUTORÍA

El trabajo de grado que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teórico-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Henry Israel Villacrés Toalombo

C.I:180460217-3

Cristian Marcelo Sumi Guamán

C.I: 020205286-6

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de titulación a Dios, a mis padres: el Sr. Víctor Villacrés y la Sra. Rosita Toalombo, los cuales con paciencia y cariño han fomentado en mí, grandes valores.

A mi esposa Graciela Villacrés, a mi hija mi princesa Lucía las cuales han estado incondicionalmente a mi lado, han sido mi inspiración y apoyo para cumplir este objetivo.

A mis hermanos Jessica, Fabricio que también han formado parte importante durante mi carrera, a todos mis familiares, mis abuelitos: Jacinto Toalombo, Lorenza Chimborazo, a mis primos: Orlando Iza, Rene Bravo, Darío Iza, etc. a mis tíos, tías y demás familiares que de una u otra manera formaron parte de este trayecto.

Henry Israel Villacrés Toalombo

Dedico este proyecto de titulación en primer lugar a Dios, por darme su mano y sabiduría para alcanzar mis objetivos, a mi padre: Carlos Sumi, quien supo sembrar en mí la semilla de la responsabilidad y dedicación y quien con gran esmero y sacrificio hizo todo posible para que siempre tenga lo necesario para seguir adelante, a mi amada madre que desde el cielo me guía y cuida de cada paso que doy, a mis hermanas: Maribel, Vanesa, Johana que han influido en este proceso de formación académica dándome ánimos y empujándome cada vez que decaía, a mis amigos y demás personas que me brindaron su amistad durante este tiempo de formación haciendo de mi estadía en la Politécnica muy placentera y satisfactoria.

Cristian Marcelo Sumi Guamán

AGRADECIMIENTO

Mi más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En especial a la Carrera de Ingeniería Automotriz por darme la oportunidad de obtener la profesión que me gusta, y formarme como una persona ética.

Un infinito agradecimiento a mis padres Víctor Villacrés y Rosita Toalombo por brindarme ese gran apoyo para poder cumplir con el objetivo de verme como un profesional, humilde y respetuoso.

A mi esposa Ciela y mi hija Lucy por brindarme ese cariño incondicional en todo momento, y enseñarme que al final de todo esfuerzo llega la recompensa.

A Orlando Iza por ser mi ejemplo de lucha, sacrificio, perseverancia y creer en mis sueños.

A mis profesores y amigos y demás familiares, que estuvieron presentes durante toda la trayectoria de mi carrera y me apoyaron de diferentes maneras.

Henry Israel Villacrés Toalombo

Agradezco infinitamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En especial a la Escuela de Ingeniería Automotriz, por darme la oportunidad de obtener una profesión, y ser útil a la sociedad y al país.

Mi más sincero y profundo agradecimiento a mi padre Carlos Sumi, quien a pesar de toda adversidad y momentos difíciles nunca dejó de brindarme su apoyo incondicional y siempre me motivó a seguir mis sueños.

Agradezco también a mi tutor y asesor de tesis: Edwin Pozo y Santiago Choto respectivamente, quienes con sus sólidos conocimientos supieron guiarme satisfactoriamente en este proyecto de titulación, a Andrea Huaraca quien es una persona carismática y fácil de querer, que desde que apareció en mi destino siempre ha estado muy pendiente de mí, apoyándome en todo lo necesario para continuar con mis sueños, a mis hermanas, familiares y amigos que de una u otra manera influyeron para alcanzar mi objetivo profesional.

Cristian Marcelo Sumi Guamán

CONTENIDO

Pág.

1.	INTRODUCCIÓN	
1.1.	Generalidades	1
1.2.	Antecedentes	1
1.3.	Justificación.....	2
1.4.	Objetivos	3
1.4.1.	<i>Objetivo General</i>	3
1.4.2.	<i>Objetivos Específicos:</i>	3
2.	MARCO TEÓRICO	
2.1.	Aerodinámica	4
2.1.1.	<i>Origen de las fuerzas aerodinámicas</i>	4
2.1.2.	<i>Fluido</i>	8
2.1.3.	<i>Flujo</i>	11
2.1.3.1.	<i>Flujos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales</i>	11
2.1.4.	<i>Capa límite</i>	13
2.1.5.	<i>Fineza</i>	13
2.1.6.	<i>Potencia Absorbida</i>	14
2.2.	Vehículo	15
2.2.1.	<i>Vehículo interprovincial</i>	15
2.2.2.	<i>Vehículos terminados de fabricación nacional certificados por la ANT</i>	15
2.3.	Carrocería.....	16
2.3.1.	<i>Norma técnica Ecuatoriana NTE 1323. Requisitos de las Carrocerías de los buses (Vehículos automotores)</i>	16
2.3.2.	<i>Norma técnica Ecuatoriana NTE 043. Bus interprovincial o intraprovincial</i>	17
2.4.	Homologación vehicular	17
2.5.	Túnel Aerodinámico (Túnel de viento).....	18
2.5.1.	<i>Partes del túnel de viento</i>	18
2.5.2.	<i>Tipos de túneles aerodinámicos</i>	20
2.5.3.	<i>Ensayos con maquetas</i>	20
2.6.	Dinámica de fluidos computacional (CFD)	21

3.	VEHÍCULO INTERPROVINCIAL ALFA-700 ORIGINAL	
3.1.	Diseño en software CAD	23
3.2.	Dimensionamiento del túnel de viento virtual	23
3.3.	Generación de Malla	24
3.4.	Validación de Malla	25
3.5.	Definición de parámetros del túnel de viento	27
3.6.	Cálculo del número de Reynolds	28
3.7.	Solución.....	28
3.8.	Análisis de resultados.....	31
3.8.1.	<i>Presión estática</i>	31
3.8.2.	<i>Velocidad</i>	32
3.8.3.	<i>Turbulencia cinética</i>	34
4.	PROPUESTA DEL REDISEÑO AERODINÁMICO DEL VEHÍCULO INTERPROVINCIAL ALFA-700	
4.1.	Consideraciones para el rediseño del vehículo interprovincial Alfa-700	36
4.2.	Modificación del vehículo interprovincial Alfa-700.....	37
4.2.1.	<i>Modificación frontal</i>	37
4.2.2.	<i>Modificación posterior</i>	38
4.3.	Análisis del rediseño del vehículo interprovincial Alfa-700.....	39
4.4.	Análisis de resultados.....	41
4.4.1.	<i>Contornos de presión estática</i>	41
4.4.2.	<i>Estela en la parte posterior del vehículo</i>	43
4.4.3.	<i>Turbulencia cinética</i>	44
5.	IMPRESIÓN 3D DE LOS VEHÍCULOS ALFA-700 A ESCALA	
5.1.	Impresión 3D.....	51
5.1.1.	<i>Material</i>	51
5.1.2.	<i>Procedimiento para imprimir los prototipos 3D</i>	51
5.2.	Pruebas de los prototipos con generación de humo	56
5.2.1.	<i>Pruebas en el prototipo Alfa-700</i>	57
5.2.2.	<i>Pruebas en el prototipo modificado</i>	57

5.3.	Pruebas Aerodinámicas en el túnel de viento	58
5.3.1.	<i>Cálculos del diseño original</i>	62
5.3.2.	<i>Cálculos del prototipo propuesto</i>	68
5.3.3.	<i>Resumen de resultados obtenidos en el túnel de viento</i>	74
5.3.4.	<i>Cálculos de la potencia absorbida</i>	75
5.3.5.	<i>Resumen y comparación de la potencia absorbida por los modelos de autobús.</i>	77
6.	ANÁLISIS DE COSTOS DE CONSTRUCCIÓN	
6.1.	Análisis costo beneficio	78
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
7.1.	Conclusiones	81
7.2.	Recomendaciones.....	82

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

PLANOS

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2-1. Coeficientes de arrastre típico.	6
Tabla 2-2. Coeficientes de arrastre algunos tipos de vehículos.	7
Tabla 2-3. Vehículos de fabricación nacional.	15
Tabla 2-4. Variación de la forma de la cámara de ensayos de un túnel de viento en función del número de Mach.	20
Tabla 3-1. Parámetros iniciales del Modelo original a 90km/h.	30
Tabla 3-2. Resultados aerodinámicos de modelo original.	31
Tabla 4-1. Parámetros iniciales para el análisis MEF del prototipo.	40
Tabla 4-2. Comparación de contornos de presión estática (frente) a 90 y 120 km/h.	41
Tabla 4-3. Comparación de contornos de presión estática (posterior) a 90 y 120 km/h.	43
Tabla 4-4. Flujo de aire (posterior) a 90 y 120 km/h.	44
Tabla 4-5. Turbulencia cinética a 90 y 120 km/h – Vista lateral.	45
Tabla 4-6. Turbulencia cinética a 90 y 120 km/h – Vista Superior.	46
Tabla 4-7. Turbulencia cinética a 90 y 120 km/h.	47
Tabla 4-8. Turbulencia cinética frente a 90 y 120 km/h.	48
Tabla 4-9. Turbulencia cinética Posterior a 90 y 120 km/h.	49
Tabla 4-10. Resultados aerodinámicos de los dos modelos de vehículos Alfa-700.	50
Tabla 5-1. Cálculos del diseño original (túnel de viento).	74
Tabla 5-2. Cálculos del nuevo diseño (túnel de viento).	74
Tabla 5-3. Resumen y comparación de la potencia absorbida.	77
Tabla 6-1. Descripción de costos de una carrocería.	79
Tabla 6-2. Costos de construcción de las matrices.	79
Tabla 7-1. Comparación de resultados.	81

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2-1. Fuerzas aerodinámicas en un vehículo.....	5
Figura 2-2. Regímenes del Número de Mach.	10
Figura 2-3. Línea de flujo.	12
Figura 2-4. Trayectoria de las partículas en un flujo laminar.	12
Figura 2-5. Trayectoria de las partículas en un flujo turbulento.....	13
Figura 2-6. La velocidad bajo el efecto de capa límite.	13
Figura 2-7. Porcentajes de unidades producidas.....	16
Figura 2-8. Partes del túnel de viento.	19
Figura 2-9. Maqueta de un vehículo en arcilla clay.....	21
Figura 2-10. Funcionamiento de un programa DFC.....	22
Figura 3-1. Dimensiones Túnel de viento virtual.	24
Figura 3-2. Malla de 0.45 m alrededor del modelo.	25
Figura 3-3. Inflation (5 capas).	25
Figura 3-4. Criterios de calidad de malla.....	26
Figura 3-5. Criterio de calidad de malla Skewness.	26
Figura 3-6. Criterio de calidad de malla Orthogonal Quality.	27
Figura 3-7. Contornos de velocidad en plano medio – vehículo original.....	27
Figura 3-8. Configuración de Modelo K-epsilon – Realizable- Non-equilibrium wall function.	30
Figura 3-9. Método específico Turbulence Intensity and Viscosity Ratio.	31
Figura 3-10. Contornos de Presión estática de vehículo original.	32
Figura 3-11. Contornos de velocidad en plano medio (vehículo original).	33
Figura 3-12. Líneas de velocidad 3D (Vehículo original).	33
Figura 3-13. Líneas de velocidad 3D (Vehículo original).	34
Figura 3-14. Turbulencia cinética 3D (Vehículo original).	35
Figura 4-1. Ángulo de inclinación del parabrisas (prototipo).....	37
Figura 4-2. Prototipo propuesto en Software CAD.	38
Figura 4-3. Prototipo propuesto renderizado.	38
Figura 4-4. Criterio de calidad de malla Skewness (prototipo).	39
Figura 4-5. Criterio de calidad de malla Orthogonal Quality (prototipo).....	40
Figura 5-1. Prototipo en Software CAD.	51
Figura 5-2. Diseño del prototipo a formato .STL	52
Figura 5-3. Instrucciones en Layer View.....	53
Figura 5-4. Impresión del prototipo al 50 %.....	53
Figura 5-5. Impresión del prototipo al 100 %.....	54
Figura 5-6. Masillado de los prototipos.	55
Figura 5-7. Prototipos finales.....	56
Figura 5-8. Turbulencia de aire generada en la parte frontal.....	57
Figura 5-9. Estela de aire generado en el Vehículo Alfa 700.	57

Figura 5-10. Flujo de humo generado en la parte frontal.	58
Figura 5-11. Estela de aire generado en el Vehículo Alfa 700 modificado.....	58
Figura 5-12. Túnel de viento de la ESPOCH.....	59
Figura 5-13. Anemómetro digital de la ESPOCH.	60
Figura 5-14. Valores de encerado del túnel de viento.	61
Figura 5-15. Datos obtenidos a 65km/h (diseño original).	62
Figura 5-16. Datos obtenidos a 70 km/h (diseño original).	63
Figura 5-17. Datos obtenidos a 90 km/h (diseño original).	65
Figura 5-18. Datos obtenidos a 100km/h (diseño original).	66
Figura 5-19. Datos obtenidos a 65km/h (diseño aerodinámico).	68
Figura 5-20. Datos obtenidos a 70km/h (diseño aerodinámico).	69
Figura 5-21. Datos obtenidos a 90km/h (diseño aerodinámico).	71
Figura 5-22. Datos obtenidos a 100km/h (diseño aerodinámico).	72

SIMBOLOGÍA

A	Área	m^2
T	Temperatura	$^{\circ}K$
C_v	Potencia Absorbida	Hp
v	Velocidad	m/s
P	Presión	Pa
D	Fuerza de arrastre	N
L	Fuerza de sustentación	N
V	Volumen	m^3
L	Longitud	m
δ	Densidad	kg/m^3
C_D	Coefficiente de arrastre	Adimensional
C_L	Coefficiente de sustentación	Adimensional
v_m	Velocidad media	m/s
μ	Viscosidad absoluta	$Kg*s/m^2$
φ	Viscosidad cinemática del fluido	m^2/s
Re	Número de Reynolds	Adimensional

LISTA DE ABREVIACIONES

CAD	Diseño Asistido por Computador
DFC	Dinámica de Fluidos Computacional
2D	2 Dimensiones
3D	3 Dimensiones
ANT	Agencia Nacional de Tránsito
CD	Coefficiente de Resistencia
CL	Coefficiente de Sustentación
CAE	Ingeniería Asistida por Computadora
Re	Número de Reynolds
MEF	Método de Elementos Finitos
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana

LISTA DE ANEXOS

- A** INEN NTE 1323: 2009.
- B** INEN NTE 043: 1R.
- C** Planos del Prototipo Propuesto.

RESUMEN

Teniendo como punto inicial fotos y los planos comerciales del bus Alfa-700 pertenecientes a la empresa Metálicas Pillapa de Pelileo, se busca mejorar dicho modelo de bus interprovincial, iniciando con el modelado en el software “Solid Works 2016”, se genera un archivo en formato .STEP para posteriormente importar el modelo al software ANSYS WORKBENCH 17.1 en el que se realizará el correspondiente análisis dinámico por elementos finitos, calculando los coeficientes de resistencia C_d y los coeficientes de sustentación C_l a velocidades de 90Km/h, la máxima permitida por la agencia nacional de tránsito (ANT) y a 120 Km/h por seguridad. Con los resultados obtenidos se identificó que los coeficientes de resistencia y sustentación del modelo de bus Alfa-700 son mejorables y se podrían disminuir con algunos cambios en la carrocería, con esta previa se inició el rediseño del bus con la finalidad de que el nuevo prototipo presente menor resistencia al flujo de aire, ahorre combustible y sea más estético. En el nuevo prototipo se modificó la parte frontal y posterior, esencialmente pues el prototipo debe ser más aerodinámico y eficiente al momento de ser conducido por las carreteras. Los diseños fueron impresos a escala en 3D con filamento Poliláctida (PLA), con los que se hizo un análisis real del flujo de aire mediante una cámara de humo y otro análisis de resistencia y carga en un túnel de viento. Los análisis realizados para el prototipo propuesto en este trabajo de titulación resultan muy satisfactorios al momento de reducir la resistencia y se logra una disminución en el consumo de combustible asiéndolo más eficiente además de estético. Se recomienda, para cualquier análisis modelar con medidas reales para obtener datos confiables y verídicos, más apegados a la realidad.

PALABRAS CLAVE: <REDISEÑO>, <AERODINÁMICA>, <MALLA>, <RESISTENCIA>, <SUSTENTACIÓN>, <TÚNEL DE VIENTO>, <TURBULENCIA CINÉTICA>, <IMPRESIÓN 3D>, <POLILÁCTIDA (PLA)>, <ANSYS (SOFTWARE)>

ABSTRACT

Having as a reference photographs and the commercial plans of the Alfa-700 bus belonging to Pillapa Metal company from Pelileo, it is aimed to improve that model of inter provincial bus, beginning with the modeling in the "Solid Works 2016" software, a file in the format .STEP was generated to eventually import the model to ANSYS WORKBENCH 17.1 software in which the corresponding dynamic analysis for finite elements will be performed, calculating the coefficients of resistance C_d and the lift coefficients C_l to speed up to 90 km/h, the maximum allowed by the National Agency of Transit (NAT) and 120 Km/h for safety. With the results obtained, it was identified that the coefficient of resistance and lifting of the model of the Alfa-700 bus are improvable and could be reduced through some changes in the bodywork, with this preview the redesign of the bus started aiming that the new prototype shows a lower resistance to airflow, save oil and be more esthetical. In the new prototype, the front and back of the bus were modified since the new model ought to be more aerodynamic and efficient when it is being driven on roads. The designs were printed in a 3D scale with Polylactic filament (PLA), which were used to make a real analysis of the airflow by using a smoke chamber and other analysis of resistance and load in a wind tunnel. The analysis performed for the prototype proposed in this graduation work were very satisfactory when it comes to reducing the level of resistance and so a reduction in the gas consumption, making it more convenient as well as esthetical. It is recommended, for any kind of analysis, to model with real measures in order to get reliable data, more likely to be real.

KEY WORDS: <REDESIGN>, <AERODYNAMIC>, <NET>, <RESISTANCE>, <LIFT>, <WIND TUNNEL>, <KINETIC TURBULENCE>, <3D PRINTING>, <POLYLACTIC (PLA)>, <ANSYS (SOFTWARE)>

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

El presente trabajo de titulación se realiza por la necesidad de crear un nuevo diseño aerodinámico y estético del autobús interprovincial Alfa-700 para Metálicas Pillapa de Pelileo, siendo necesario la modificación del modelo ya existente.

Las mejoras que se dieron hacen que el modelo sea más aerodinámico, reduciendo la resistencia por efectos aire, también la generación de la estela de viento en la parte posterior, y al mismo tiempo se reduce el consumo de combustible, la cual es de vital importancia para reducir el nivel de contaminación ambiental.

1.2. Antecedentes

“Antes del primer coche, el estudio de los pájaros y los peces ya había revelado la forma idónea para desplazarse por los fluidos, pero tuvieron que pasar algunas décadas para que estos conocimientos se aplicasen a la forma de las carrocerías. En las experiencias aerodinámicas de principios del siglo XX toda la forma del coche debía estar enfocada a conseguir la mejor penetración en el aire en pos de una mayor velocidad” (ORTEGO, 2013).

No se busca específicamente la obtención de mayor velocidad en el vehículo Alfa-700, sino ganar eficiencia en el desplazamiento reduciendo el consumo energético.

El transporte en el Ecuador juega un papel importante en el uso de la energía y, por lo tanto, en el impacto ambiental debido a la enorme cantidad de combustible derivado del petróleo que se emplea en su operación.

Entre los problemas que afectan a la economía del sector de autotransporte en Ecuador, especialmente el destinado al servicio pesado.

En la operación de los vehículos de servicio pesado, la velocidad, la carga transportada, las resistencias al desplazamiento del vehículo, son elementos que tienen gran influencia en el consumo de combustible y, además, una influencia directa en la emisión de gases contaminantes.

Para las empresas de transporte, el consumo de combustible es uno de los factores más importantes en los costos de operación, el correspondiente al combustible representa en promedio un gasto del 40%, por lo que es pertinente tomar medidas que permitan una operación más eficiente del vehículo (OSORIO, 2015, p.8).

1.3. Justificación

“Los autobuses desempeñan un papel importante en el uso de la energía, contribuyendo directamente con el impacto ambiental debido a la enorme cantidad de combustible derivado del petróleo que se emplea para su operación. La velocidad, la carga transportada, las resistencias al desplazamiento del vehículo, son elementos que tienen gran influencia en el consumo de combustible y, además, una influencia directa en la emisión de gases contaminantes” (OSORIO, 2015, p.8). En base al actual consumo promedio de combustible de buses con carrocería modelo Alfa-700, se pretende reducir dicho consumo, realizando mejoras aerodinámicas en lugares críticos y necesarios de la carrocería exterior. El consumo de combustible es uno de los factores más influyentes en el costo de operación, para las empresas de transporte de pasajeros.

El país necesita reducir al máximo el consumo de combustibles derivados del petróleo y utilizados en la operación del transporte pesado ya que de estos combustibles se deriva una de las principales fuentes de contaminación en nuestro medio por lo que es urgente y necesario realizarse estudios aerodinámicos enfocados en el desplazamiento eficiente de estos vehículos. En nuestro medio se ha dado preferencia de estudios aerodinámicos a vehículos livianos, muchos lo hacen solamente por estética o disfrute visual pero se debe llevar la aerodinámica mucho más allá de lo estético y enfocarse en el cuidado de nuestro medio ambiente, contaminando lo menos posible.

“La implementación de mejoras en el diseño aerodinámico, reduce la resistencia aerodinámica de los vehículos pesados, lo cual impacta en el consumo de combustible directamente” (OSORIO, 2015, p.5).

1.4. Objetivos

1.4.1. *Objetivo General.*

Realizar el diseño aerodinámico y prototipado del vehículo interprovincial Alfa-700 para Metálicas Pillapa.

