



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERIA AUTOMOTRIZ**

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

TEMA:

**ANÁLISIS DINÁMICO DE FLUIDOS COMPUTACIONAL CFD APLICADO EN EL
ROMPEVIENTOS DE LOS TRAILERS DE COMPETENCIA**

**AUTOR: ALVEAR TULCANAZA JOHN EDISON
SÁNCHEZ MATANGO GUILLERMO ANDRÉS**

DIRECTOR: ING. LUIS ANDRÉS GARZÓN PÉREZ, MSc.

Ibarra, 2023

CERTIFICADO

ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

En mi calidad de director del plan de trabajo de grado, previo a la obtención del título de Ingeniería Automotriz, nombrado por el Honorable Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas.

CERTIFICO:

Que una vez analizado el plan de grado cuyo título es "ANÁLISIS DINÁMICO DE FLUIDOS COMPUTACIONAL CFD APLICADO EN EL ROMPEVIENTOS DE LOS TRAILERS DE COMPETENCIA" presentado por el señor: ALVEAR TULCANAZA JOHN EDISON con número de cédula 1003810296, doy fe que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a presentación pública y evaluación por parte de los señores integrantes del jurado examinador que se designe.

En la ciudad de Ibarra, a los dos días del mes de febrero de 2023.

Atentamente



Ing. Luis Garzón, MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

CERTIFICADO

ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

En mi calidad de director del plan de trabajo de grado, previo a la obtención del título de Ingeniería Automotriz, nombrado por el Honorable Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas.

CERTIFICO:

Que una vez analizado el plan de grado cuyo título es "ANÁLISIS DINÁMICO DE FLUIDOS COMPUTACIONAL CFD APLICADO EN EL ROMPEVIENTOS DE LOS TRAILERS DE COMPETENCIA" presentado por el señor: SÁNCHEZ MATANGO GUILLERMO ANDRÉS con número de cédula 1004078752, doy fe que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a presentación pública y evaluación por parte de los señores integrantes del jurado examinador que se designe.

En la ciudad de Ibarra, a los dos días del mes de febrero de 2023.

Atentamente



Ing. Luis Garzón, MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

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

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

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

DATOS DE CONTACTO		
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1003810296	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Alvear Tulcanaza John Edison	
DIRECCIÓN:	Panamericana Norte y David Manangón, Atuntaqui	
EMAIL:	jealveart@utn.edu.ec	
TELÉFONO FIJO:	06 2530117	TELÉFONO MÓVIL: 0958894948

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	"Análisis dinámico de fluidos computacional CFD aplicado en el rompevientos de los trailers de competencia"
AUTOR (ES):	Alvear Tulcanaza John Edison Sánchez Matango Guillermo Andrés
FECHA: DD/MM/AAAA	02/02/2023
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería Automotriz
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Luis Andrés Garzón Pérez MSc.

2. CONSTANCIAS

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

Ibarra, a los dos días del mes de febrero de 2023

EL AUTOR:

Nombre: John Alvear



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

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

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

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

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004078752		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Sánchez Matango Guillermo Andrés		
DIRECCIÓN:	Av. Eugenio Espejo, sector puente amarillo.		
EMAIL:	gasanchezm@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0982311635

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	"Análisis dinámico de fluidos computacional CFD aplicado en el rompevientos de los trailers de competencia"
AUTOR (ES):	Alvear Tulcanaza John Edison Sánchez Matango Guillermo Andrés
FECHA: DD/MM/AAAA	02/02/2023
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería Automotriz
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Luis Andrés Garzón Pérez MSc.

2. CONSTANCIAS

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

Ibarra, a los dos días del mes de febrero de 2023

EL AUTOR:

Nombre: Guillermo Sánchez

DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a mis padres, quiénes con su apoyo incondicional me han ayudado a conseguir este logro y han sido mi fuente de motivación e inspiración. También quiero dedicárselo a mis hermanos que siempre me han ayudado cuando los he necesitado y siempre han confiado en mí.

Alvear Tulcanaza John Edison

Este proyecto va dedicado a mi madre que me ha enseñado a esforzarme para cumplir con todos mis objetivos planteados y por el apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria.