1.4.2. *Objetivos Específicos:*

- Recopilar información y normas vigentes para el correcto diseño de la carrocería del vehículo interprovincial alfa-700, en función del Estado Actual del Arte.
- Diseñar y simular la carrocería, utilizando la asistencia de software, aplicando fuerzas actuantes y considerando las restricciones de las normas vigentes.
- Construir el prototipo exterior de la carrocería mediante impresión 3D.
- Verificar los datos obtenidos en el software mediante pruebas en un túnel de viento, garantizando el correcto desempeño del desplazamiento del vehículo en carretera.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Aerodinámica

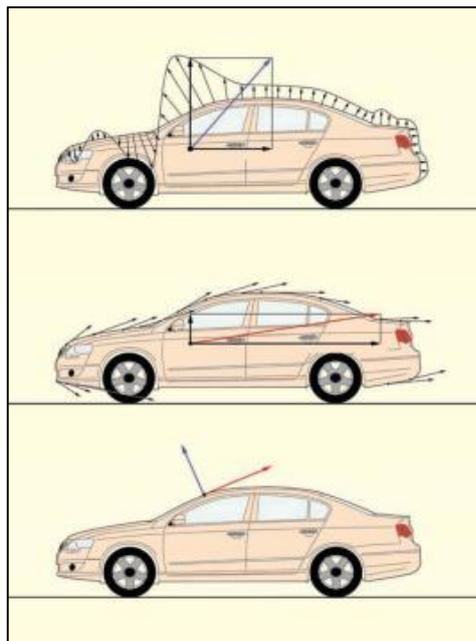
Es una parte de la mecánica de fluidos, que estudia el movimiento del aire, que cubre a objetos sólidos en movimiento y de otros fluidos gaseosos a la fuerza que sufre un cuerpo al moverse a través del aire, y en particular a la componente de esa fuerza en la dirección de la velocidad relativa del cuerpo respecto del medio, la resistencia es siempre de sentido opuesto al de dicha velocidad (ZITNIK, 2011, p.39).

2.1.1. Origen de las fuerzas aerodinámicas

“Cuando en un proceso mecánico interactúan dos sólidos, las fuerzas se aplican y transmiten en el punto de contacto. Pero cuando un sólido interactúa con el aire, en las moléculas del aire próximas al mismo se produce una distorsión, comenzando a moverse alrededor del sólido. El aire cambia de forma fluyendo alrededor del sólido y manteniendo un contacto físico en todos sus puntos. Por ello, el punto de contacto de las fuerzas aerodinámicas generadas son todos y cada uno de los puntos de la superficie del cuerpo.

- La magnitud de dichas fuerzas va a depender tanto del aire como del sólido, en este caso del automóvil. Dos son las propiedades fundamentales del aire a tener presentes: su viscosidad y su densidad.
- En el caso del automóvil ha de considerarse su forma, su rugosidad superficial, el área de contacto con el aire y sobre todo la velocidad relativa entre éste y el aire.
- Todo esto se traduce en que, sobre cada punto de la superficie del automóvil, estén presentes un par de fuerzas, una fuerza de presión, normal a la superficie del cuerpo, debido a la velocidad relativa entre ambos y una fuerza de rozamiento, tangente a la superficie del cuerpo, debida a la viscosidad del aire”(OLIVARES, 2011, p.12).

Figura 2-1. Fuerzas aerodinámicas en un vehículo.



Fuente: (OLIVARES, 2011, p.13).

2.1.1.1. Fuerza de arrastre (fuerza de resistencia)

Es una fuerza mecánica. Es generada por la interacción y contacto de un cuerpo rígido y un fluido. No es generado por un campo de fuerzas como en el caso de fuerzas gravitacionales o electromagnéticas donde no es necesario el contacto físico. Para que exista arrastre el cuerpo debe estar en contacto con el fluido. Debe haber un movimiento relativo entre el fluido y el sólido.

Siendo una fuerza, el arrastre es un vector que va en la dirección contraria al movimiento del cuerpo. Existen muchos factores que afectan la magnitud del arrastre. La magnitud de la sección efectiva de impacto y la forma de la superficie (CARMONA, 2008, p.8).

$$D = \frac{1}{2} \delta v^2 A C_D \quad (1)$$

Donde:

D =Fuerza de arrastre (Drag)

δ =Densidad del fluido.

v =Velocidad de la corriente libre

A =Área frontal del cuerpo perpendicular a la corriente v

C_D =Coeficiente de arrastre (adimensional)

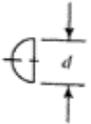
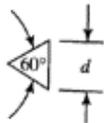
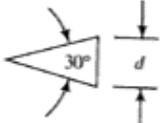
- Coeficiente de resistencia

La resistencia del coche al aire depende de la densidad del aire, la velocidad, su forma y su superficie. La densidad es un coeficiente constante y totalmente independiente del coche. En cuanto a la velocidad, según Javier Páez, subdirector de la dirección de Accidentología y seguridad del INSIA (Instituto Universitario de Investigación del automóvil) es tan importante que “cuando la velocidad del coche es reducida, la resistencia es casi inapreciable, mientras que cuando un auto dobla su velocidad, la resistencia del aire se multiplica por cuatro” (LOPEZ, 2012, p.2). El coeficiente de arrastre se halla experimentalmente de acuerdo a:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho v^2 A} \quad (2)$$

En la siguiente tabla se muestran los coeficientes de arrastre, típicos de algunas formas geométricas como el cono base cerrada y ángulo de 30°, que presenta un menor coeficiente de arrastre en comparación con los demás coeficientes. La tasa hemisférica abierta por delante tiene, un coeficiente de arrastre de 1,35 que presenta un mayor valor de coeficiente de arrastre, debido al impacto directo de la cara plana con el aire.

Tabla 2-1. Coeficientes de arrastre típico.

Forma del objeto	Orientación	C_D
Tasa hemisférica abierta por detrás		0,41
Tasa hemisférica abierta por delante		1,35
Cono, base cerrada		0,51
Cono, base cerrada		0,34

Fuente: (MOTT, 2006, p. 529).

Tabla 2-2. Coeficientes de arrastre algunos tipos de vehículos.

Tipo de vehículo	Coefficiente de arrastre C_D	Área frontal $A[m^2]$	$C_D A[m^2]$
Fiat Uno ES	0,33-0,034	1,83	0,60-0,62
Ford Fiesta 1.1	0,40-0,41	1,74	0,70-0,71
Ford Sierra 1.8	0,34-0,35	1,94	0,66-0,68
Renault 18 Turbo	0,35-0,37	1,88	0,66-0,70
Mazda 626 GLX 2.0	0,36-0,38	1,92	0,69-0,72
Toyota Camry GLi	0,37-0,39	1,94	0,72-0,76
Peugeot 305 GTX	0,38-0,40	1,84	0,70-0,74
Nissan Cherry GL	0,39-0,41	1,83	0,71-0,75
Toyota Corolla 1300	0,45-0,46	1,76	0,79-0,81
Mazda 929 2.0 GLX	0,39-0,44	1,93	0,75-0,85

Fuente: (KATZ, 2011, p.264).

2.1.1.2. Fuerza de sustentación

Es una fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través un fluido, de dirección perpendicular a la velocidad incidente.

Como con otras fuerzas aerodinámicas, en la práctica se utilizan coeficientes adimensionales que representan la efectividad de la forma de un cuerpo para producir sustentación y se usan para facilitar los cálculos y los diseños (ROSAS, 2012).

El modelo matemático de la fuerza de sustentación es:

$$L = \frac{1}{2} \delta v^2 A C_L \quad (3)$$

Donde:

L =Fuerza de sustentación

δ =Densidad del fluido.

v =Velocidad.

A =Área superficial del cuerpo en m^2

C_L =Coeficiente de sustentación (adimensional).

- Coeficiente de sustentación

Es una fuerza de empuje que se ejerce perpendicularmente hacia arriba, o coeficiente de sustentación positivo, si este valor es negativo representa a la carga aerodinámica, y a partir de estos resultados permite comparar la sustentación de cuerpos con diferente forma y tamaño, la sustentación es ampliamente estudiada y aplicada en la automoción.

El coeficiente de sustentación se halla experimentalmente de acuerdo a:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho v^2 A} \quad (4)$$

2.1.2. Fluido

Es una sustancia en fase líquida o gaseosa, puede deformarse de manera continua bajo la influencia del esfuerzo cortante sin importar lo pequeño que sea (CENGEL, 2012, p.2.).

2.1.2.1. Aire

Es un gas insípido incoloro e inodoro, puede clasificarse en aire seco y aire húmedo, posee la propiedad de ser un transportador ya sea de frío, vapor, humo, calor olores, suciedad, polvo y sonido (COLOCHO, 2011. p.6.).

2.1.2.2. Número de Reynolds

Es un número adimensional, que tiene por objeto caracterizar el comportamiento de un fluido en movimiento. A partir de este análisis podemos determinar si el flujo es laminar, o turbulento (MOTT, 2006, p.231), y viene dado por:

$$R_e = \frac{v_m r \delta}{\mu} = \frac{v_m r}{\varphi} \quad (5)$$

Donde:

v_m = Velocidad media [m/s]

r = Radio de la tubería [m]

μ = Viscosidad absoluta [Kg*s/m²]

φ = Viscosidad cinemática del fluido en [m²/s]

δ = Densidad del fluido [UTM/m³] o [Kg*s/m⁴]

Para aplicaciones automovilísticas viene dado por la siguiente expresión:

$$Re = 67,778 * v * L \quad (6)$$

Donde:

v = Velocidad del auto [m/s]

L = Longitud del auto [m]

El resultado es adimensional, y se compara con los parámetros estipulados por Reynolds, para determinar si el fluido es laminar o turbulento como se muestra a continuación:

$0 \leq Re \leq 2000$ El flujo es laminar

$2000 \leq Re \leq 4000$ El flujo es transitorio

$Re \geq 4000$ El flujo es turbulento.

2.1.2.3. *Número de Mach*

Es el cociente entre la velocidad de un móvil, y la velocidad del sonido, dentro del medio que se mueve (LAPLACE, 2014).

$$M = \frac{V}{V_s} \quad (7)$$

$$V_s = \sqrt{K * R * T} \quad (8)$$

Donde:

M = Número de Mach

V = Velocidad del móvil

V_s = Velocidad de transmisión del sonido

K = Constante = 1,4

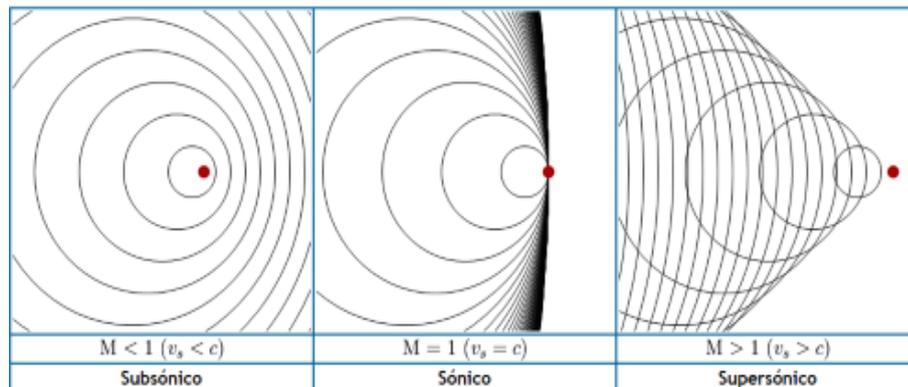
$R = \text{Constante de los gases} = 287 \text{ J/ Kg } ^\circ\text{K}$

$T = \text{Temperatura del lugar de estudio.}$

- Regímenes de flujo según Mach

Partiendo del número de Mach el flujo se divide en 5 regímenes:

Figura 2-2. Regímenes del Número de Mach.



Fuente: (LAPLACE, 2014).

- Régimen Subsónico

El número de Mach es inferior a la unidad, pero tiene una magnitud suficiente para quedar fuera de la clasificación del régimen de un flujo incompresible.

$M < 1$

- Régimen transónico

El número de Mach es muy cercano a uno, es decir varía valores ligeramente menores a la unidad y escasamente superiores a ella.

- Régimen sónico

El número de Mach es uno

$M = 1$

- Régimen supersónico

Es donde el número de Mach es superior a la unidad

$$1 < M < 5$$

- Régimen hipersónico

Es cuando el número de Mach igual o mayor a 5

$$M \geq 5$$

El número de Mach dentro de la mecánica de fluidos, tiene relación con la compresibilidad de un gas en base a los siguientes parámetros.

Es un fluido incompresible cuando $Mach \leq 0,3$ y compresible cuando $Mach \geq 0,3$

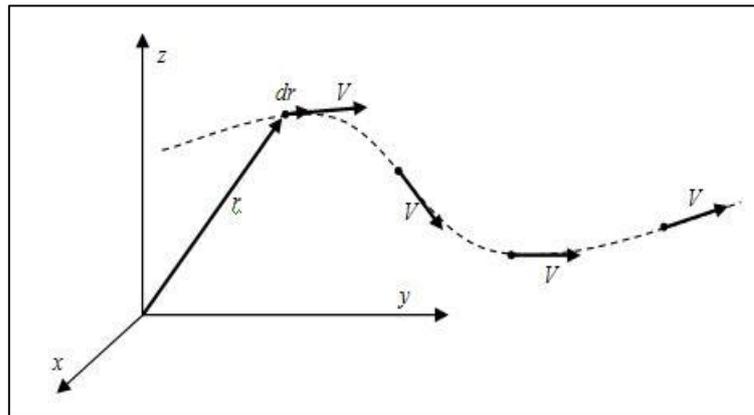
2.1.3. Flujo

Estudia el movimiento de un fluido, en el estudio de dicho movimiento se involucran las leyes del movimiento de la física, las propiedades del fluido y características del medio ambiente o conducto por el cuál fluyen (CENGEL, 2012, p.9).

2.1.3.1. Flujos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales

Se dice que un flujo sea unidimensional, bidimensional y tridimensional, cuando la velocidad del flujo varía en una, dos o tres dimensiones, un flujo típico de un fluido comprende una configuración geométrica tridimensional y la velocidad puede variar en las tres dimensiones. Un flujo se puede tomar aproximadamente como bidimensional cuando una de sus dimensiones es mucho más grande que la otra o no cambia de manera apreciable a lo largo de la dimensión de mayor longitud (CENGEL, 2012, p.13).

Figura 2-3. Línea de flujo.

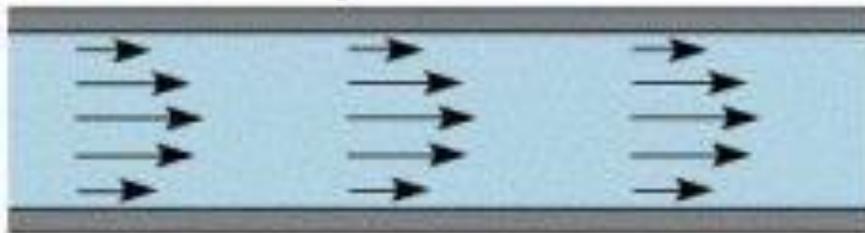


Fuente: (CENGEL, 2012, p.141).

2.1.3.2. Flujo laminar

Es aquel en el que el movimiento de las partículas tiene solamente el sentido y la dirección del movimiento principal del fluido. Se puede presentar en un conducto cerrado trabajando a presión (tubería), en un conducto abierto (canal) o en un conducto definido por el medio estudiado (volúmenes de gases definidos, no miscibles en el medio circundante).

Figura 2-4. Trayectoria de las partículas en un flujo laminar.

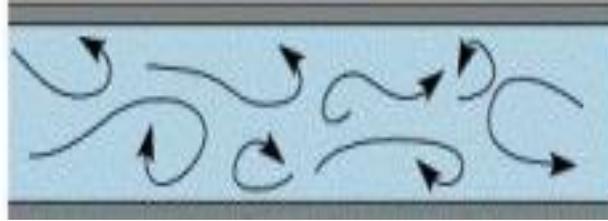


Fuente: (FONT, 2011, p.27).

2.1.3.3. Flujo turbulento

Es aquel en que las partículas del fluido tienen desplazamiento en sentidos diferentes a la del movimiento principal del fluido. En éste tipo de flujo al moverse las partículas con movimiento errático tiene como consecuencia el que se presenten colisiones entre ellas, y esto genera cambios en la cantidad de movimiento, que se manifiestan como una pérdida de energía.

Figura 2-5. Trayectoria de las partículas en un flujo turbulento.



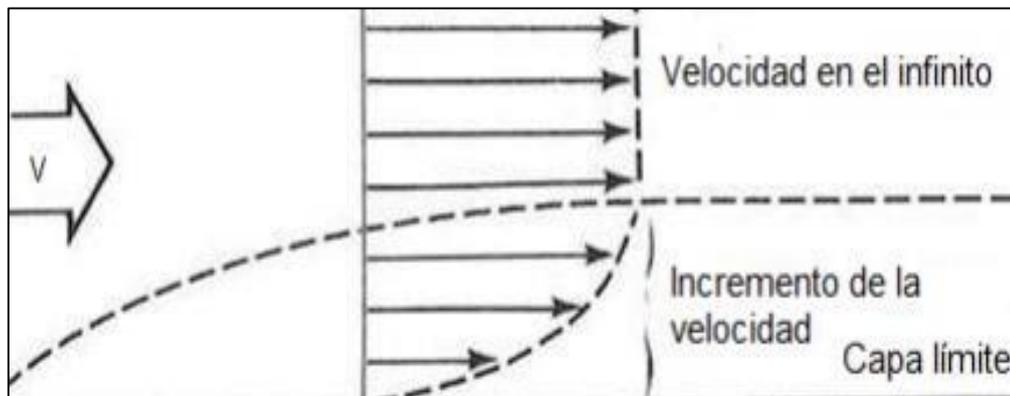
Fuente: (FONT, 2011, p.28).

2.1.4. Capa límite

Es una delgada región cerca de una pared sólida en la que se sienten los efectos de los esfuerzos cortantes viscosos provocados por la viscosidad del fluido y dentro de la cual el flujo es rotacional.

El espesor de la capa límite es la distancia desde la pared a la cual la velocidad es no más del 1% diferente que la velocidad no perturbada, la cual aumenta en la dirección del flujo (MONTES, 2015, p.22.).

Figura 2-6. La velocidad bajo el efecto de capa límite.



Fuente: (MONTES, 2015, p.22).

2.1.5. Fineza

La fineza también conocida como eficiencia aerodinámica, su resultado es un número adimensional, y se define como el cociente entre el coeficiente de sustentación y el coeficiente de resistencia, o también como el cociente entre, la carga aerodinámica y la fuerza de arrastre o resistencia, este valor determina el comportamiento de esta

(OLIVARES, 2011, p.15), en relación a la resistencia del paso de un objeto dentro del fluido se y define por:

$$f = \frac{L}{D} = \frac{C_L}{C_d} \quad (9)$$

Donde:

f = Fineza

L = Carga aerodinámica [N]

D = Fuerza de arrastre o resistencia [N]

C_L = Coeficiente de sustentación

C_d = Coeficiente de resistencia

2.1.6. Potencia Absorbida

La potencia en si se define como la cantidad de trabajo realizado durante un intervalo de tiempo. En aerodinámica es un parámetro que determina cuanta potencia necesita un auto para vencer la carga aerodinámica, tomando en cuenta el agarre de los neumáticos y la calzada y está definido por la siguiente ecuación:

$$Cv = \frac{C_d * A * V^3}{\delta} \quad (10)$$

Donde:

Cv = Potencia absorbida [Hp]

C_d = Coeficiente de arrastre [adimensional]

A = Área [m²]

V = Velocidad [m/s]

δ =Densidad [kg/m³]

2.2. Vehículo

Es una máquina que se permite desplazarse de un lugar a otro por la acción de un motor que funciona con algún tipo de combustible como: gasolina, diésel, se deriva del latín “vehiculum”, que se traduce como medio de transporte.

2.2.1. Vehículo interprovincial

Vehículo diseñado y equipado para el transporte masivo de pasajeros en viajes a largas distancias entre provincias y no lleva pasajeros a pie. Dependiendo de lo dispuestos en las normas se puede transportar personas que varían en número desde 35 hasta 53 como máximo (NTE INEN 043).

2.2.2. Vehículos terminados de fabricación nacional certificados por la ANT

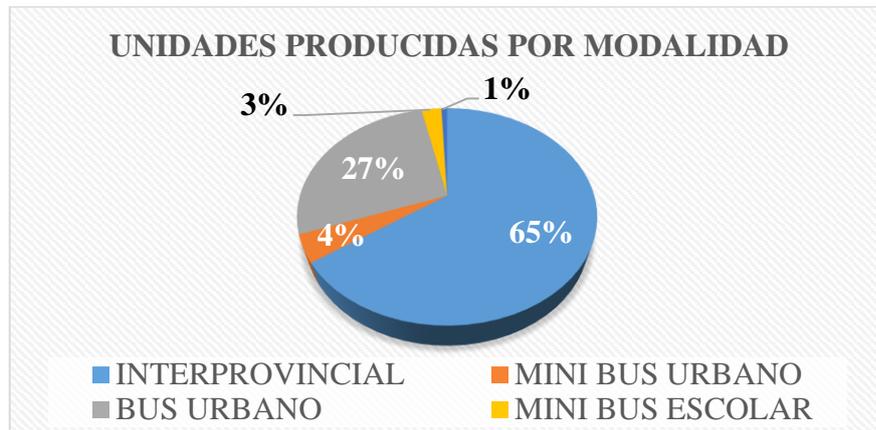
Los vehículos interprovinciales son los de mayor producción en Ecuador, estos vehículos alcanza una producción de 177 unidades de un total de 271 hasta Julio del 2016. Los vehículos interprovinciales alcanzan velocidades de 90 km/h, incluso puede superar dicha velocidad lo que no sucede con otros tipos de vehículos de transporte masivo de pasajeros.

Tabla 2-3. Vehículos de fabricación nacional.

MODALIDAD	CANTIDAD
INTERPROVINCIAL	177
MINI BUS URBANO	11
BUS URBANO	74
MINI BUS ESCOLAR	7
MINIBUS TURISMO	2
TOTAL	271

Fuente: www.ant.gob.ec

Figura 2-7. Porcentajes de unidades producidas.



Fuente: Autores.

2.3. Carrocería

Es una caja especial destinada para transportar personas o mercancías, durante la circulación del automóvil, la función principal de la carrocería es alojar y proteger a los pasajeros del vehículo (CEDE, 2012, p.45).