A mi padre que es mi gran fuente de inspiración y que siempre me motivó a seguir adelante.

A todos quienes me apoyaron y dejaron en mí una huella de emoción y conocimiento.

Sánchez Matango Guillermo Andrés

AGRADECIMIENTO

Todo este trabajo ha sido posible gracias a mis padres Esthela Tulcanaza y Bolívar Alvear, quiénes estuvieron en todo momento para ayudarme, apoyarme y siempre han confiado en mí. También, agradezco a mis hermanos y hermanas ya que siempre me han apoyado y me han motivado a luchar por mis sueños. Y a las demás personas que han estado en el transcurso de la carrera apoyándome.

Agradezco a todos los docentes que forman parte de la carrera de Ingeniería Automotriz, que han sabido impartir sus conocimientos para formarnos como profesionales.

Alvear Tulcanaza John Edison

Agradezco a mi madre por apoyarme en todo momento y por todos los valores que me ha impartido a lo largo de mi corta vida. A mi padre que me enseñó a no darme por vencido y que con un poco de esfuerzo y razonamiento nada es imposible.

A los docentes que nos guiaron e impartieron su conocimiento, en especial a aquellos que hicieron posible culminar este trabajo, al igual que mi compañero que trabajó en todo momento hasta el final de este camino.

También, agradezco a mi hermana por darme su consideración en todo momento y a esa persona especial que siempre estuvo conmigo apoyándome y motivándome con sus palabras de aliento.

Sánchez Matango Guillermo Andrés

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	iv
RESUMEN	vii
ABSTRACT.....	viii
INTRODUCCIÓN	ix
CAPÍTULO I	10
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
1.1 Antecedentes	10
1.2 Planteamiento del Problema.....	11
1.3 Alcance.....	12
1.4 Objetivos	12
1.4.1 Objetivo General.....	12
1.4.2 Objetivos Específicos.	12
1.5 Justificación.....	13
CAPÍTULO II	14
2. MARCO TEÓRICO	14
2.1 Normativa y Reglamentación.....	14
2.1.1 Leyes y reglamentos de velocidad.....	16
2.2 Diseño y modelado de deflectores	17
2.2.1 Modelado en software CAD.....	18
2.3 Simulación Aerodinámica	19
2.3.1 Flujo.....	19
2.3.2 Flujo del aire en el vehículo.	20
2.3.3 Dinámica de fluidos computacional (CFD).....	20
2.3.4 Análisis CFD en el campo automotriz.....	21
2.3.5 Estructura de CFD.	21
2.3.6 Dominio computacional.	23

2.3.7	Calidad malla.....	23
2.3.8	Tipos de mallas.....	24
2.4	Propiedades de análisis.....	26
2.4.1	Coeficiente de arrastre (CD).....	26
2.4.2	Número de Reynolds.....	28
2.4.3	Presión.....	28
2.4.4	Fuerza de resistencia a la rodadura.....	29
2.4.5	Fuerza de resistencia a la pendiente.....	29
CAPÍTULO III.....		30
3	MATERIALES Y MÉTODOS.....	30
3.1	Normativa y Reglamentación.....	30
3.2	Modelado 3D/CAD.....	30
3.2.1	Proceso de modelado del tráiler.....	31
3.2.2	Proceso de modelado de los deflectores.....	34
3.2.3	Proceso de modelado del túnel de viento.....	35
3.3	Proceso de simulación CFD.....	37
3.3.1	Importación de la geometría.....	37
3.3.2	Asignación de entrada y salida.....	37
3.3.3	Generación de malla.....	38
3.3.4	Condiciones de borde.....	40
CAPÍTULO IV.....		46
4	RESULTADOS.....	46
4.1	Resultado del diseño de los modelos de deflectores.....	46
4.2	Resultados de calidad de mallado.....	47
4.3	Resultados del área frontal.....	48
4.3.2	Resultados del área frontal del tráiler y deflectores.....	48
4.3.3	Resultados del área frontal del tráiler con acoplamiento de carga y deflectores.....	49