2.3.1. Norma técnica Ecuatoriana NTE 1323. Requisitos de las Carrocerías de los buses (Vehículos automotores)

Esta norma establece los requisitos generales para el diseño, fabricación y el montaje, aplica para todas las carrocerías sean importadas o de construcción nacional, las disposiciones generales (NTE INEN 1323 1R).

2.3.1.1. Consideraciones del diseño de la carrocería

- La estabilidad
- Distribución de masa
- Altura del centro de gravedad
- Dimensiones de la carrocería
- Hermeticidad
- Ergonomía
- Geometría
- Materiales

- Seguridad activa y pasiva
- Coeficiente de resistencia frontal del aire (Como mínimo 0,7)

2.3.2. *Norma técnica Ecuatoriana NTE 043. Bus interprovincial o intraprovincial*

2.3.2.1. *Especificaciones de la carrocería*

- Cualquiera que sea el material debe estar protegido de la corrosión, las partes que la componen deben presentar sólida fijación entre sí, a través de soldadura, remaches o tornillos, de modo de evitar ruidos y vibraciones del vehículo, cuando se encuentren en movimiento, además de garantizar a través de los refuerzos necesarios, la resistencia suficiente para soportar en los puntos de concentración de carga todo tipo de esfuerzo al que puedan estar sometidos.
- Para efectos de ventilación se debe contar con un mínimo de dos escotillas, ubicadas sobre el área comprendida entre los ejes delantero y posterior, deben ser de tapa hermética con abertura superior parcial, y un dispositivo de salida de emergencia.
- Las dimensiones externas del vehículo:

Largo máximo de 2 ejes (13300 mm).

Altura máxima (4000 mm).

2.4. Homologación vehicular

Es el proceso mediante el cual la Agencia Nacional de Tránsito certifica que un modelo de vehículo que pretende comercializarse en el país, cumple con todas las normas técnicas de emisión y seguridad que le son aplicables. Este proceso tiene como fin garantizar al consumidor que los vehículos que se encuentran en el mercado son seguros y que permite a la ciudadanía disponer de sistemas de transportes eficientes y sustentables ambientalmente. En un trabajo interinstitucional con el Ministerio de Transporte y Obras Públicas, Ministerio de Industrias y Productividad, Organismo de Acreditación Ecuatoriana y el Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, la ANT ejecuta el control sobre el ingreso al parque automotor del transporte público o comercial, y los que la

autoridad considere sean necesarios, con la emisión del certificado de homologación que es extendido a los importadores, fabricantes, carroceros o comercializadores que cumplan con los requisitos y condiciones que establece la norma. (ANT, 2013).

2.5. Túnel Aerodinámico (Túnel de viento)

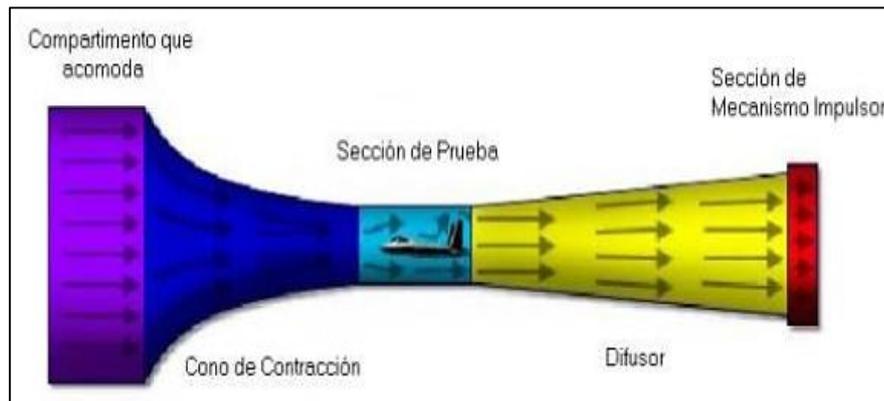
Es una herramienta que permite estudiar el comportamiento del aire al colocar un objeto dentro del flujo, no solo se centra en el diseño de vehículos sino también de elementos tan distintos como puede ser una casa, un puente, una torre, o el casco de un ciclista o incluso el mismo ciclista, en fin, todo lo que sea necesario estudiar de un elemento que sea susceptible de poder comportarse de una forma o de otra, dependiendo de si le incide el viento o no.

Lo que se hace es incidir sobre el objeto, normalmente una maqueta a escala del objeto, un flujo continuo de aire generado por unos ventiladores que serán más o menos grandes dependiendo de la escala de la maqueta, a menos escala, menores ventiladores, menos coste, menos instalaciones, pero como consecuencia se producen peores resultados. El problema es que realizar pruebas con objeto reales demasiado grande encarece mucho la prueba ya que las turbinas que generen el flujo deben de ser muy grandes y en consecuencia muy difíciles de calibrar ya que deben de estar perfectamente diseñadas para que no generen turbulencia y flujos parásitos pero tiene una contraprestación, cuanto más grande sea la maqueta y más parecida a la realidad, mejores serán los resultados del ensayo. Por tanto, se tiene un tubo que por un extremo está abierto, una zona central donde hacen las mediciones y se coloca el elemento a analizar y en el otro extremo una o más turbinas que extraen o introducen aire al interior del circuito para genera el flujo (XENFORO, 2012).

2.5.1. Partes del túnel de viento

El túnel de viento es un dispositivo no tan complejo, está formado por cinco partes importantes que se detallan a continuación:

Figura 2-8. Partes del túnel de viento.



Fuente: (XENFORO, 2012).

- Cámara de acomodación o de establecimiento. Su objetivo es enderezar y uniformizar el flujo de aire. Tiene una estructura en forma de panel, esto lo que hace es “romper” el aire en múltiples flujos independientes que se vuelven a unificar en el cono. Esto es muy eficaz en la reducción de posibles remolinos de aire en circulación por el túnel.
- Cono de contracción o de aceleración. El cono de contracción toma un volumen grande de aire de baja velocidad y lo reduce a un volumen pequeño de aire de alta velocidad sin crear turbulencia. Su función es acelerar la velocidad del flujo manteniéndolo ordenado y uniforme para posteriormente llegar a la cámara de ensayos.
- Sección de prueba o cámara de ensayo. Es la parte más importante del túnel. Es el lugar para colocar el objeto a estudiar y también dónde se obtienen las mediciones. Es muy importante que el flujo que la atraviesa sea lo más uniforme posible ya que, tener turbulencias en esa zona falsearía los datos obtenidos y el viento no se comportaría como debería hacerlo sobre el objeto.
- Difusor. Una vez el aire ya ha salido de la cámara de ensayos, el difusor reduce la velocidad del flujo mediante su perfil divergente. Interesa que el aire salga a la menor velocidad posible ya que la velocidad de salida irá relacionada con las pérdidas energéticas del túnel. A menor velocidad, menores son las pérdidas.

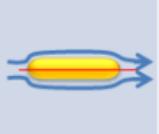
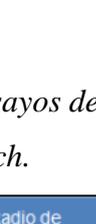
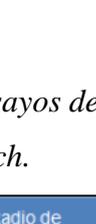
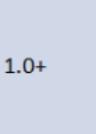
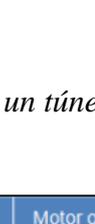
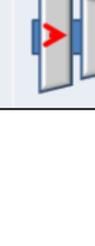
- Sección del mecanismo impulsor o ventilador. La sección del mecanismo impulsor proporciona la fuerza que hace al aire moverse a través del túnel de viento. Normalmente llevan aparatos electrónicos para poder variar la velocidad y así realizar ensayos bajo las condiciones deseadas (XENFORO, 2012).

2.5.2. Tipos de túneles aerodinámicos

Existe una amplia variedad de túneles aerodinámicos, pudiéndose encontrar una gran diversidad dependiendo del número de Mach, tamaños de cámaras de ensayos y formas de los conductos.

Los túneles pueden ser subsónicos, transónicos, supersónicos o hipersónicos, variando grandemente de unos a otros la forma.

Tabla 2-4. Variación de la forma de la cámara de ensayos de un túnel de viento en función del número de Mach.

Régimen de Velocidad	Flujo Típico (Modelo)	Sección de Entrada	Ratio de Compresión	Motor o sistemas de motor
Subsónico (M= 0 - 0.7)			1.0+	
Transónico (M= 0.7 - 1.2)			1.1	
Supersónico (M= 1.2 - 5)			2 (M = 2)	
Hipersónico (M > 5)			20 (M = 5)	

Fuente: www.docplayer.es

2.5.3. Ensayos con maquetas

En la mayoría de las pruebas de túnel de viento no se utilizan coches reales, si no que estas se realizan con maquetas hechas de una arcilla llamada “clay”. Hay varias razones

para ello, la primera es cuestión de tamaño, muchos túneles no tienen capacidad de hacer ensayos con coches reales.

La segunda, de operatividad y presupuesto: con las maquetas se pueden trabajar con diferentes versiones de un mismo modelo. Así mismo, durante las pruebas se detectan fallos en los diseños, los cuáles son modificados de forma (LOPEZ, 2012, p.7).

Figura 2-9. Maqueta de un vehículo en arcilla clay.



Fuente: (LOPEZ, 2012, p.7).

2.6. Dinámica de fluidos computacional (CFD)

CFD es la ciencia de predecir el flujo de fluidos mediante la resolución de ecuaciones matemáticas con un procedimiento numérico.

Los análisis CFD más utilizados en la ingeniería son:

- Nuevos diseños
- Rediseño
- Solución de problemas difíciles de forma manual
- Estudios y desarrollo del producto

El funcionamiento de un programa DFC es el siguiente:

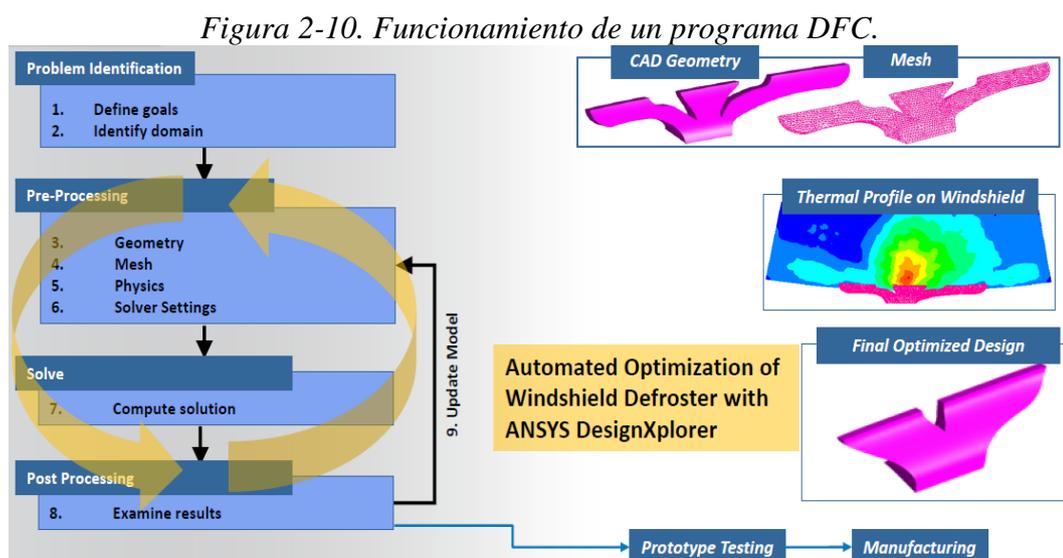
Identificación del problema.- se analiza minuciosamente el problema para encaminar correctamente el estudio CFD.

Pre-Proceso.- se prepara al modelo para ser sometido a su respectivo análisis, para lo cual se define:

- La geometría del modelo
- Mallado y calidad de malla
- Condiciones físicas
- Configuraciones de solución

Proceso.- el software realiza todos los cálculos previamente especificados generando datos de solución.

Post-Proceso.- el software permite ver la solución mediante gráficas, además de otros resultados indirectos. En caso de obtener resultados indeseados se realiza una nuevo pre-proceso caso contrario se pasa a la etapa de experimentación con la utilización de prototipos para validar el análisis en el software y posteriormente a la manufactura con elementos reales.



Fuente: Lecture 2 Introduction to the CFD Methodology.

CAPÍTULO III

3. VEHÍCULO INTERPROVINCIAL ALFA-700 ORIGINAL

3.1. Diseño en software CAD

El diseño del vehículo interprovincial Alfa-700 para “Metálica Pillapa” se desarrolló a partir de fotos y de los planos comerciales que posee actualmente la empresa. Para el modelado del autobús actual y el nuevo diseño se utilizó un software CAD, en el que primero se genera un croquis según la formas que tiene el modelo y mediante la utilización de superficies complejas se logra obtener un diseño 3D similar al autobús real, utilizando medidas reales.

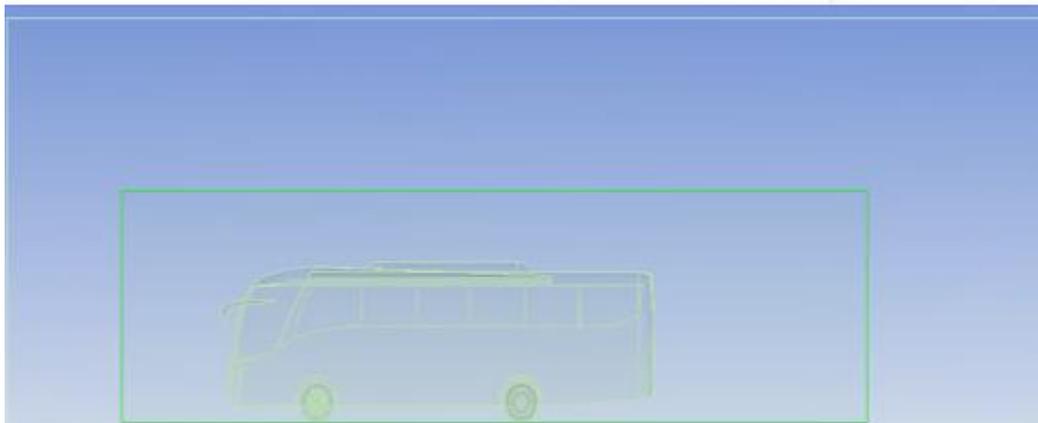
El posterior análisis aerodinámico del modelo alfa 700 se lo desarrolla con ayuda del módulo Fluent de ANSYS, importando el modelo desde el software de diseño CAD, en un formato STEP, este formato ofrece mejores condiciones de importación, manteniendo todas sus propiedades del modelado, son llevadas al software para la simulación en la que se genera un solo cuerpo sólido.

3.2. Dimensionamiento del túnel de viento virtual

Una vez importado el modelo se procede a generar el túnel de viento virtual, realizando un análisis profundo sobre la estela de viento que el vehículo genera cuando circula a velocidades considerablemente altas se creyó pertinente tomar las siguientes dimensiones, como se muestra en la fig. 3-1.

Figura 3-1. Dimensiones Túnel de viento virtual.

Details of Enclosure1	
Enclosure	Enclosure1
Shape	Box
Number of Planes	0
Cushion	Non-Uniform
<input type="checkbox"/> FD1, Cushion +X value (>0)	6 m
<input type="checkbox"/> FD2, Cushion +Y value (>0)	6 m
<input type="checkbox"/> FD3, Cushion +Z value (>0)	6,07 m
<input type="checkbox"/> FD4, Cushion -X value (>0)	6 m
<input type="checkbox"/> FD5, Cushion -Y value (>0)	0,078 m
<input type="checkbox"/> FD6, Cushion -Z value (>0)	12,14 m
Target Bodies	All Bodies
Export Enclosure	Yes



Fuente: Autores (Fines académicos).

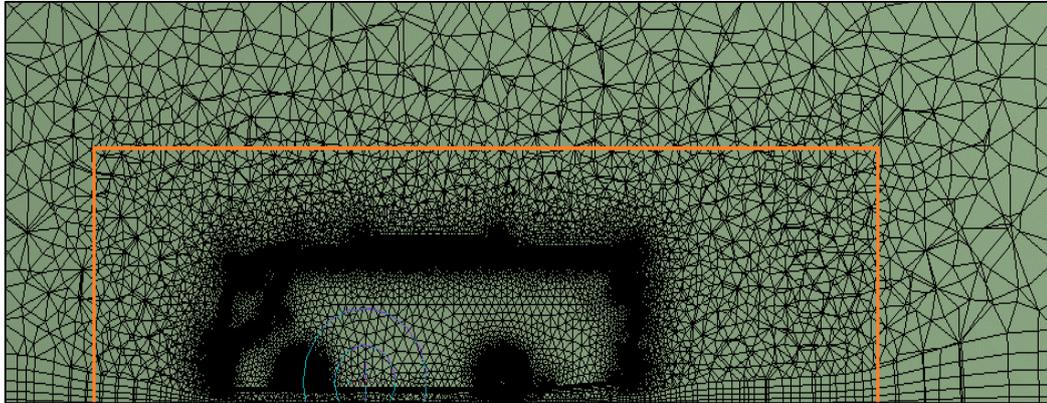
3.3. Generación de Malla

Este paso es muy importante para obtener buenos resultados en parámetros de arrastre y sustentación. Al momento de generar la malla, se realiza de forma manual ya que el programa permite mallar de forma específica, además permite un mallado más fino o grueso según las partes más importantes que se desea analizar, para el presente caso se utiliza el método de tetraedro, el cual es recomendado para este tipo de análisis, puesto que el diseño es de dimensiones grandes.

Alrededor del modelo se propone una malla fina de 0.45 m ver fig. 3-2, también se considera el parámetro de “proximity and curvature” para que se ajuste de mejor manera a las curvas y ángulos más pronunciados del modelo, finalmente se genera un “inflation”, esto indica que se generan 5 capas alrededor del modelo, esto ayuda a captar de mejor

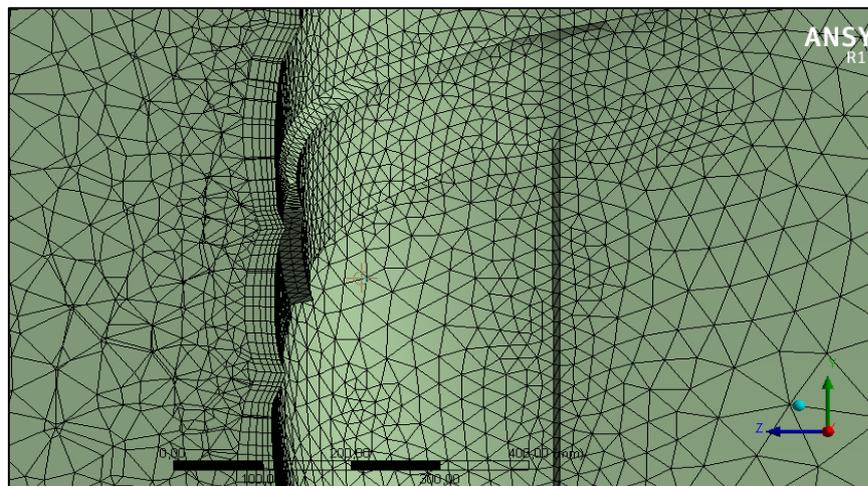
manera el flujo del aire que tiene un efecto significativo en el arrastre, de la misma manera influye en la apreciación de la capa límite ver fig. 3-3.

Figura 3-2. Malla de 0.45 m alrededor del modelo.



Fuente: Autores (Fines académicos).

Figura 3-3. Inflation (5 capas).



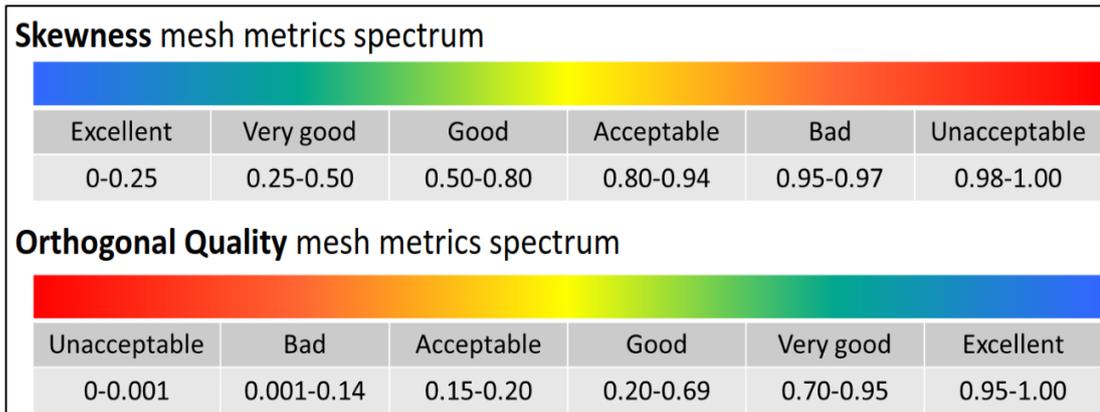
Fuente: Autores (Fines académicos).

3.4. Validación de Malla

Se verifica la calidad de malla con el criterio de Skewness como se muestra en la fig. 3-4, donde indica que valores < 0.95 la malla es aceptable mientras que con el criterio de orthogonal quality los valores deben ser > 0.15 , en este caso, para el primer criterio tenemos un valor máximo de 0.97497 ubicado en el lateral izquierdo del modelo siendo despreciable ya que la superficie de interés es el frente y respaldo, además considerando el promedio de la calidad de malla global con un valor de 0,26042, esto indica que la

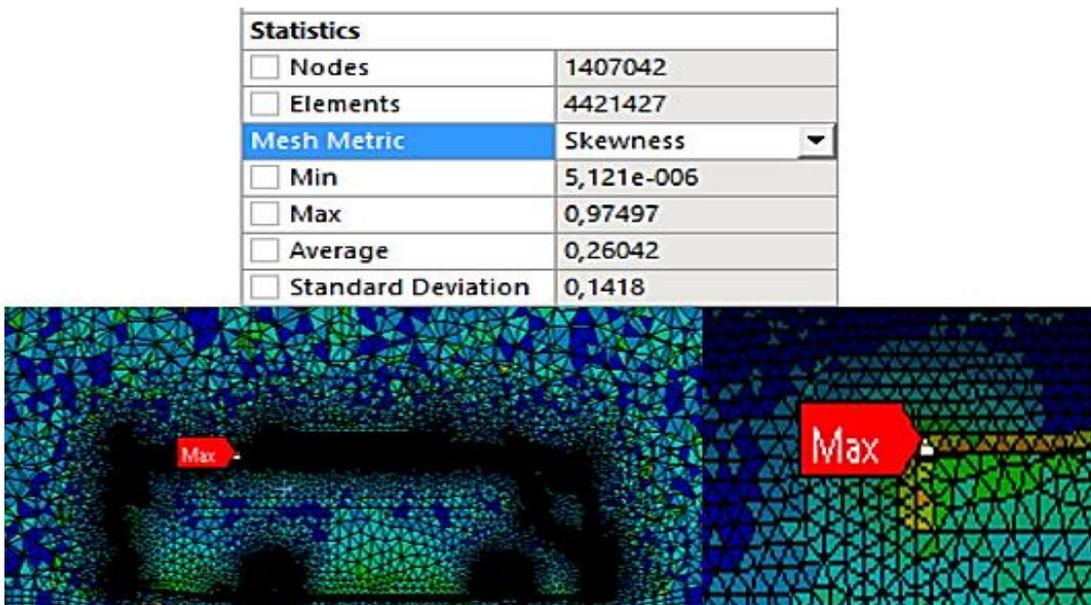
La malla es muy buena y no presentaría inconveniente ver fig. 3-5, en el segundo caso un valor mínimo de 0.00632 ubicado en los detalles laterales del vehículo, así mismo se desprecia ya que estos no influyen directamente en el análisis, el promedio global en base a este criterio es un valor de 0,84489 considerando una malla muy buena. Finalmente la malla tiene 1407042 nodos y 4421427 elementos.

Figura 3-4. Criterios de calidad de malla.



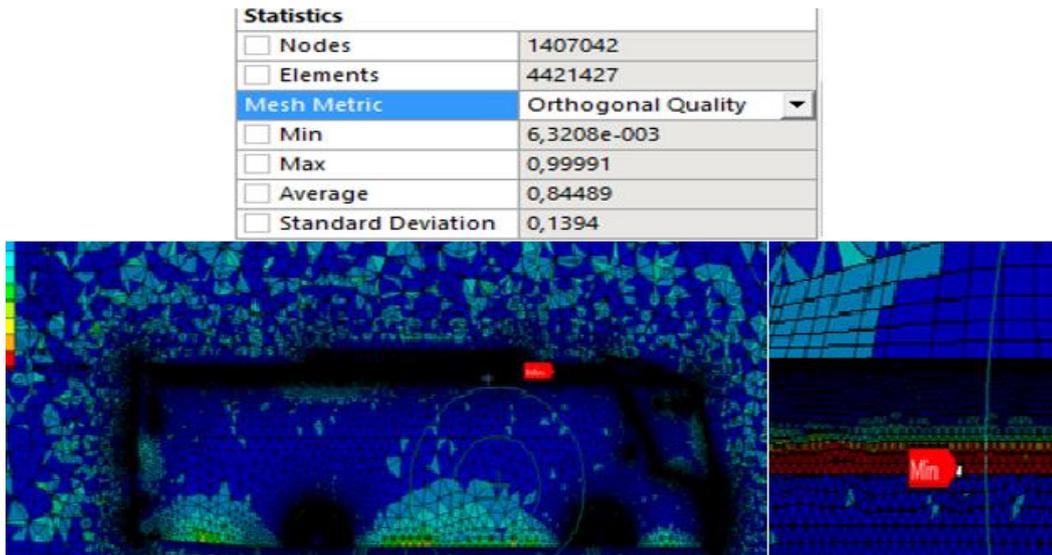
Fuente: Autores (Fines académicos).

Figura 3-5. Criterio de calidad de malla Skewness.



Fuente: Autores (Fines académicos).

Figura 3-6. Criterio de calidad de malla Orthogonal Quality.

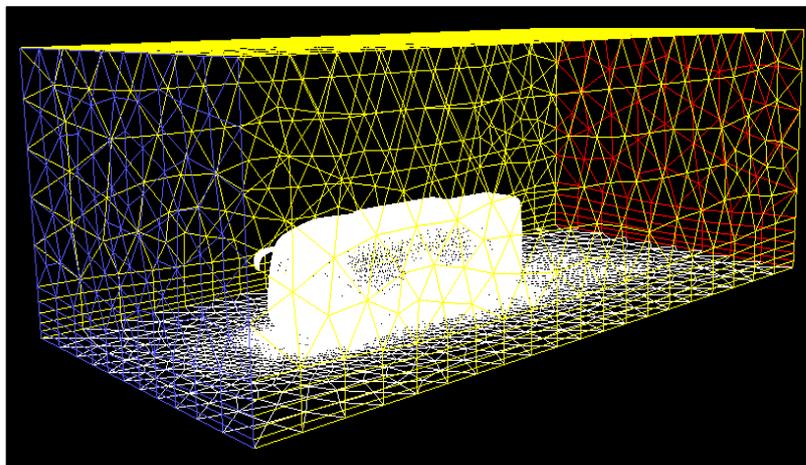


Fuente: Autores (Fines académicos).

3.5. Definición de parámetros del túnel de viento

En cara frontal se considera la velocidad del aire de 25m/s al cual se denomina “inlet-velocity”(azul), la cara posterior “pressure-outlet” es una presión constante de salida igual a la presión atmosférica (rojo), la cara inferior “road” considerando el suelo, las superficies del autobús (blanco) y finalmente las caras restantes como “sym” (amarillo) indicando que se trata de caras imaginarias esto quiere decir que el aire dentro del túnel de viento se comporta de la misma manera que el aire que se encuentra fuera de este ver figura. 3-7.

Figura 3-7. Contornos de velocidad en plano medio – vehículo original.



Fuente: Autores (Fines académicos).

3.6. Cálculo del número de Reynolds

$$R_e = 67,778 * v * L \quad (11)$$

Donde:

v = Velocidad del auto [m/s]

L = Longitud del auto [m]

$$R_e = 67,778 * 25 * 12,14$$

$$R_e = 20570,62$$

3.7. Solución

“Para la solución se utiliza las ecuaciones de Navier-Stokes de Reynolds (también conocidas como ecuaciones de RANS), son ecuaciones utilizadas para predecir el flujo de fluido usando una formulación de tiempo promedio. El concepto primario aplicado es la descomposición de Reynolds que consiste en descomponer una cantidad instantánea en sus cantidades promediadas y fluctuantes en el tiempo. La naturaleza promedio de sus ecuaciones hace que sea una opción atractiva mientras se simulan flujos turbulentos. Teniendo en cuenta ciertas aproximaciones basadas en el conocimiento de las propiedades de los flujos turbulentos, estas ecuaciones pueden usarse para dar soluciones promedio en el tiempo a las ecuaciones de Navier-Stokes.” (Aerodynamic Analysis of a Car Model using Fluent- Ansys 14.5) estas ecuaciones se resuelven mediante el método de volumen finito con ayuda del software ANSYS 17.1 en estado estacionario.

Para la solución se utiliza el modelo K-epsilon – Realizable- Non-equilibrium wall function (NWF) la configuración se muestra en la figura. 3-8.

“El modelo k-epsilon es uno de los modelos de turbulencia más utilizados. Que emplea dos ecuaciones de transporte adicionales para representar las propiedades turbulentas del flujo. Esto permite que un modelo de dos ecuaciones tenga en cuenta los efectos de la convección y la difusión de la energía turbulenta.” (Aerodynamic Analysis of a Car Model using Fluent- Ansys 14.5).

“El modelo k-epsilon realizable aborda las deficiencias bien conocidas del modelo k-epsilon tradicional mediante la incorporación de:

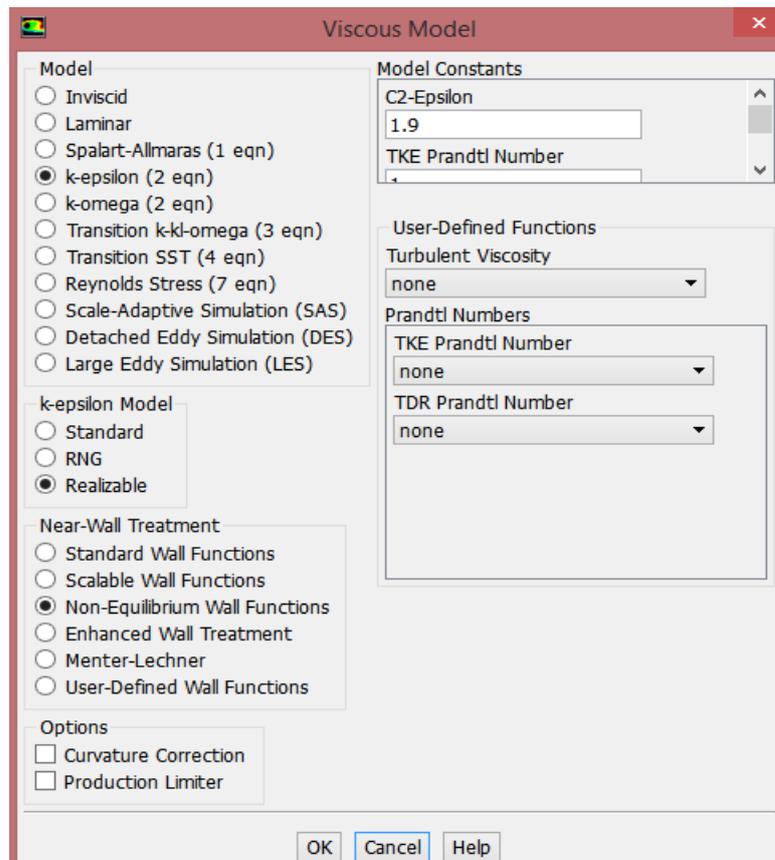
- Una nueva fórmula de viscosidad de turbulencia que implica una variable C_μ originalmente propuesta por Reynolds.
- Una nueva ecuación de modelo para la disipación basada en la ecuación dinámica de la fluctuación de velocidad cuadrada media.

Este modelo permite alcanzar buenos resultados en términos de valores integrales (por ejemplo, C_d) que están dentro del 2-5% del valor real. También es muy estable y converge rápidamente.” (Aerodynamic Analysis of a Car Model using Fluent- Ansys 14.5).

“Non-equilibrium wall function (NWF) es recomendado para flujo exterior alrededor de un vehículo y proporciona predicciones más realistas del comportamiento de las capas límite turbulentas, incluida la separación de flujo, y lo hacen sin un aumento significativo en el tiempo de la CPU o en la memoria dinámica” (Aerodynamic Analysis of a Car Model using Fluent- Ansys 14.5).

“Los parámetros iniciales que se muestran en la tabla E, son ingresados en el software donde se considera el método específico “Turbulence Intensity and Viscosity Ratio” recomendado para análisis de flujo externo, la velocidad de ingreso (velocity inlet) se configura con el 1% para Turbulence Intensity y el 10% para Turbulence Viscosity Ratio” ver fig. 3-9 (de video Part 3b ANSYS Fluent for Vehicle Aerodynamics <https://www.youtube.com/watch?v=iQWzoomxjc8>). La solución se realiza con 200 iteraciones para obtener mejores resultados.

Figura 3-8. Configuración de Modelo K-epsilon – Realizable- Non-equilibrium wall function.



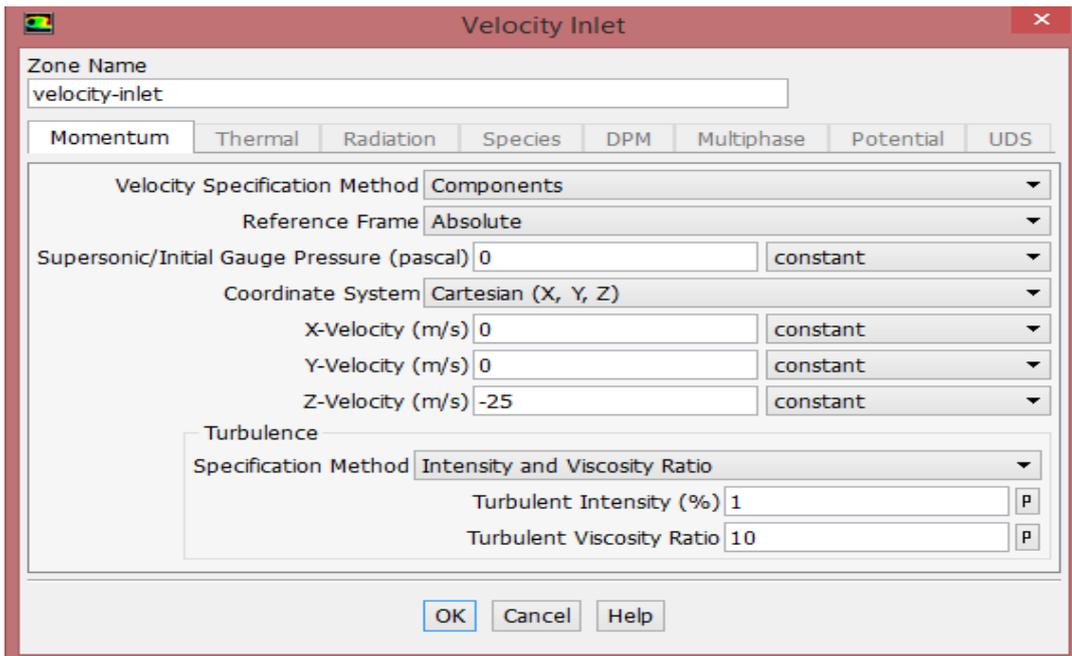
Fuente: Autores (Fines académicos).

Tabla 3-1. Parámetros iniciales del Modelo original a 90km/h.

Análisis aerodinámico		
Parámetro	Cantidad	Unidad
Densidad	0,86060	$\frac{Kg}{m^3}$
Viscosidad	1.7894e-05	$\frac{Kg}{m * s}$
Velocidad	25	$\frac{m}{s}$
Temperatura	293,15	$^{\circ}K$
Área proyectada	9.36057	m^2
Longitud	12.14	m

Fuente: Autores.

Figura 3-9. Método específico Turbulence Intensity and Viscosity Ratio.



Fuente: Autores (Fines académicos).

3.8. Análisis de resultados

Los resultados obtenidos en la simulación se muestran en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2. Resultados aerodinámicos de modelo original.

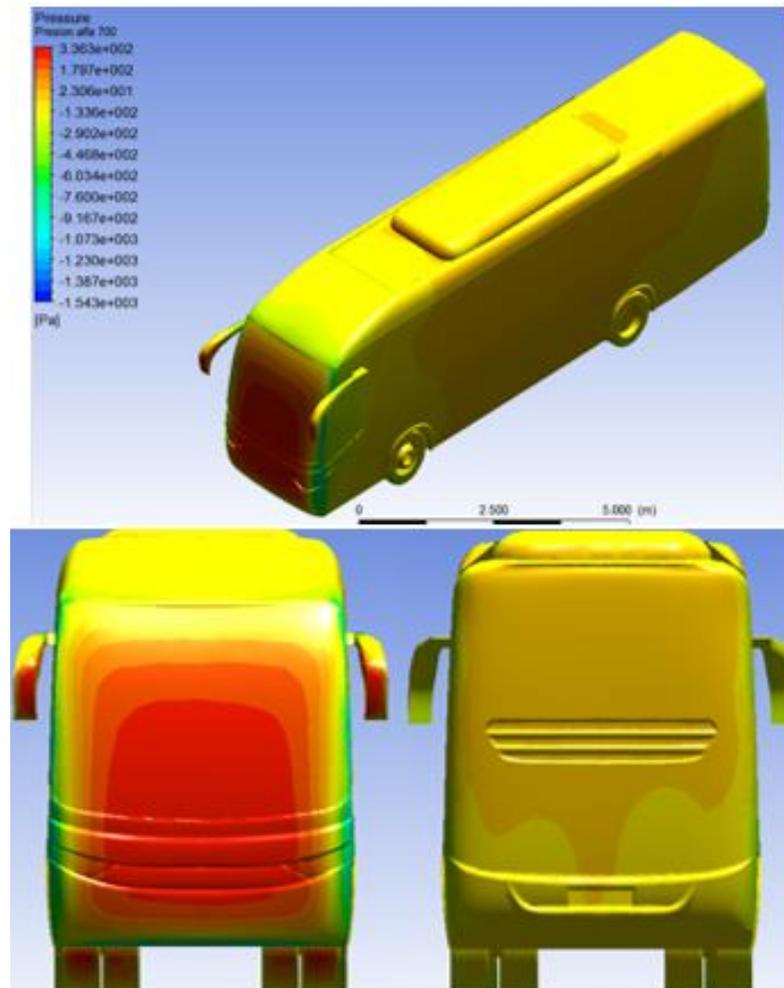
Fuerza Z (N)	Fuerza Y (N)	Cd	Cl	Fineza
1319	-839	0.47	0.3	0.6

Fuente: Autores (Fines académicos).

3.8.1. Presión estática

Como muestra la fig. 3-10 en la parte frontal se aprecia las presiones más altas donde su máximo valor es de 336 Pascales debido a que el aire impacta directamente en esta zona produciéndose de igual manera en los neumáticos frontales, otra parte de interés es el posterior del vehículo con valores de presión comprendidos entre 23 a 179 Pascales.

Figura 3-10. Contornos de Presión estática de vehículo original.



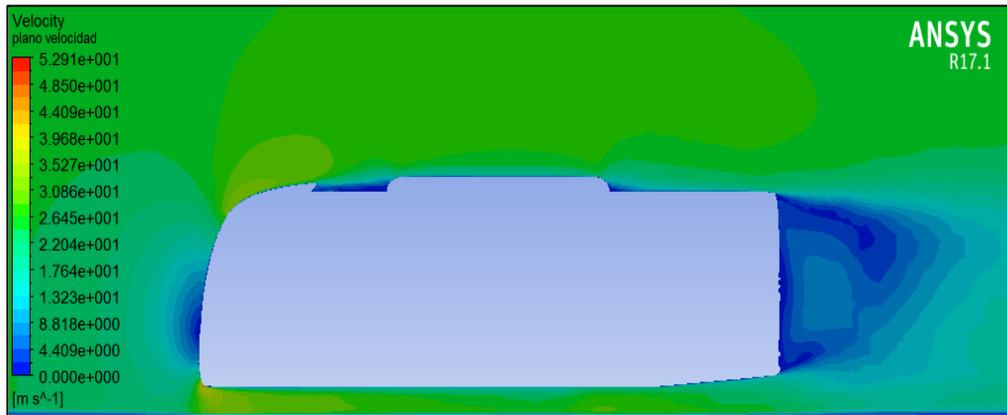
Fuente: Autores (Fines académicos).

3.8.2. Velocidad

Para este caso se analiza la velocidad en un plano ubicado en la mitad del modelo y líneas de velocidad en 3D para una mejor apreciación.

El primer caso se puede observar en la fig. 3-11, en donde indica que en la parte frontal hay valores mínimos de velocidad razón por la cual existe mayor presión concordando con el teorema de Bernoulli, mediante la simulación se obtiene un valor máximo de velocidad de 52.9 m/s localizado en la parte inferior delantera del vehículo esto se debe a que hay una curva pronunciada permitiendo alcanzar mayor velocidad así mismo sucede en la parte superior en donde existen valores de velocidad entre 39 a 44 m/s.

Figura 3-11. Contornos de velocidad en plano medio (vehículo original).

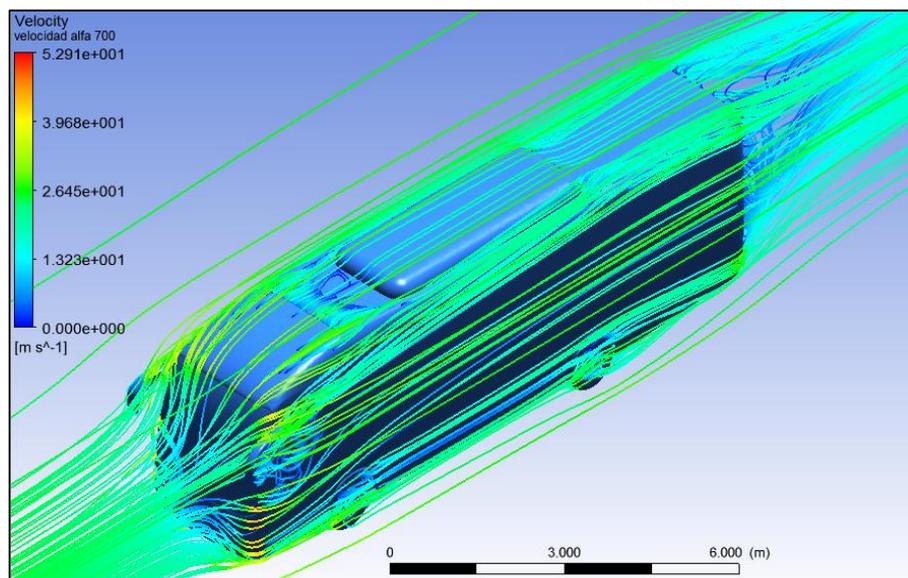


Fuente: Autores (Fines académicos).

3.8.2.1. Líneas de velocidad del aire en 3D

En la fig. 3-12 se visualizan las líneas de velocidad del aire y su comportamiento alrededor del modelo, se puede apreciar que en las partes que presenta redondeos pronunciados es donde hay mayor velocidad (líneas de color rojo) con un valor de 52.91 m/s debido a que el flujo del aire permanece pegado a la forma de carrocería aspecto importante para considerar un modelo aerodinámico.