4.4 Simulación del tráiler y los modelos de deflectores.....	50
4.4.1 Resultados del tráiler sin deflector a 90 km/h y 130 km/h.	50
4.4.2 Resultados del primer modelo de deflector a 90 km/h y 130 km/h.	51
4.4.3 Resultados del segundo modelo de deflector a 90 km/h y 130 km/h.	52
4.4.4 Resultados de la tercera modelo de deflector a 90 km/h y 130 km/h.	53
4.4.5 Cálculo del coeficiente de arrastre y presión.	53
4.5 Simulación del tráiler con acoplamiento de carga y los diferentes deflectores	55
4.5.1 Resultados de simulación del tráiler con acoplamiento a 90 km/h y 130 km/h.	55
4.5.2 Resultados del tráiler con acoplamiento de carga incluido el primer deflector a 90 km/h y 130 km/h.	56
4.5.3 Resultados del tráiler acoplamiento de carga incluido el segundo deflector a 90 km/h y 130 km/h.	57
4.5.4 Resultados del tráiler acoplamiento de carga incluido el tercer deflector a 90 km/h y 130 km/h.	58
4.5.5 Resultado del coeficiente de arrastre y presión del tráiler incluyendo los deflectores y el acoplamiento de carga.	58
4.6 Simulación del tráiler y los modelos de deflectores a una altura de 2850 msnm	60
4.6.1 Resultados del tráiler sin deflector.	60
4.6.2 Resultados del primer modelo de deflector.	61
4.6.3 Resultados del segundo modelo de deflector.	61
4.6.4 Resultados del tercer modelo de deflector.	62
4.6.5 Resultados de presión y coeficiente de arrastre.	63
4.7 Simulación del tráiler con acoplamiento de carga y los modelos de deflectores a 2850 m.	64
4.7.1 Resultados de simulación del tráiler con acoplamiento de carga y sin deflector. ...	64
4.7.2 Resultados del tráiler con el acoplamiento de carga y el primer deflector.	65
4.7.3 Resultados del tráiler con acoplamiento de carga y el segundo deflector.	66
4.7.4 Resultados del tráiler con acoplamiento de carga y el tercer deflector.	67

4.7.5 Resultados de presión y coeficiente de arrastre.....	68
4.8 Resumen de resultados generales.....	69
4.9 Costos de producción.....	70
4.10 Resultado del comportamiento del aire.....	72
4.10.1 Resultados en el tráiler con los distintos modelos de deflectores a 90km/h y 130 km/h.....	72
4.10.2 Resultados en el tráiler con contenedor y los modelos de deflectores a 90km/h y 130 km/h.....	72
CAPÍTULO V.....	74
5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	74
5.1 Comparación de resultados del tráiler con los diferentes modelos de deflectores.....	74
5.2 Comparación de resultados del tráiler con acoplamiento de carga y los modelos de deflectores.....	75
5.3 Comparación del coeficiente de arrastre a diferentes densidades.....	77
5.4 Beneficios de la reducción del coeficiente de arrastre.....	78
5.5 Ajuste de curvas por regresión lineal del modelo más idóneo.....	79
5.5.1 Ajuste de curvas del tráiler sin deflector.....	79
5.5.2 Ajuste de curvas del tráiler con acoplamiento de carga y sin deflector.....	80
5.5.3 Ajuste de curvas del tráiler con acoplamiento de carga y deflector.....	80
5.6 Comparación del comportamiento del aire representado en líneas de flujo.....	81
5.7 Comparación de resultados de velocidad del vehículo en función del tiempo.....	82
5.8 Comparación de precios del tráiler y deflectores.....	83
CAPÍTULO VI.....	84
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	84
6.1 CONCLUSIONES.....	84
6.2 RECOMENDACIONES.....	85
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86
ANEXOS.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA NUM.	DESCRIPCIÓN	PÁG.
Figura 2.1	Mediciones en los diferentes planos	15
Figura 2.2	Prototipo de primer modelo de deflector	17
Figura 2.3	Tipos de deflectores	17
Figura 2.4	Modelado en software CAD	18
Figura 2.5	Aerodinámica Vehicular	19
Figura 2.6	Tipos de flujos	19
Figura 2.7	Flujo Externo	20
Figura 2.8	Análisis CFD de tráiler.	21
Figura 2.9	Dimensiones del dominio computacional	23
Figura 2.10	Calidad de malla	24
Figura 2.11	Malla Tetraédrica	24
Figura 2.12	Malla hexcore	25
Figura 2.13	Malla Poliédrica	25
Figura 2.14	Malla Poly hexcore	26
Figura 2.15	Coefficiente de arrastre de acuerdo al vehículo	27
Figura 3.1	Tráiler T800	31
Figura 3.2	Proceso de modelado en SolidWorks.	31
Figura 3.3	Planos en 2D del tráiler.	32
Figura 3.4	Modelado del tráiler en el software CAD	33
Figura 3.5	Diseño de deflectores	34
Figura 3.6	Diseño de túnel de viento para tráiler	36
Figura 3.7	Diseño de túnel de viento para tráiler con contenedor	36
Figura 3.8	Importación de geometría	37
Figura 3.9	Área de entrada y salida del fluido	37
Figura 3.10	Malla de superficie	38
Figura 3.11	Malla de volumen	38
Figura 3.12	Resultado calidad de malla Skewness	39
Figura 3.13	Resultado calidad de malla Orthogonal Quality	39
Figura 3.14	Configuración de forma general	40