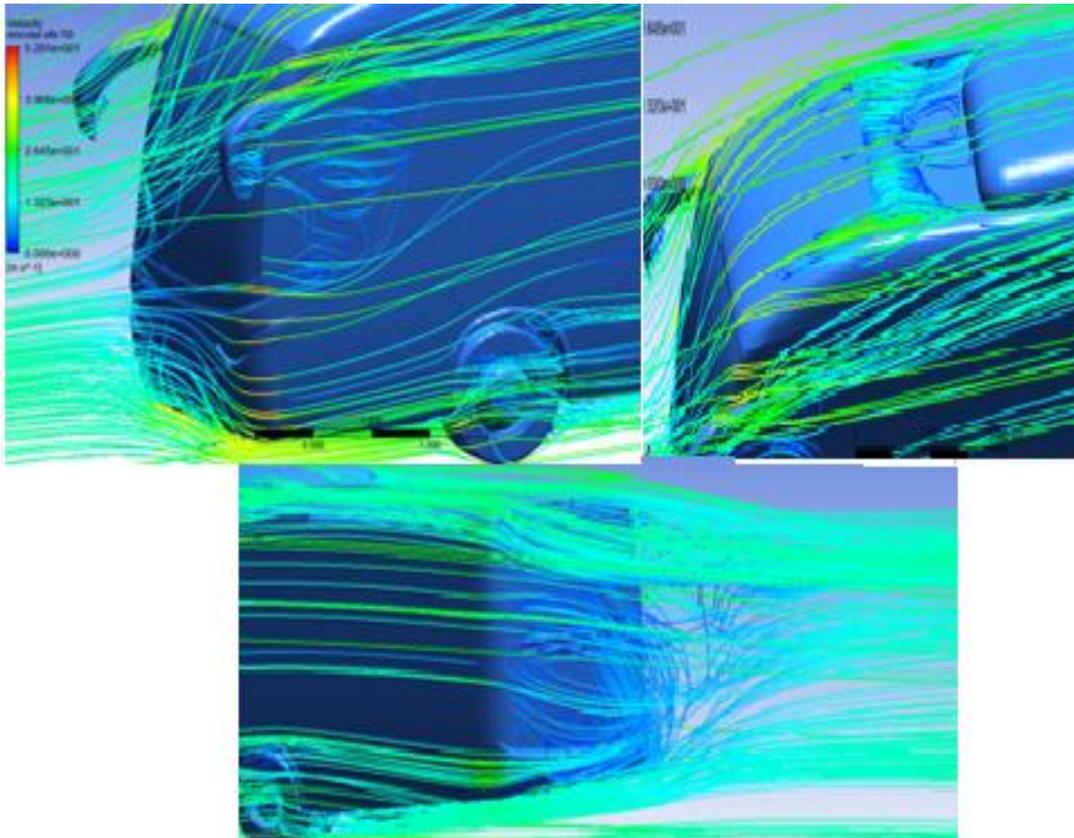
Figura 3-12. Líneas de velocidad 3D (Vehículo original).



Fuente: Autores (Fines académicos).

En la fig. 3-13 se visualiza que la trayectoria del flujo de aire, no es uniforme detrás de los retrovisores, en los laterales frontales, neumáticos, parte superior y parte posterior debido a cambios bruscos en la geometría, estos aspectos son considerados para mejorar la aerodinámica del vehículo.

Figura 3-13. Líneas de velocidad 3D (Vehículo original).

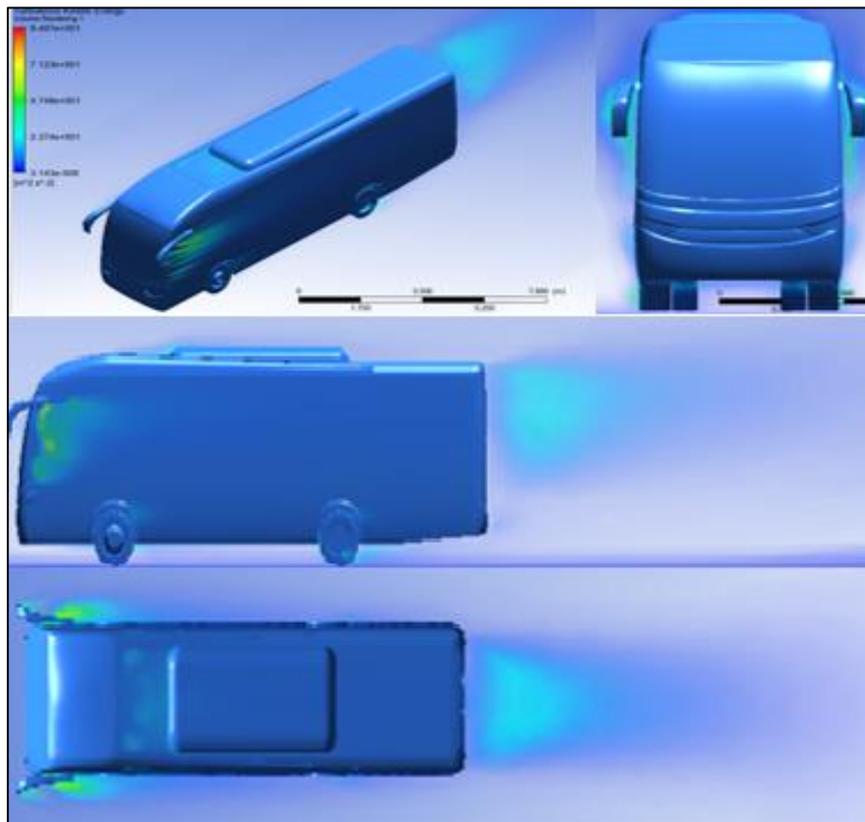


Fuente: Autores (Fines académicos).

3.8.3. Turbulencia cinética

En concordancia con la trayectoria del flujo de aire se puede visualizar en la fig. 3-14 las zonas donde se produce turbulencia estas se genera debido a que la trayectoria del flujo de aire es inestable razón por la cual genera remolinos, claramente se observa que la zona que presenta mayor turbulencia de 94.97 m/s es en la parte frontal lateral y también en la parte posterior.

Figura 3-14. Turbulencia cinética 3D (Vehículo original).



Fuente: Autores (Fines académicos)

CAPÍTULO IV

4. PROPUESTA DEL REDISEÑO AERODINÁMICO DEL VEHÍCULO INTERPROVINCIAL ALFA-700

4.1. Consideraciones para el rediseño del vehículo interprovincial Alfa-700

En base a los resultados obtenidos del modelo original y acorde a los resultados de investigaciones previas tales como “Computational investigation of aerodynamic characteristics and drag reduction of a bus model” realizado por Eyad Amen Mohamed, Muhammad Naeem Radhwi, Ahmed Farouk Abdel Gawad, “AERODYNAMICS OF INTERCITY BUS AND ITS IMPACT ON CO2 REDUCTIONS” realizado por Mr. Aniket Bhave and Dr. Hessem Taherian y “Effect of Aerodynamic Forces over the Bus Body and Design of Conceptual Bus for Enhanced Performance” realizado por Mandar Gophane, Gauri Salvi, Gandhi Pratik Pradeep, Dr. Ravi. K.

En estas investigaciones los aspectos fundamentales para mejorar la aerodinámica del bus son las siguientes:

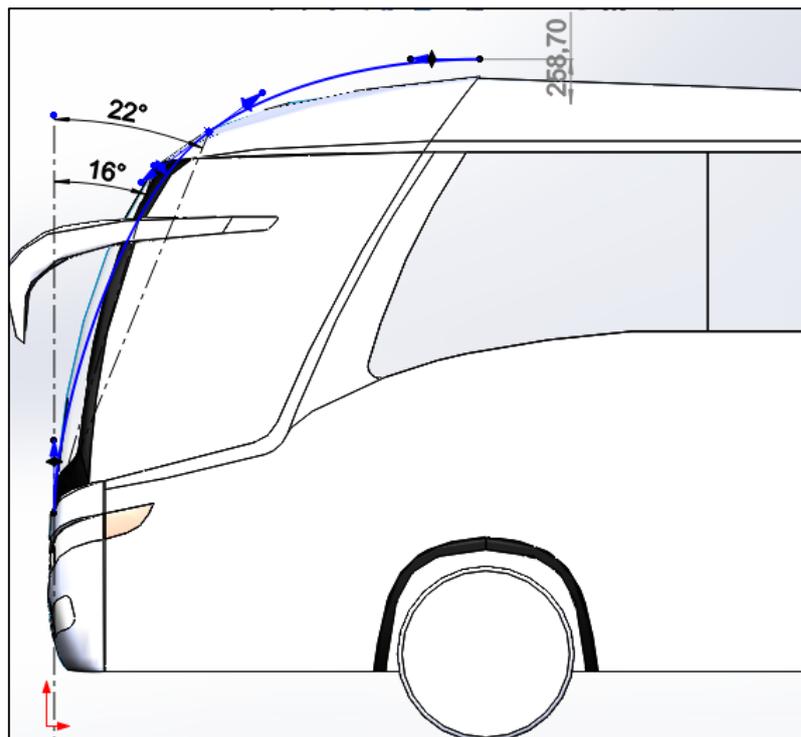
- Disminuir el área proyectada
- Disminuir turbulencias
- Aumentar el ángulo de inclinación del parabrisas.
- Realizar redondeos pronunciados en el frente y posterior
- Disminuir la estela generada por el aire detrás del bus.
- Mantener pegando el flujo del aire a la carrocería.
- Disminuir presión estática en el frente
- Mayor ángulo de salida.
- Trayectoria de la velocidad uniforme

4.2. Modificación del vehículo interprovincial Alfa-700

4.2.1. Modificación frontal

En base a las consideraciones anteriormente mencionadas y manteniendo un aspecto estético se procede a modificar el frente del modelo original, toda la parte central se mantiene igual debido a que es una propuesta aplicativa. En la parte frontal se incrementa el ángulo de inclinación del parabrisas de 16 a 22° con respecto al eje Y además se incrementa la altura aproximadamente a 260mm con respecto del techo como se muestra en la fig. 4-1 para evitar que el aire choque directamente con el sistema de calefacción con esto logramos que el flujo del aire pase sobre este y disminuimos la generación de turbulencia, además se considera redondeos más pronunciados en la parte frontal para reducir los valores de presión y eliminar la turbulencia que presenta en los laterales del modelo original, para mayor detalle de las modificaciones dirigirse al plano técnico.

Figura 4-1. Ángulo de inclinación del parabrisas (prototipo).

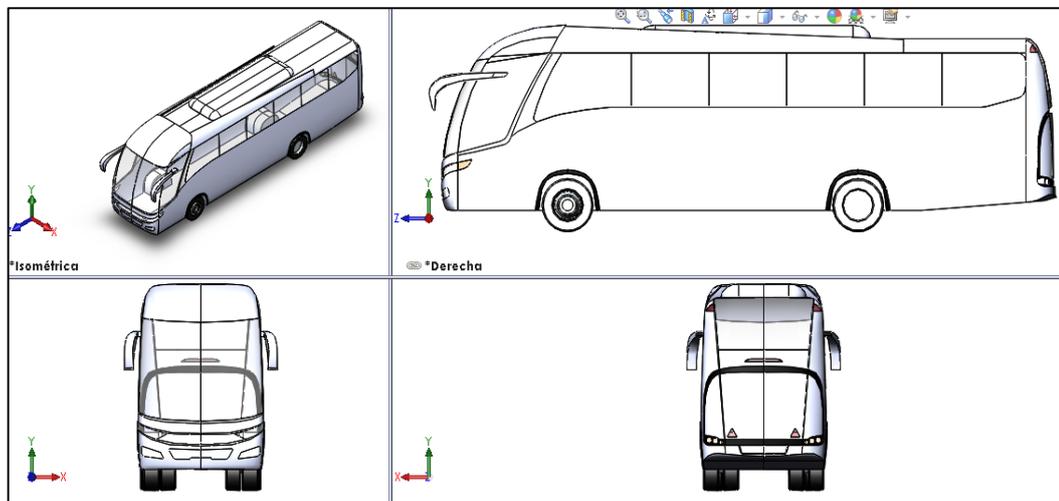


Fuente: Autores (Fines académicos).

4.2.2. Modificación posterior

Para este caso se modificó toda la parte posterior en base a las consideraciones anteriores, se tomó como recomendación los redondeos pronunciados los cuales fueron aplicados en los laterales así mismo para reducir la estela se realiza un redondeo en la parte superior con esto se logra que el flujo de aire se mantenga unido a la carrocería todas estas modificaciones son en base a parámetros de las investigaciones aerodinámicas anteriores y también desde la perspectiva estética, el prototipo propuesto se muestra en la fig. 4-2, dirigirse al plano técnico para mayor detalle.

Figura 4-2. Prototipo propuesto en Software CAD.



Fuente: Autores (Fines académicos).

Figura 4-3. Prototipo propuesto renderizado.



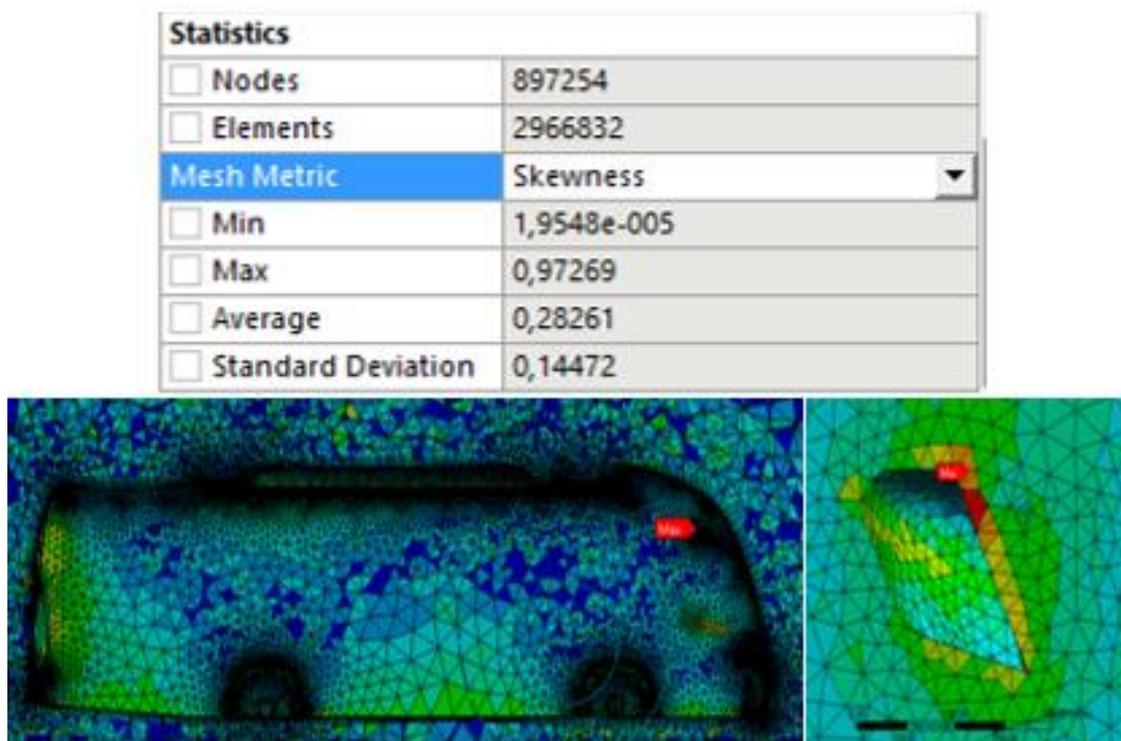
Fuente: Autores (Fines académicos).

4.3. Análisis del rediseño del vehículo interprovincial Alfa-700

Una vez obtenido el modelo prototipo se realiza el mismo procedimiento de análisis aerodinámico anteriormente realizado, donde se verifica la calidad de malla con el propósito que los resultados no presenten inconvenientes.

En este caso con el criterio de Skewness se tiene un valor máximo de 0.9727 que se encuentra en el lateral derecho, punto donde inicia el retrovisor ver la fig. 4-4, no presenta inconveniente para el análisis, su promedio en calidad de malla es de 0.28261 indicando que se trata de una muy buena malla.

Figura 4-4. Criterio de calidad de malla Skewness (prototipo).

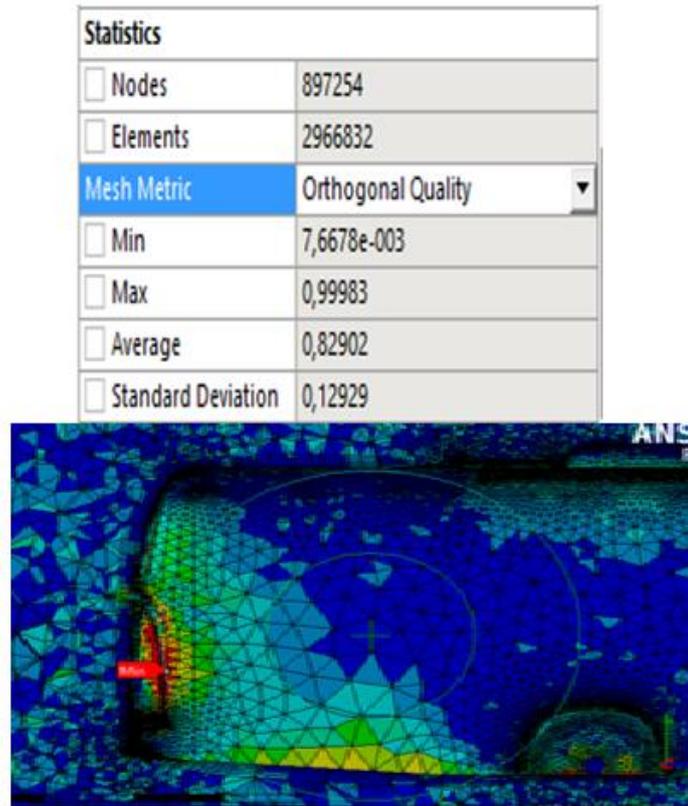


Fuente: Autores (Fines académicos).

Con el criterio de Orthogonal Quality se obtiene un mínimo de 0.007 localizado en la parte del respaldo debido a que el detalle en esa zona posee un ángulo pronunciado, sin embargo, bajo este criterio se obtiene un promedio de 0.829 siendo una malla muy buena.

Bajo estos criterios la calidad de malla es validada, la cual consta con 897254 nodos y 2966832 elementos, ver la fig. 4-5.

Figura 4-5. Criterio de calidad de malla Orthogonal Quality (prototipo).



Fuente: Autores (Fines académicos).

Se mantiene el mismo procedimiento que en el caso anterior cuyos parámetros iniciales se muestran en la tabla 4-1. De la misma manera se analiza con 200 iteraciones.

Tabla 4-1. Parámetros iniciales para el análisis MEF del prototipo.

Análisis aerodinámico		
Parámetro	Cantidad	Unidad
Densidad	0,86060	$\frac{Kg}{m^3}$
Viscosidad	1.7894e-05	$\frac{Kg}{m * s}$
Velocidad	25	$\frac{m}{s}$
Temperatura	293.15	$^{\circ}K$
Área proyectada	9.32083	m^2
Longitud	12.14	m

Fuente: Autores.

4.4. Análisis de resultados

En este apartado se analiza el comportamiento del vehículo interprovincial Alfa-700 original y la propuesta del prototipo a 90Km/h (25m/s) y 120 km (33.33 m/s) cada uno.

4.4.1. Contornos de presión estática

Cuando el modelo original está a 90 Km/h el valor de presión máxima es de 336.298 Pa y del prototipo de 333.621, a una velocidad de 120 km/h una presión de 597.435 Pa y 592.745 Pa.

La modificación del frente ayuda a disminuir la presión máxima, en este caso lo más importante es apreciar que en el prototipo la distribución de colores indica presiones bajas con valores entre -2147 a -1324 Pa a una velocidad de 90 Km/h y valores entre -1873 a -1598 Pa a 120 Km/h ubicados en los laterales del frente, de la misma manera en la parte superior los valores de presión son inferiores al modelo original al estar representado con un color verde con valores entre -741 a -280 Pa a 90 Km/h y a 1050 a -500 Pa a 120 Km/h. además se evidencia claramente que la presión va disminuyendo conforme sigue la geometría de la carrocería, ver tabla 4-2.

Tabla 4-2. Comparación de contornos de presión estática (frente) a 90 y 120 km/h.

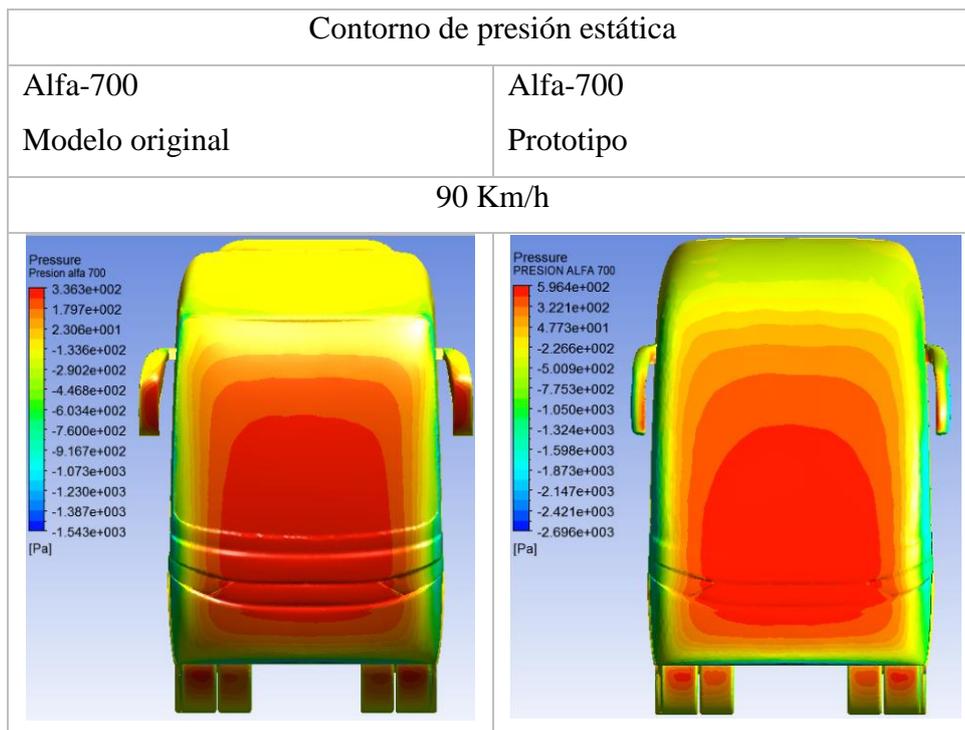
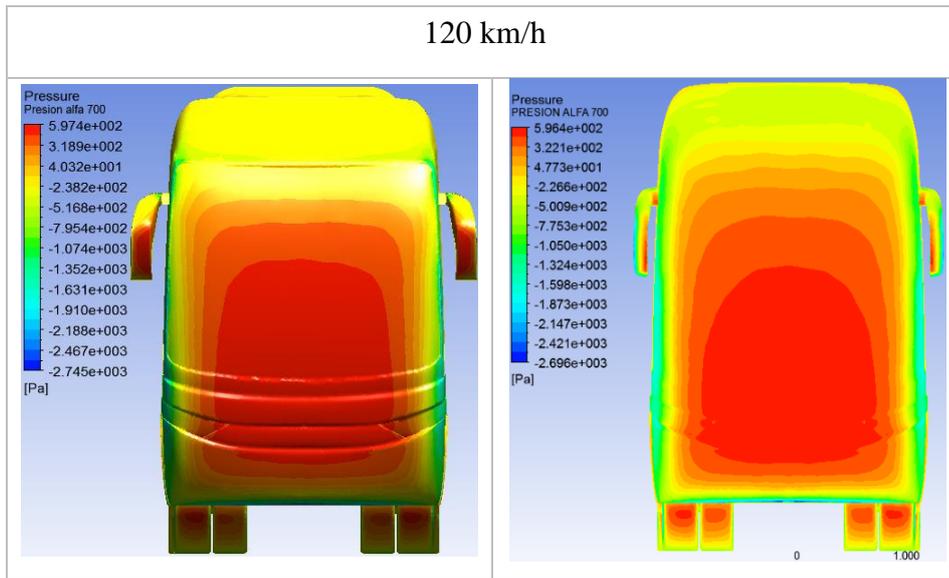


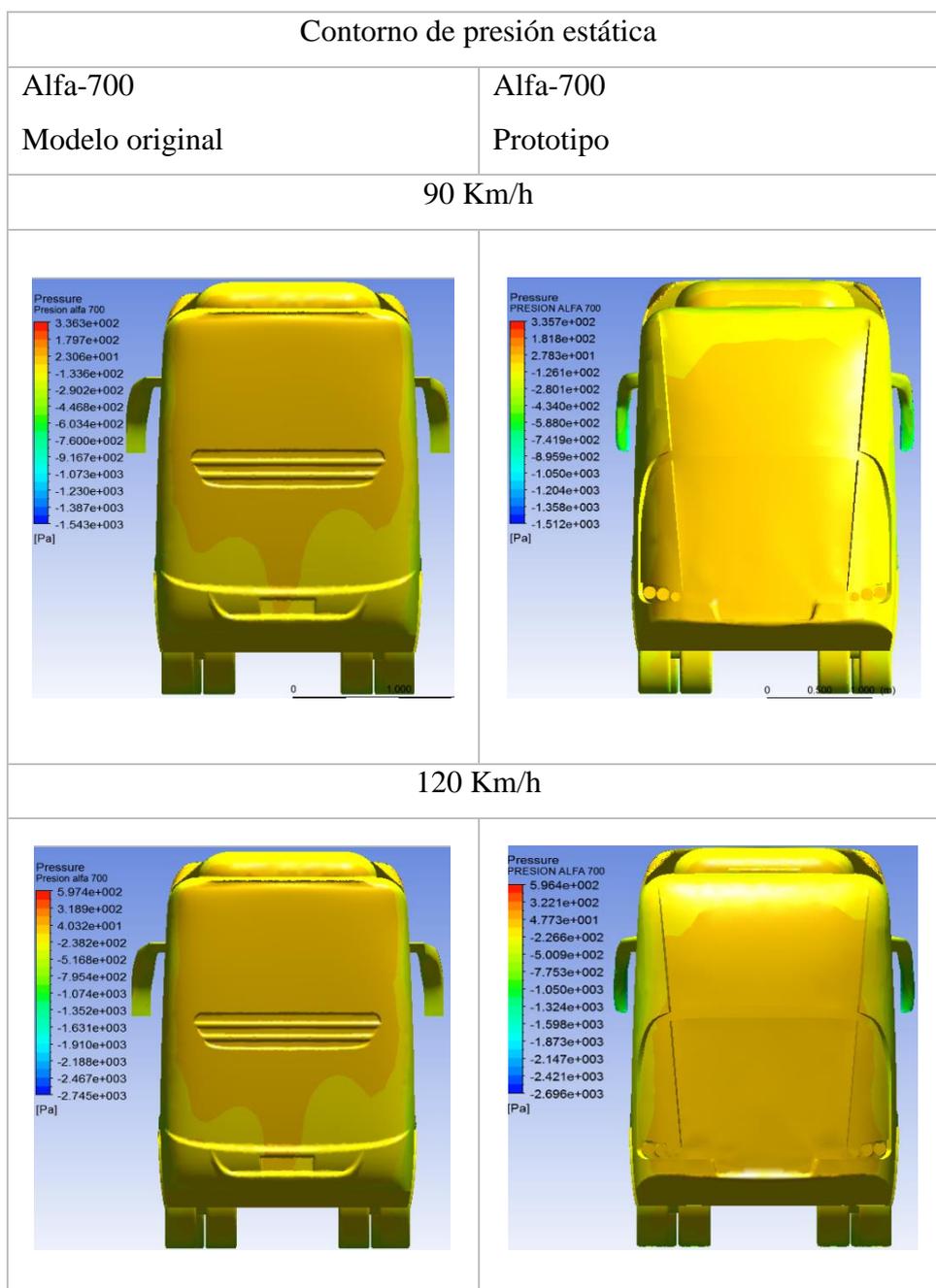
Tabla 4-2. (Continuación). Comparación de contornos de presión estática (frente) a 90 y 120 km/h.



Fuente: Autores (Fines académicos).

En la parte posterior presenta un disminución de presión en los laterales y superior con valores entre -741 a -280 Pa a 90 Km/h y -1324 a -500 Pa a 120Km/h esto se debe a que la velocidad en estas zonas se incrementa resultando beneficioso desde el punto aerodinámico, ver tabla 4-3.

Tabla 4-3. Comparación de contornos de presión estática (posterior) a 90 y 120 km/h.

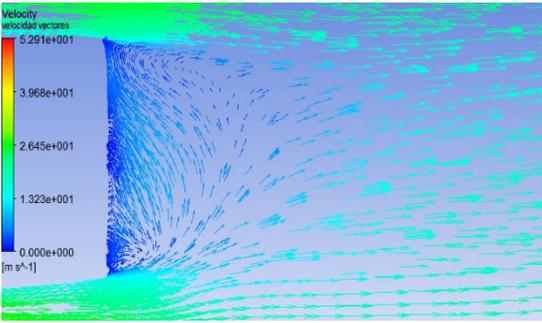
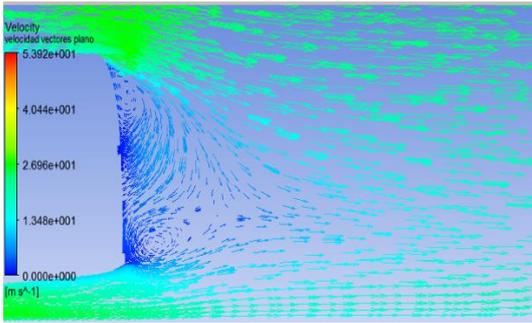
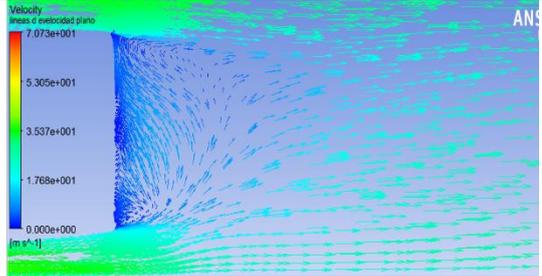
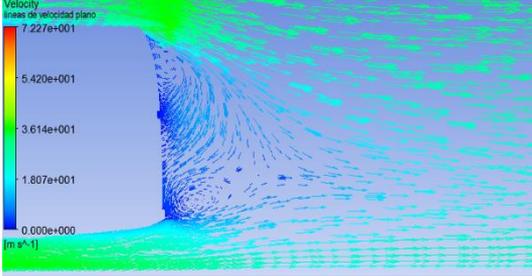


Fuente: Autores (Fines académicos).

4.4.2. Estela en la parte posterior del vehículo

En la tabla 4-4, se observa la trayectoria del aire en la parte posterior del modelo original y prototipo, en donde se visualiza como en el prototipo el flujo de aire tiene dirigirse hacia el suelo disminuyendo así la estela en comparación al modelo original.

Tabla 4-4. Flujo de aire (posterior) a 90 y 120 km/h.

Contorno de presión estática	
Alfa-700	Alfa-700
Modelo original	Prototipo
90 Km/h	
	
120 Km/h	
	

Fuente: Autores (Fines académicos).

4.4.3. Turbulencia cinética

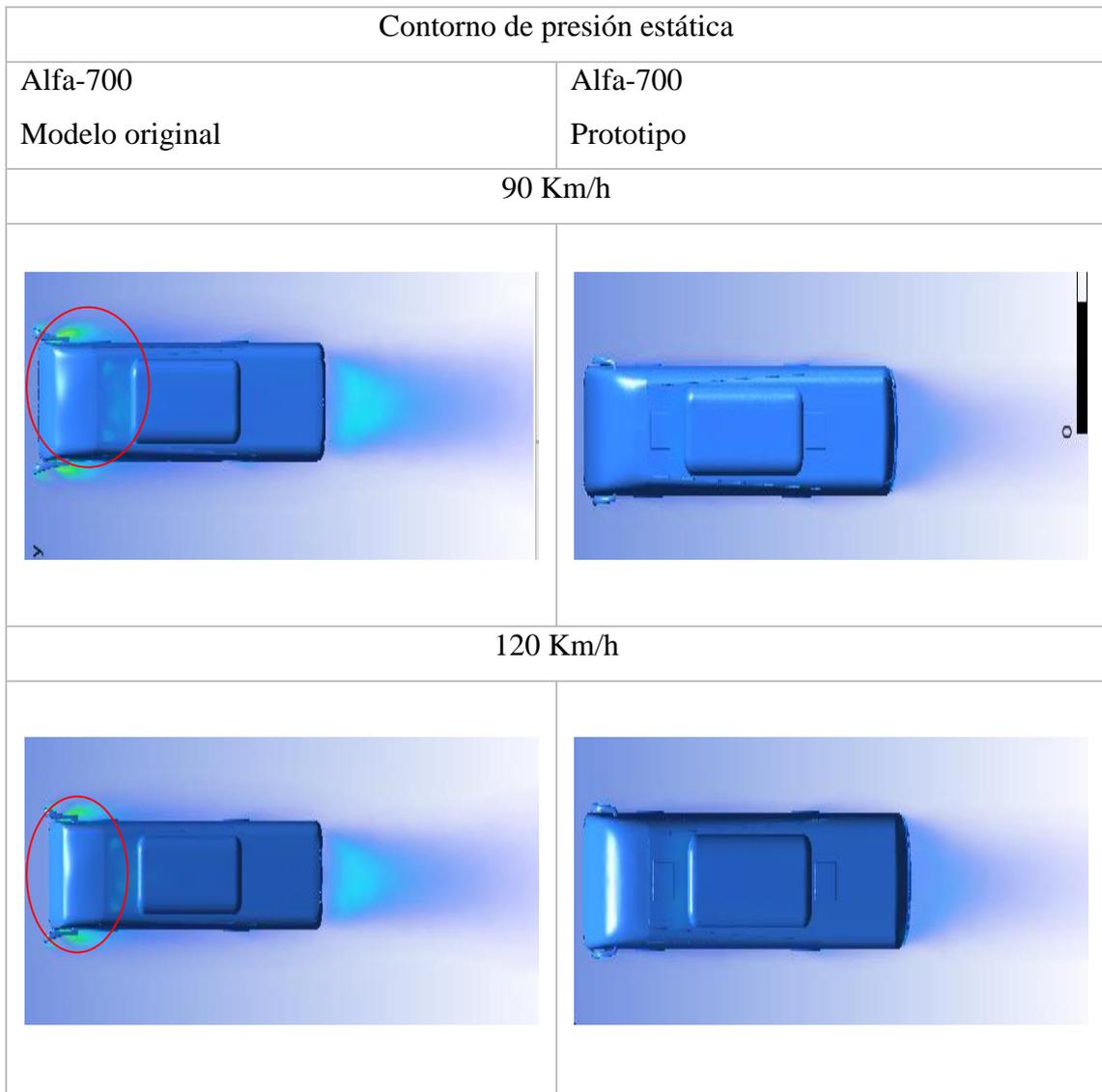
En la tabla 4-5, se aprecia que en el prototipo se elimina totalmente la turbulencia en los laterales de la parte frontal mientras que en el posterior se genera una turbulencia en la parte inferior contrario al modelo original ya que esto se observa en la parte superior, claramente la estela del aire disminuye como se muestra en la tabla 4-6, este aspecto será analizado con el coeficiente de arrastre para verificar si afecta o mejora la aerodinámica del modelo.

Tabla 4-5. Turbulencia cinética a 90 y 120 km/h – Vista lateral.

Contorno de presión estática	
Alfa-700 Modelo original	Alfa-700 Prototipo
90 Km/h	
120 Km/h	

Fuente: Autores (Fines académicos).

Tabla 4-6. Turbulencia cinética a 90 y 120 km/h – Vista Superior.

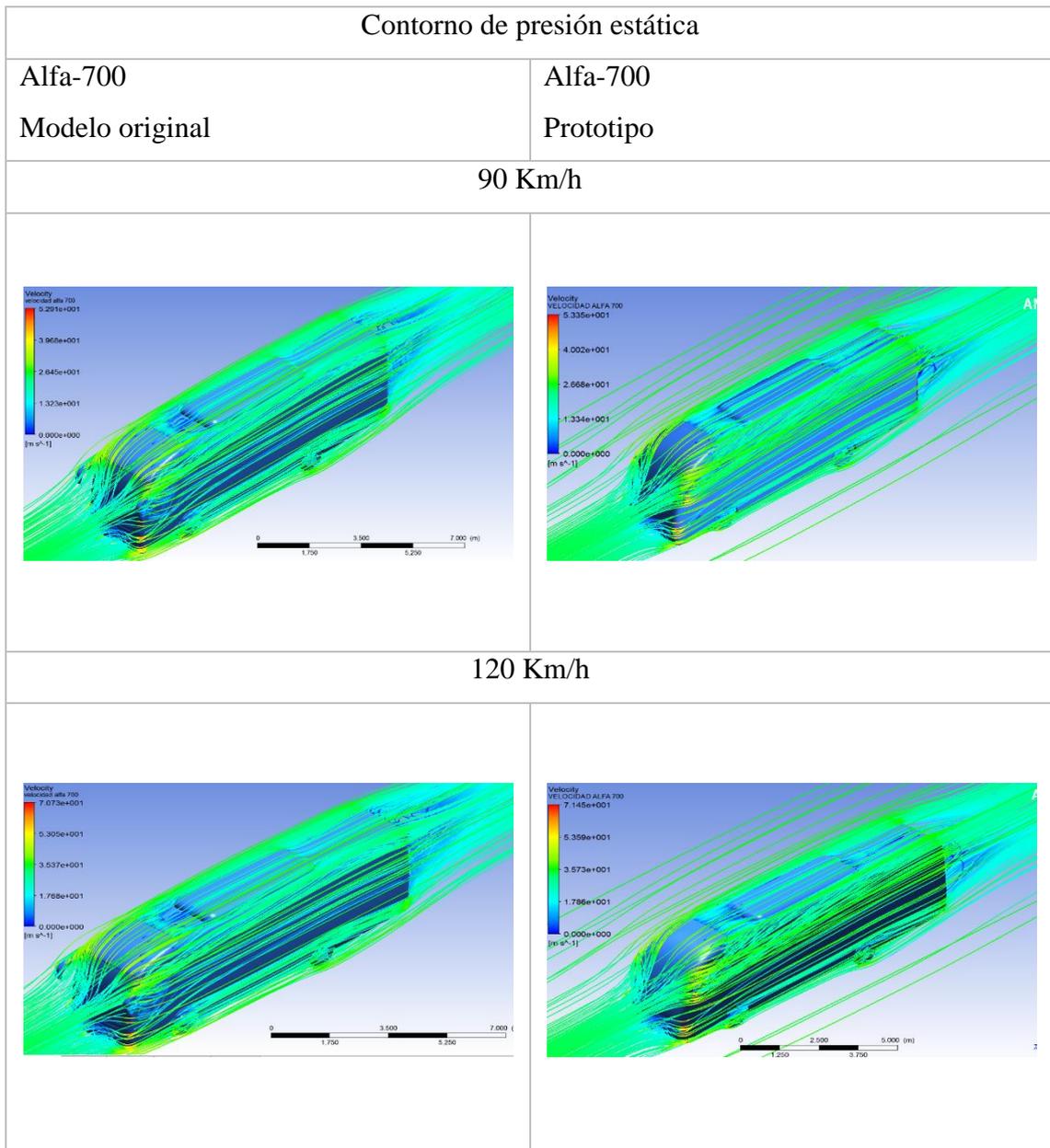


Fuente: Autores (Fines académicos).

4.4.3.1. Líneas de velocidad del aire

Estas líneas están relacionadas directamente con la turbulencia generada ya que indican una trayectoria no uniforme como se puede visualizar en las tablas 4-7, 4-8, 4-9.

Tabla 4-7. Turbulencia cinética a 90 y 120 km/h.



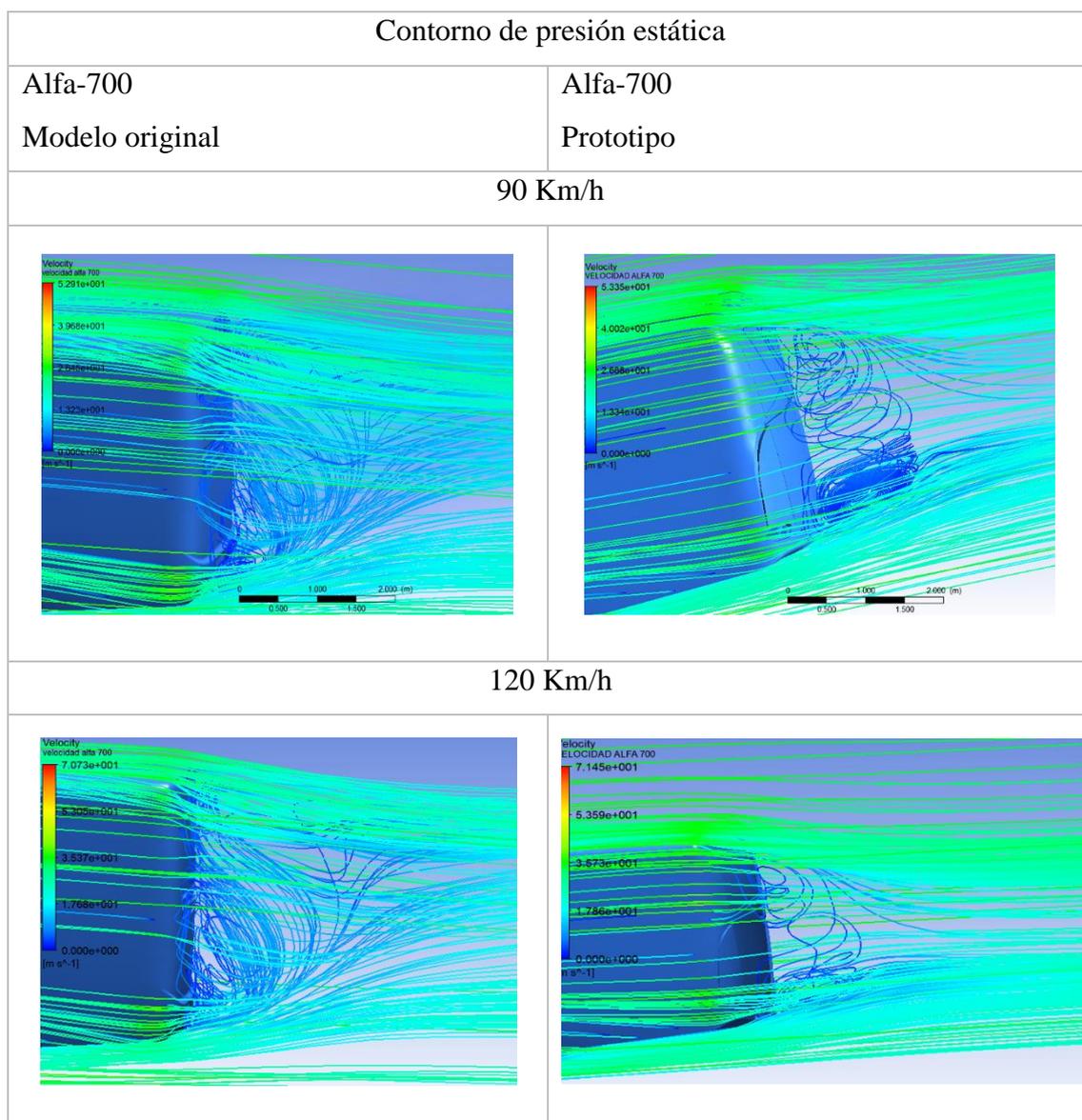
Fuente: Autores (Fines académicos).

Tabla 4-8. Turbulencia cinética frente a 90 y 120 km/h.

Contorno de presión estática	
Alfa-700 Modelo original	Alfa-700 Prototipo
90 Km/h	
120 Km/h	

Fuente: Autores (Fines académicos).

Tabla 4-9. Turbulencia cinética Posterior a 90 y 120 km/h.



Fuente: Autores (Fines académicos).

Con las interpretaciones anteriores se procede a evaluar los valores de C_d , C_l , Fuerza en Z, Fuerza en Y y fineza de los modelos a sus diversas velocidades ver tabla 4-10, en donde el prototipo propuesto mejora aerodinámicamente ya que el coeficiente de arrastre (C_d) disminuye de 0.47 a 0.41 con una velocidad de 90 Km/h.

Por otra parte para el análisis realizado para los 120 Km/h se puede visualizar una disminución en el coeficiente de arrastre igual a la anterior.

Los resultados obtenidos mediante el análisis en Software son únicamente de uso académico, está completamente prohibido el uso del presente documento para la validación de modelos de carrocerías por empresas externas con fines comerciales.

Tabla 4-10. Resultados aerodinámicos de los dos modelos de vehículos Alfa-700.

Resultados aerodinámicos							
Modelo	Velocidad (km/h)	Área proyectada (m ²)	Cd	Cl	Fuerza Z (N)	Fuerza Y (N)	Fineza
Alfa-700 Original	90	9.360	0,47	0,3	1319	-839	0.63
Alfa-700 Prototipo	90	9.328	0,41	0,22	1173	-607	0.53
Alfa-700 Original	120	9.360	0,47	0,3	2345	-1494	0.63
Alfa-700 Prototipo	120	9.328	0,41	0,22	2082	- 1079	0.53

Fuente: Autores (Fines académicos).

CAPÍTULO V

5. IMPRESIÓN 3D DE LOS VEHÍCULOS ALFA-700 A ESCALA

5.1. Impresión 3D

La impresión 3D (también llamada fabricación por adición) es el proceso de fabricar un objeto sólido tridimensional de casi cualquier forma a partir de un modelo digital computarizado. La impresión 3D se logra usando un procedimiento de adición en el que capas sucesivas de un material se depositan en formas diferentes. Esto la hace diferente a otras técnicas de fabricación que normalmente proceden por remoción de materiales por recortado o perforado (procesos de sustracción) (FONDA, 2013).

5.1.1. Material

El material que se utilizó para realizar la impresión 3D de los prototipos es el PLA (Poliláctida), el cual es un filamento muy común fabricado con ácido poliláctico, el mismo que es un plástico biodegradable derivado del almidón, al momento de imprimir no desprende malos olores y los gases que produce el material no son tóxicos, contribuyendo así con la reducción de la contaminación ambiental.

5.1.2. Procedimiento para imprimir los prototipos 3D

Se creó un modelo en 3D, utilizando SolidWorks para el diseño de los dos prototipos de vehículos ver la fig. 5-1, ya que este software cuenta con una barra de tareas de fácil acceso.

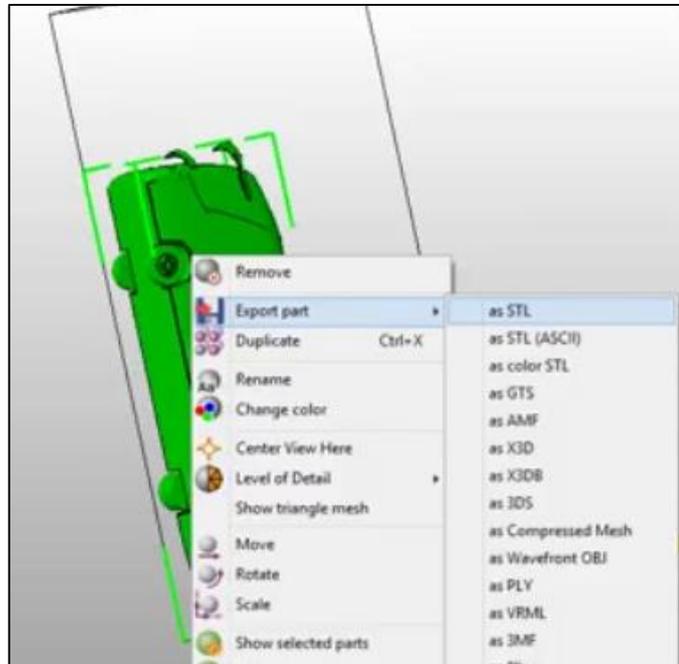
Figura 5-1. Prototipo en Software CAD.



Fuente: Autores.

Luego se generó un archivo en formato .STL que presta las mejores condiciones para la comunicación entre computadora personal-impresora 3D, ver la fig. 5-2.

Figura 5-2. Diseño del prototipo a formato .STL



Fuente: Autores.

Se configuró la impresora mediante una lista de instrucciones a través de una conexión por cable de una computadora personal, ver fig. 5-3.

Material: PLA

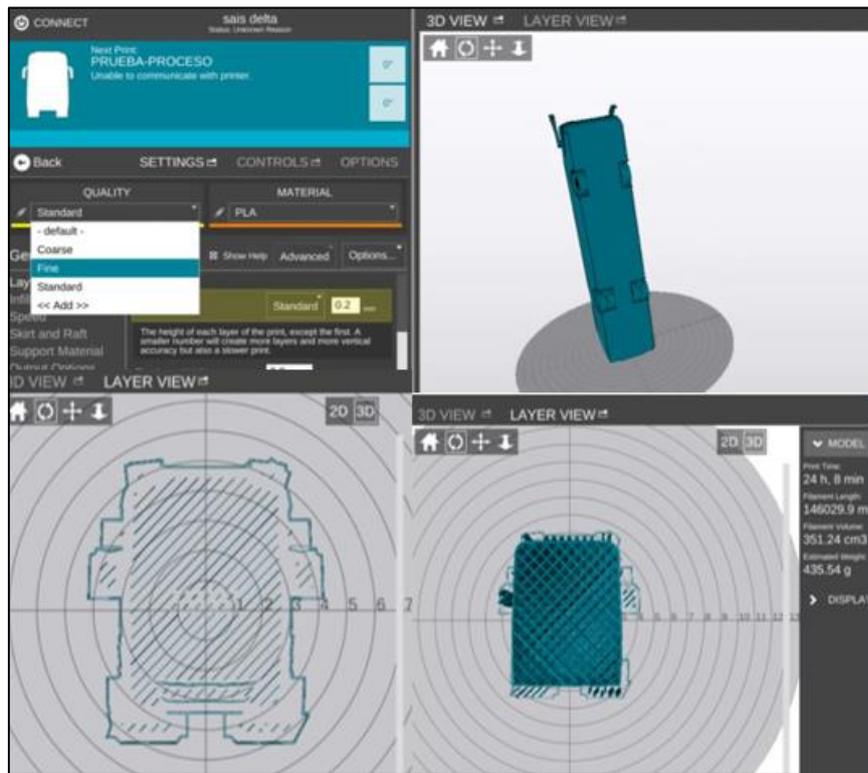
Calidad: Fina

Tipo de Relleno: Cuadrícula

Velocidad de relleno: 70 mm/s

Altura de la capa: 0.2 mm

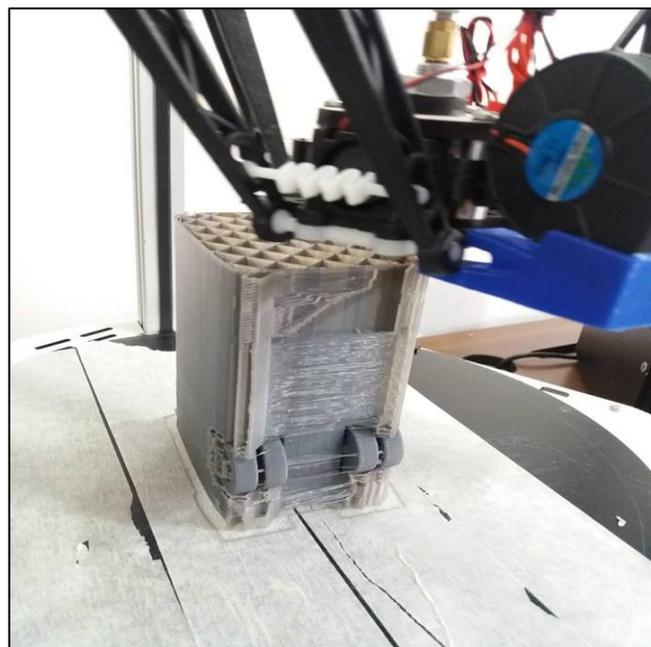
Figura 5-3. Instrucciones en Layer View.



Fuente: Autores.

Se realizó las impresiones de los prototipos.

Figura 5-4. Impresión del prototipo al 50 %.



Fuente: Autores.

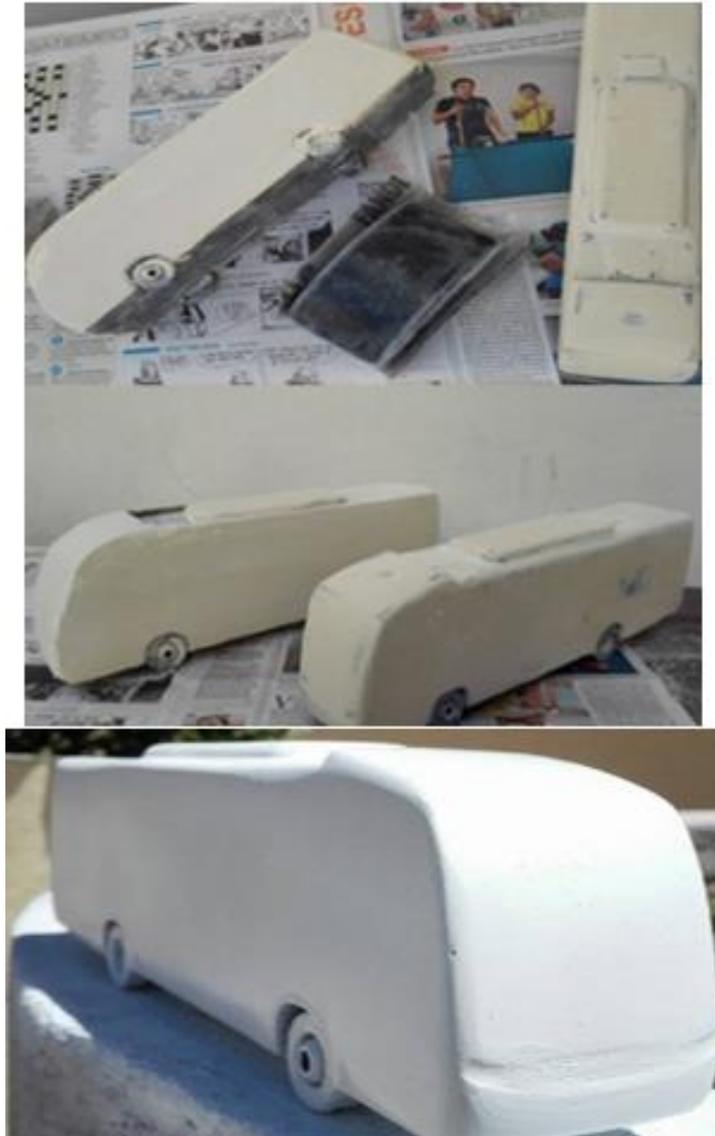
Figura 5-5. Impresión del prototipo al 100 %.



Fuente: Autores.

Se realizó un proceso de masillado y lijado a los prototipos para tener un mejor acabado ver la fig. 5-6, puesto que la impresión en 3D deja un acabado superficial defectuoso. La finalidad fue que se pueda aplicar pintura de esmalte sobre la superficie total en los dos prototipos a escala.

Figura 5-6. Masillado de los prototipos.



Fuente: Autores.

Se realizó un proceso de pintado y detallado de los prototipos.

Figura 5-7. Prototipos finales.



Fuente: Autores.

5.2. Pruebas de los prototipos con generación de humo

Se construyó una cámara de vidrio de dimensiones 10.6 cm x16cm x 60cm y se colocó canalizaciones redondas alargadas para que el flujo de humo generado con una cámara de humo sea uniformemente y laminar alrededor de los prototipos.

Éste tipo de ensayo se lo realiza para observar cómo se genera la capa límite en la superficie de los prototipos y que dirección toma el flujo de humo.

5.2.1. Pruebas en el prototipo Alfa-700

Al generar humo, mediante un ventilador y canalizaciones se crea el flujo laminar y se observa que se crea turbulencia en la parte frontal del vehículo, generando así un exceso de presión y debilitamiento de la carrocería.

Figura 5-8. Turbulencia de aire generada en la parte frontal.



Fuente: Autores.

En la parte posterior se crea una estela de aire muy alejada del vehículo lo que provoca que este pierda potencia cuando circule a altas velocidades.

Figura 5-9. Estela de aire generado en el Vehículo Alfa 700.



Fuente: Autores.

5.2.2. Pruebas en el prototipo modificado

En el prototipo modificado se puede observar claramente que la turbulencia frontal desaparece completamente ya que el diseño es más aerodinámico y hace que la capa límite esté muy próxima a la superficie de la carrocería.

Figura 5-10. Flujo de humo generado en la parte frontal.



Fuente: Autores.

En la parte superior del vehículo se observa también que el humo generado está muy cercano a la carrocería fluyendo sin ningún tipo de turbulencias y generando la capa límite.

En la parte posterior se genera una estela de viento pequeña muy cercana al respaldo de la carrocería, la cual ayuda a impulsar al vehículo y se aprovecha de manera más eficiente el consumo de combustible.

Figura 5-11. Estela de aire generado en el Vehículo Alfa 700 modificado.



Fuente: Autores.

5.3. Pruebas Aerodinámicas en el túnel de viento

Una vez impresos los prototipos se realizan pruebas aerodinámicas de los vehículos a escala en el túnel de viento con el fin de hallar las fuerzas de resistencia y de carga, las dos expresadas en Newton, de la prueba se recogió datos a diferentes velocidades para analizar de una manera más detallada el coeficiente de sustentación y de arrastre. En este

ensayo se comprueba que los resultados obtenidos en el software CAE mediante el uso de elementos finitos (MEF) son semejantes a los resultados que se obtienen de manera real en la simulación con prototipos del autobús Alfa-700 a escala, mediante la utilización del túnel de viento del laboratorio de Aerodinámica de la ESPOCH.

Figura 5-12. Túnel de viento de la ESPOCH.



Fuente: Autores.

Los datos para los cálculos se obtuvieron de la siguiente manera:

- El área frontal de los prototipos a escala fue medida cuidadosamente con la utilización de un instrumento de precisión, el calibrador pie de rey.
- Los datos para el cálculo de la densidad se obtuvo midiendo las condiciones ambientales del lugar de pruebas mediante un anemómetro perteneciente al laboratorio de aerodinámica, en el que se midió presión y temperatura. El valor de incertidumbre nos proporciona el anemómetro ya que tiene un error del 3%.

Cálculo de la densidad de aire en Riobamba:

$$\delta = \frac{P}{RT} \quad (12)$$

Donde:

δ : Densidad del aire.

P: Presión atmosférica en Riobamba (72381 Pa).

R: Constante universal de los gases (aire).

T: Temperatura ambiente (293,15 °K).

$$\delta = \frac{72381 \text{ N/m}^2}{286,9 \text{ Nm/kg}^\circ\text{k} * 293,15^\circ\text{k}}$$
$$\delta = 0,8606 \text{ kg/m}^3$$

- La velocidad del fluido en el túnel de viento también fue medido y calibrado por el anemómetro a diferentes velocidades requeridas para el análisis.

Figura 5-13. Anemómetro digital de la ESPOCH.



Fuente: Autores.

- La fuerza de arrastre o resistencia (D) y fuerza de sustentación o carga (L) son proporcionados por el panel digital del túnel de viento a diferentes velocidades del fluido según corresponda. Cabe recalcar que el túnel de viento fue encendido con los valores negativos de carga igual a 0,1 N y la resistencia igual a 0,08 N, estos valores se sumaran a los valores arrojados por el panel digital del túnel de viento.

Figura 5-14. Valores de encendido del túnel de viento.



Fuente: Autores.

El método de comprobación entre la simulación mediante MEF y la simulación real es muy sencilla, se trata de obtener los mismos coeficientes, de sustentación y arrastre, ya que el túnel de viento no proporciona estos valores, tendrán que ser calculados y deber ser valores semejantes a los obtenidos en el software tomando en cuenta las mismas consideraciones de factores externos.

Con las consideraciones anteriores tenemos los siguientes datos para los cálculos:

$$\delta = \text{Densidad} = 0,8606 \text{ kg/m}^3$$

Área frontal del cuerpo perpendicular a la corriente, diseño original (A_1) y prototipo (A_2).

$$A_1 = 0,00504 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 0,00522 \text{ m}^2$$

Las velocidades y fuerzas se especifican en cada cálculo.

5.3.1. Cálculos del diseño original

Figura 5-15. Datos obtenidos a 65km/h (diseño original).



Fuente: Autores.

Datos:

$$\delta = 0,8606 \text{ kg/m}^3$$

$$A_1 = 0,00504 \text{ m}^2$$

$$v = 65 \text{ km/h} = 18,056 \text{ m/s}$$

$$D = 0,26 + 0,08 = 0,34 \text{ N}$$

$$L = 0,130 + 0,1 = 0,23 \text{ N}$$

Fuerza de arrastre o resistencia

$$D = \frac{1}{2} \delta v^2 A C_D$$

Coefficiente de arrastre

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \delta v^2 A} \quad (13)$$

$$C_D = \frac{0,34 \text{ N}}{\frac{1}{2} 0,8606 \text{ kg/m}^3 * (18,056 \text{ m/s})^2 * 0,00504 \text{ m}^2}$$

$$C_D = 0,481$$

Fuerza de sustentación o carga

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

Coefficiente de sustentación

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho v^2 A} \quad (14)$$

$$C_L = \frac{0,23N}{\frac{1}{2} 0,8606 \text{ kg/m}^3 * (18,056 \text{ m/s})^2 * 0,00504 \text{ m}^2}$$

$$C_L = 0,325$$

Fineza

$$f = \frac{L}{D} \quad (15)$$

$$f = \frac{0,23N}{0,34N}$$

$$f = 0,676$$

Figura 5-16. Datos obtenidos a 70 km/h (diseño original).



Fuente: Autores.

Datos:

$$\rho = 0,8606 \text{ kg/m}^3$$

$$A_1 = 0,00504 \text{ m}^2$$

$$v = 70 \text{ km/h} = 19,444 \text{ m/s}$$

$$D = 0,32 + 0,08 = 0,4N$$

$$L = 0,150 + 0,1 = 0,25N$$

Fuerza de arrastre o resistencia

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

Coefficiente de arrastre

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho v^2 A} \quad (16)$$

$$C_D = \frac{0,40N}{\frac{1}{2} 0,8606 \text{ kg/m}^3 * (19,444 \text{ m/s})^2 * 0,00504 \text{ m}^2}$$

$$C_D = 0,488$$

Fuerza de sustentación o carga

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

Coefficiente de sustentación

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho v^2 A} \quad (17)$$

$$C_L = \frac{0,25N}{\frac{1}{2} 0,8606 \text{ kg/m}^3 * (19,444 \text{ m/s})^2 * 0,00504 \text{ m}^2}$$

$$C_L = 0,305$$

Fineza

$$f = \frac{L}{D} \quad (18)$$

$$f = \frac{0,25N}{0,40N}$$

$$f = 0,625$$

Figura 5-17. Datos obtenidos a 90 km/h (diseño original).



Fuente: Autores.

Datos:

$$\delta = 0,8606 \text{ kg/m}^3$$

$$A_1 = 0,00504 \text{ m}^2$$

$$v = 90 \text{ km/h} = 25 \text{ m/s}$$

$$D = 0,56 + 0,08 = 0,64 \text{ N}$$

$$L = 0,330 + 0,1 = 0,43 \text{ N}$$

Fuerza de arrastre o resistencia

$$D = \frac{1}{2} \delta v^2 A C_D$$

Coefficiente de arrastre

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \delta v^2 A} \quad (19)$$

$$C_D = \frac{0,640 \text{ N}}{\frac{1}{2} 0,8606 \text{ kg/m}^3 * (25 \text{ m/s})^2 * 0,00504 \text{ m}^2}$$

$$C_D = 0,472$$

Fuerza de sustentación o carga

$$L = \frac{1}{2} \delta v^2 A C_L$$

Coeficiente de sustentación

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\delta v^2 A} \quad (20)$$

$$C_L = \frac{0,43N}{\frac{1}{2}0,8606 \text{ kg/m}^3 * (25 \text{ m/s})^2 * 0,00504\text{m}^2}$$

$$C_L = 0,317$$

Fineza

$$f = \frac{L}{D} \quad (21)$$

$$f = \frac{0,43N}{0,64N}$$

$$f = 0,671$$

Figura 5-18. Datos obtenidos a 100km/h (diseño original).



Fuente: Autores.

Datos:

$$\delta = 0,8606 \text{ kg/m}^3$$

$$A_1 = 0,00504 \text{ m}^2$$

$$v = 100 \text{ km/h} = 27,778 \text{ m/s}$$

$$D = 0,720 + 0,08 = 0,80N$$

$$L = 0,450 + 0,1 = 0,55N$$

Fuerza de arrastre o resistencia

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

Coefficiente de arrastre

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho v^2 A} \quad (22)$$

$$C_D = \frac{0,80N}{\frac{1}{2} 0,8606 \text{ kg/m}^3 * (27,778 \text{ m/s})^2 * 0,00504 \text{ m}^2}$$

$$C_D = 0,478$$

Fuerza de sustentación o carga

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

Coefficiente de sustentación

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho v^2 A} \quad (23)$$

$$C_L = \frac{0,55N}{\frac{1}{2} 0,8606 \text{ kg/m}^3 * (27,778 \text{ m/s})^2 * 0,00504 \text{ m}^2}$$

$$C_L = 0,328$$

Fineza

$$f = \frac{L}{D} \quad (24)$$

$$f = \frac{0,55N}{0,80N}$$

$$f = 0,68$$

5.3.2. Cálculos del prototipo propuesto

Figura 5-19. Datos obtenidos a 65km/h (diseño aerodinámico).



Fuente: Autores.

Datos:

$$\delta = 0,8606 \text{ kg/m}^3$$

$$A_2 = 0,00522 \text{ m}^2$$

$$v = 65 \text{ km/h} = 18,056 \text{ m/s}$$

$$D = 0,22 + 0,08 = 0,30 \text{ N}$$

$$L = 0,50 + 0,1 = 0,15 \text{ N}$$

Fuerza de arrastre o resistencia

$$D = \frac{1}{2} \delta v^2 A C_D$$

Coefficiente de arrastre

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \delta v^2 A} \quad (25)$$

$$C_D = \frac{0,30 \text{ N}}{\frac{1}{2} 0,8606 \text{ kg/m}^3 * (18,056 \text{ m/s})^2 * 0,00522 \text{ m}^2}$$

$$C_D = 0,409$$

Fuerza de sustentación o carga

$$L = \frac{1}{2} \delta v^2 A C_L$$

Coefficiente de sustentación

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \delta v^2 A} \quad (26)$$

$$C_L = \frac{0,15N}{\frac{1}{2} 0,8606 \text{ kg/m}^3 * (18,056 \text{ m/s})^2 * 0,00522 \text{ m}^2}$$

$$C_L = 0,205$$

Fineza

$$f = \frac{L}{D} \quad (27)$$

$$f = \frac{0,30N}{0,15N}$$

$$f = 0,50$$

Figura 5-20. Datos obtenidos a 70km/h (diseño aerodinámico).



Fuente: Autores.

Datos:

$$\delta = 0,8606 \text{ kg/m}^3$$

$$A_2 = 0,00522 \text{ m}^2$$

$$v = 70 \text{ km/h} = 19,444 \text{ m/s}$$

$$D = 0,28 + 0,08 = 0,36N$$

$$L = 0,10 + 0,10 = 0,20N$$

Fuerza de arrastre o resistencia

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

Coefficiente de arrastre

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho v^2 A} \quad (28)$$

$$C_D = \frac{0,36N}{\frac{1}{2} 0,8606 \text{ kg/m}^3 * (19,444 \text{ m/s})^2 * 0,00522 \text{ m}^2}$$

$$C_D = 0,423$$

Fuerza de sustentación o carga

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

Coefficiente de sustentación

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho v^2 A} \quad (29)$$

$$C_L = \frac{0,20N}{\frac{1}{2} 0,8606 \text{ kg/m}^3 * (19,444 \text{ m/s})^2 * 0,00522 \text{ m}^2}$$

$$C_L = 0,235$$

Fineza

$$f = \frac{L}{D} \quad (30)$$

$$f = \frac{0,36N}{0,20N}$$

$$f = 0,55$$

Figura 5-21. Datos obtenidos a 90km/h (diseño aerodinámico).



Fuente: Autores.

Datos:

$$\delta = 0,8606 \text{ kg/m}^3$$

$$A_2 = 0,00522 \text{ m}^2$$

$$v = 90 \text{ km/h} = 25 \text{ m/s}$$

$$D = 0,5 + 0,08 = 0,58 \text{ N}$$

$$L = 0,20 + 0,10 = 0,30 \text{ N}$$

Fuerza de arrastre o resistencia

$$D = \frac{1}{2} \delta v^2 A C_D$$

Coefficiente de arrastre

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \delta v^2 A} \quad (31)$$

$$C_D = \frac{0,58 \text{ N}}{\frac{1}{2} 0,8606 \text{ kg/m}^3 * (25 \text{ m/s})^2 * 0,00522 \text{ m}^2}$$

$$C_D = 0,413$$

Fuerza de sustentación o carga

$$L = \frac{1}{2} \delta v^2 A C_L$$

Coefficiente de sustentación

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\delta v^2 A} \quad (32)$$
$$C_L = \frac{0,30N}{\frac{1}{2}0,8606 \text{ kg/m}^3 * (25 \text{ m/s})^2 * 0,00522\text{m}^2}$$
$$C_L = 0,214$$

Fineza

$$f = \frac{L}{D} \quad (33)$$
$$f = \frac{0,58N}{0,30N}$$
$$f = 0,517$$

Figura 5-22. Datos obtenidos a 100km/h (diseño aerodinámico).



Fuente: Autores.

Datos:

$$\delta = 0,8606 \text{ kg/m}^3$$

$$A_2 = 0,00522 \text{ m}^2$$

$$v = 100 \text{ km/h} = 27,778 \text{ m/s}$$

$$D = 0,62 + 0,08 = 0,70 \text{ N}$$

$$L = 0,30 + 0,10 = 0,40 \text{ N}$$

Fuerza de arrastre o resistencia

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

Coefficiente de arrastre

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho v^2 A} \quad (34)$$

$$C_D = \frac{0,70N}{\frac{1}{2} 0,8606 \text{ kg/m}^3 * (27,778 \text{ m/s})^2 * 0,00522 \text{ m}^2}$$

$$C_D = 0,404$$

Fuerza de sustentación o carga

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

Coefficiente de sustentación

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho v^2 A} \quad (35)$$

$$C_L = \frac{0,40N}{\frac{1}{2} 0,8606 \text{ kg/m}^3 * (27,778 \text{ m/s})^2 * 0,00522 \text{ m}^2}$$

$$C_L = 0,231$$

Fineza

$$f = \frac{L}{D} \quad (36)$$

$$f = \frac{0,70N}{0,40N} = 0,571$$

5.3.3. Resumen de resultados obtenidos en el túnel de viento

Tabla 5-1. Cálculos del diseño original (túnel de viento).

CÁLCULOS DEL DISEÑO ORIGINAL							
Densidad	Velocidad (m/s)	Área (m ²)	Fuerza de arrastre (D)	Coefficiente de arrastre (Cd)	Fuerza de sustentación	Coefficiente de carga (Cl)	Fineza
0,86	27,78	0,01	0,80	0,48	0,55	0,33	0,69
0,86	25,00	0,01	0,64	0,47	0,43	0,32	0,67
0,86	19,44	0,01	0,40	0,49	0,25	0,30	0,63
0,86	18,06	0,01	0,34	0,48	0,23	0,33	0,68
Promedio				0,48±0,01		0,32±0,015	0,67

Fuente: Autores.

Tabla 5-2. Cálculos del nuevo diseño (túnel de viento).

CÁLCULOS DEL DISEÑO AERODINAMICO							
Densidad	Velocidad (m/s)	Área (m ²)	Fuerza de arrastre (D)	Coefficiente de arrastre (Cd)	Fuerza de sustentación	Coefficiente de carga (Cl)	Fineza
0,86	27,78	0,01	0,70	0,40	0,40	0,23	0,57
0,86	25,00	0,01	0,58	0,41	0,30	0,21	0,52
0,86	19,44	0,01	0,36	0,42	0,20	0,24	0,56
0,86	18,06	0,01	0,30	0,41	0,15	0,20	0,50
Promedio				0,41±0,01		0,22±0,02	0,54

Fuente: Autores.

En la comparación de las tablas se comprueba notablemente la mejora aerodinámica en el nuevo diseño, los coeficientes de resistencia Cd y carga Cl presentan similares valores a los obtenidos mediante la simulación en el Software CAE en los que el coeficiente de resistencia demuestra una reducción de 0,47 en el diseño original a un 0,41 del nuevo diseño, el coeficiente de sustentación también se reduce de 0,32 en el diseño original a un 0,22 del diseño propuesto.

Mediante la simulación aerodinámica en el Software CFD y el análisis real a escala en el túnel de viento se obtuvo valores de los coeficientes de sustentación y arrastre, se confirma que los valores de los cálculos son reales y confiables, lo que demuestra que el nuevo prototipo presenta mejores características aerodinámicas que el actual modelo Alfa-700.

5.3.4. Cálculos de la potencia absorbida

La potencia absorbida se calcula con los datos obtenidos en la simulación a escala real en el software CAE, cuyos datos se encuentran en la Tabla 4-10, para obtener también valores del cálculo reales.

$$Cv = \frac{C_d * A * V^3}{1225} \quad (37)$$

Diseño original

Cálculo a 90km/h

Datos:

Cd=0,47

A=9.360 m²

V=90km/h= 25m/s

$$Cv = \frac{0,47 * 9,360 * (25)^3}{1225}$$

$$C_v = 56,1 Hp$$

Cálculo a 120km/h

Datos:

Cd=0,47

A=9.360 m²

V=120km/h= 33,333m/s

$$Cv = \frac{0,47*9,360*(33,333)^3}{1225} \quad (38)$$

$$Cv = 133 \text{ Hp}$$

Diseño propuesto

Cálculo a 90km/h

Datos:

$$Cd=0,41$$

$$A=9,328 \text{ m}^2$$

$$V=90\text{km/h}= 25\text{m/s}$$

$$Cv = \frac{0,41*9,328*(25)^3}{1225} \quad (39)$$

$$Cv = 48,78 \text{ Hp}$$

Cálculo a 120km/h

Datos:

$$Cd=0,41$$

$$A=9,328 \text{ m}^2$$

$$V=120\text{km/h}= 33,333\text{m/s}$$

$$Cv = \frac{0,41*9,328*(33,333)^3}{1225} \quad (40)$$

$$Cv = 115,6 \text{ Hp}$$

5.3.5. Resumen y comparación de la potencia absorbida por los modelos de autobús.

Tabla 5-3. Resumen y comparación de la potencia absorbida.

Diseño original			
Área (m ²)	Velocidad (m/s)	Coefficiente de arrastre	Potencia absorbida (Hp)
9,36	25,00	0,47	56,11
9,36	33,33	0,47	133,00
Diseño propuesto			
Área (m ²)	Velocidad (m/s)	Coefficiente de arrastre	Potencia absorbida (Hp)
9,33	25,00	0,41	48,78
9,33	33,33	0,41	115,63

Fuente: Autores.

A velocidades de 90km/h aproximadamente, existe una clara diferencia de potencia absorbida por la carga aerodinámica de 7,33 Hp y de 17,37 Hp a velocidades de 120 Km/h, el nuevo diseño de autobús presenta menor carga aerodinámica y esto se ve reflejado en los cálculos de la potencia absorbida.

CAPÍTULO VI

6. ANÁLISIS DE COSTOS DE CONSTRUCCIÓN

6.1. Análisis costo beneficio

El nuevo modelo de carrocería propuesto en el presente trabajo de titulación para Metálicas Pillapa de Pelileo, ha tenido un mejor desarrollo en el ámbito aerodinámico esto se afirma por las pruebas de validación realizadas tanto en el software como con el modelo a escala pero, para que el modelo sea totalmente viable o no, es necesario realizar un análisis de costos que presenten los saldos a favor y en contra de la empresa. Todos los datos mostrados fueron facilitados a los investigadores por directivos de la empresa para convertir el análisis en algo más verídico y apegado a la realidad financiera de la empresa.

El estado ecuatoriano por norma, obliga a la empresa a renovar el diseño de las carrocerías cada dos años desde la aprobación del modelo anterior, pensando en esto y en la proyección a futuro se presenta el rediseño y a continuación los beneficios y costos que determinan si la rentabilidad aumenta o desencaja en el presupuesto ya establecido de la empresa.

Metálicas Pillapa construye generalmente 4 carrocerías en un mes laboral con valores de venta al público que van desde \$65.000 hasta \$100.000, valor que dependerá de los accesorios Con que este equipada la carrocería como luces, asientos, pantallas, calefacción, aire acondicionado etc., y accesorios externos como el tipo de termoquin y la pintura en general, por mencionar algunos. Como el proyecto se basa únicamente en la construcción masiva de la parte externa de la carrocería más no de sus accesorios se tomará el valor mínimo de \$65.000 dólares americanos para el análisis.

Del valor de venta al público de la carrocería se derivan costos de mano de obra, material y ganancias netas de la empresa distribuidas así:

Tabla 6-1. Descripción de costos de una carrocería.

Mano de obras	\$ 15.000
Materiales de construcción	\$ 45.000
Ganancias netas	\$ 5.000
P.V.P	\$ 65.000

Fuente: Autores.

Considerando que la empresa construye 4 carrocerías al mes y que por cada carrocería básica la ganancia neta de la misma es \$ 5.000, al mes se percibe un valor de ingreso neto mensual de \$20.000 así:

$$(N^{\circ} \text{ unidades}) \times (\text{costo } c/u) = \text{valor de ingreso neto mensual} \quad (41)$$

$$4 \times 5.000 = 20.000$$

Valor que será multiplicado por los dos años de vigencia de un modelo de carrocería expuestos en la norma, es decir 48 meses así, tendremos un valor de ingreso neto por modelo de carrocería de:

$$(\text{valor de ingreso neto mensual}) \times (\text{meses laborales})$$

$$= \text{valor de ingreso neto por } c/u$$

$$20.000 \times 48 = 96.000 \quad (42)$$

Al cabo de dos años la matriz que será donde los modelos están predispuestos, va a ser cambiada e independientemente del modelo este cambio tiene el siguiente costo.

Tabla 6-2. Costos de construcción de las matrices.

Matriz frente	\$ 10.000
Matriz respaldo	\$ 10.000

Fuente: Autores.

$$(\text{valor matriz frente}) + (\text{valor matriz respaldo}) = \text{valor por cambio de matriz}$$

$$10.000 + 10.000 = 20.000 \quad (43)$$

Obteniendo un valor por cambio de matriz de \$ 20.000 que será el mismo en cualquier cambio de matriz para cualquier diseño de carrocería. En la planificación se tomará en

cuenta este valor como gasto único por una vez a los 48 meses siendo amortizado y totalmente cubierto con el ingreso neto mensual de un mes laboral de la empresa.

Como se puede notar el cambio de matriz es algo necesario y obligatorio que la empresa realiza y que es independiente del modelo de carrocería pero el rediseño de la carrocería presentado en el presente proyecto, al ser un modelo actualizado y mucho más estético llama la atención del comprador mayormente, provocando que exista más demanda en la adquisición de las carrocerías nuevas y por consiguiente una mayor rentabilidad para la empresa convirtiéndose en un proyecto totalmente viable y sustentable que brindarán grandes ventajas y avances tecnológicos en lo que refiere a carrocerías de vehículos interprovinciales.

CAPÍTULO VII

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

Se recopiló información de las normas INEN: NTE 1323 Requisitos de las carrocerías de los buses (vehículos automotores) y NTE 043 Especificaciones del bus interprovincial e intraprovincial.

Se diseñó la carrocería del vehículo interprovincial Alfa-700 mediante un software, a partir de fotos y planos que posee actualmente la empresa carrocera Metálicas Pillapa.

Se realizó la simulación del vehículo actual en software ANSYS FLUENT, obteniendo los coeficientes de sustentación C_l de 0,30 y el coeficiente de resistencia C_d de 0,47.

Se imprimió un prototipo a escala en 3D, se realizaron pruebas aerodinámica en el túnel de viento y se obtuvo un Coeficiente de sustentación C_l promedio de $0,32 \pm 0,015$ y el coeficiente de resistencia C_d promedio de $0,48 \pm 0,01$.

Los resultados obtenidos mediante el análisis en Software son únicamente de uso académico, está completamente prohibido el uso del presente documento para la validación de modelos de carrocerías por empresas externas con fines comerciales.

Tabla 7-1. Comparación de resultados.

COEFICIENTES	Diseño original	Diseño original-túnel de viento	Diseño propuesto	Diseño propuesto-túnel de viento	Potencia Absorbida
Cd de arrastre	0,47	$0,48 \pm 0,01$	0,41	$0,41 \pm 0,01$	56,11 Hp
C_l de sustentación	0,30	$0,32 \pm 0,015$	0,22	$0,22 \pm 0,02$	48,78 Hp

Fuente: Autores (Fines académicos).

Se diseñó un prototipo de carrocería con mejoras aerodinámicas y eficiente, para lo cual se modificó la parte frontal y posterior del vehículo comercial de la empresa, al cual también se le hizo pruebas aerodinámicas en ANSYS FLUENT dando como resultado un coeficiente de sustentación C_l de 0,22 y un coeficiente de resistencia C_d de 0,41. Posteriormente se realizaron pruebas en el túnel de viento dando un coeficiente de sustentación C_l promedio de $0,22 \pm 0,02$ y un coeficiente de resistencia C_d promedio de $0,41 \pm 0,01$, por consiguiente se logró disminuir el coeficiente de resistencia haciendo que el vehículo reduzca la resistencia del aire, pueda movilizarse fácilmente y ahorre combustible, además se calculó la potencia absorbida obteniendo en el prototipo original 56,11 Hp y en el prototipo modificado se obtuvo una potencia absorbida de 48,78 HP a una velocidad de 90km/h logrando mayor eficiencia aerodinámica.

7.2. Recomendaciones

Para realizar éste análisis se debe contar con una computadora que preste las condiciones necesarias para realizar la simulación (computadora de 32Gb de memoria RAM y un procesador de 4 GHz como mínimo).

La Escuela Superior Politécnica de Chimborazo debe dar mayor apertura a los laboratorios de CAD/CAM, ayudando a los investigadores con sus equipos, reduciendo tiempo y gastos de investigación.

Tomar en cuenta un criterio muy bueno para realizar el mallado de los prototipos ya que de esto depende que los valores obtenidos se acerquen a la realidad.

Considerar el área de impresión en el momento de realizar el prototipado, puesto que el diseño está en escala real.

Considerar la calibración de los sensores en el túnel de viento ya que se pueden generar errores.

BIBLIOGRAFÍA

CARMONA, Anibal. *Aerodinámica y actuaciones del avión.* México: Paraninfo, 2012. pp. 8.

FONT, Martin. *Mecánica de Fluidos, Flujo Interno de fluidos incompresibles y compresibles.* California: Creative Commons, 2011. pp. 19.

IRIBERRI, Luis Días. *Estudio de propulsores para aplicación de túneles de viento.* España : Casteldefells, 2010. pp. 5-6.

COLOCHO LOPEZ, Nathaly Beatriz. *Manual básico de sistemas de aire acondicionado y extracción mecánica de uso común en arquitectura.* [en línea] (Seminario de investigación). Antiguo Cuscoatlán. El Salvador 2011. [Consulta: 20 de Noviembre 2016]. Disponible en: <http://webquery.ujmd.edu.sv/siab/bvirtual/BIBLIOTECA%20VIRTUAL/TESIS/06/ARQ/ADTESCM0001340.pdf>. p. 6.

CEDE. *Carrocerías y bastidores.* [en línea] (Centro de documentación). Cartagena. España 2012. [Consulta: 29 de Noviembre 2016]. Disponible en: https://www.serina.es/empresas/cede_muestra/304/TEMA%20MUESTRA.pdf. p. 45.

DEPARTAMENTO, Física Aplicada. *Laplace.* [en línea] (Física). Universidad de Sevilla. España 2014. [Consulta: 2 de Diciembre 2016]. Disponible en: http://laplace.us.es/wiki/index/php/N%C3%BAmero_de_Mavh.

KATZ, Joseph. *Race car aerodynamics 1st.* USA: Bentley Publishers, 2011. pp. 263-264.

LOPEZ, Mercedes. *Aerodinámica (Dominar el viento).* Uruguay: Dossier D'irios, 2012. pp. 2-7.

OLIVARES, José. *Estudio aerodinámico aplicado en el campo de la automoción.* [en línea] (Tesis). (Ingeniería) Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona-España 2011.

[Consulta: 20 de Noviembre 2016]. Disponible en: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/14663/PFC_I.pdf?sequence=2. pp. 12-15.

OSORIO, Kozvy. *Caracterización Aerodinámica de un vehículo pesado*. [en línea] (Tesis). (Maestría) Universidad Nacional Autónoma de México. México 2015. [Consulta: 20 de Noviembre 2016]. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/7803/Tesis.pdf?sequence=1>.

MOTT, Robert L. *Mecánica de Fluidos (Sexta edición)*. Mexico: Pearson Educación 2006. pp. 230-231, 529.

WHITE, Frank M. *Mecánica de fluidos*. México: The MacGaw-Hill, 2008. pp. 19.

CENGEL, Yunus & CIMBALA, John. *Mecánica de fluidos, Fundamentos y aplicaciones*. México: The McGraw-Hill, 2012. pp. 2-12-13-141.

AGENCIA NACIONAL DE TRÁNSITO. *Requisitos de las Carrocerías de los buses (Vehículos automotores) NTE 1323* [en línea]. [Consulta: 20 de Noviembre 2016]. Disponible en: <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.1323.2009.pdf>

AGENCIA NACIONAL DE TRÁNSITO. *Bus interprovincial o intraprovincial NTE 043* [en línea] 2013. [Consulta: 20 de Noviembre 2016]. Disponible en: <http://www.ant.gob.ec/index.php/servicios/normas-y-reglamentos-inen/seguridad/file/173-reglamento-tecnico-ecuadoriano-rte-inen-043-2010>.

AGENCIA NACIONAL DE TRÁNSITO. *Homologación* [en línea] 2013. [Consulta: 28 de Noviembre 2016]. Disponible en: http://www.ant.gob.ec/index.php/servicios/transito-12/que-es-la-homologacion-vehicular#.V4WNV_197IU. RTE INEN 043.

FONDA, Carlo. *Guía Práctica para tu Primera impresión 3D*. [en línea] 2013. [Consulta: 9 de Diciembre 2016]. Disponible en: https://impresion3denelictp.files.wordpress.com/2014/03/guc3ada-prc3a1ctica-para-tu-primera-impresic3b3n-3d_carlo-fonda1.pdf.

ORTEGO, Luis Miguel. *Aerodinámica y eficiencia.* [en línea] 2013. [Consulta: 22 de Agosto 2016]. Disponible en: <http://www.diariomotor.com/tecmovia/2013/03/31/aerodinamica-y-eficiencia/>.

ROSAS, Carlos. *Arrastre y Sustentación.* [en línea] 2012. [Consulta: 22 de Agosto 2016]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/0902carlosr/arrastre-y-sustentacin>.

WILLEGUER, Y. *Reparación de Carrocerías. Serina.* [en línea] 2014. [Consulta: 6 de Octubre 2016]. Disponible en: https://www.serina.es/empresas/cede_muestra/304/TEMA%20MUESTRA.pdf.

XENFORO. 2012. *Túnel de viento.*[en línea] 2012. [Consulta el: 22 de Julio de 2016.] Disponible en: <http://www.bmwfaq.com/threads/para-entender-un-poco-mas-el-tunel-de-l-viento-comotrabajan.709185/>.

NTE INEN 1668. *Vehículos de Transporte Público de Pasajeros Intrarregional, Interprovincial e Intraprovincial. Requisitos.*

ZITNIK, Juan. *Manual de vuelo del PIPER* [en línea]. [Consulta: 20 de Noviembre 2016]. Disponible en: <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.1323.2009.pdf>