Figura 3.15 Selección del modelo de viscosidad	40
Figura 3.16 Propiedades del fluido	41
Figura 3.17 Condiciones de entrada a 90km/h	41
Figura 3.18 Condiciones de entrada a 130km/h	42
Figura 3.19 Parámetros de presión como condición de salida	42
Figura 3.20 Área frontal del tráiler	43
Figura 3.21 Valores de referencia dimensional del vehículo	43
Figura 3.22 Configuración para la obtención de la fuerza de arrastre	44
Figura 3.23 Selección del método de inicialización	44
Figura 3.24 Ejecución del estudio	45
Figura 4.1 Resultado de los modelos de deflectores implementados en el tráiler	46
Figura 4.2 Calidad de malla del tráiler con deflectores	47
Figura 4.3 Calidad de malla del tráiler con deflectores y acoplamiento de carga	47
Figura 4.4 Área frontal del tráiler	48
Figura 4.5 Área frontal del tráiler con el primer deflector.	48
Figura 4.6 Área frontal del tráiler con el segundo deflector.	48
Figura 4.7 Área frontal del tráiler con el tercer deflector.	49
Figura 4.8 Área frontal del tráiler con contenedor.	49
Figura 4.9 Área frontal del tráiler con contenedor y el primer deflector.	50
Figura 4.10 Área frontal del tráiler con contenedor y el segundo deflector.	50
Figura 4.11 Resultados de fuerza y presión del tráiler	50
Figura 4.12 Resultados de presión y fuerza del tráiler con el primer modelo	51
Figura 4.13 Resultados de presión y fuerza del tráiler y segundo modelo	52
Figura 4.14 Resultados de presión y fuerza del tráiler y tercer modelo	53
Figura 4.15 Resultados del coeficiente de arrastre	54
Figura 4.16 Resultados de presión	54
Figura 4.17 Resultados de presión y fuerza del tráiler con acoplamiento	55
Figura 4.18 Resultados de fuerza y presión a 90 km/h con el primer deflector.	56
Figura 4.19 Resultados de fuerza y presión a 90 km/h con el segundo deflector	57
Figura 4.20 Resultados de fuerza y presión a 90 km/h con tercer deflector	58
Figura 4.21 Resultados del coeficiente de arrastre del tráiler con acoplamiento de carga y deflectores	59
Figura 4.22 Resultados de presión del tráiler con acoplamiento de carga y deflectores	59
Figura 4.23 Resultados de fuerza y presión del tráiler sin deflector a 90 km/h y 130 km/h.	60

Figura 4.24 Resultados de presión y fuerza a 90 km/h y 130 km/h.	61
Figura 4.25 Resultados de presión y fuerza a 90 km/h y 130 km/h.	61
Figura 4.26 Resultados de presión y fuerza a 90 km/h y 130 km/h.	62
Figura 4.27 Resultados de presión del tráiler con contenedor y deflectores a 2850 m	63
Figura 4.29 Presión y fuerza del tráiler con acoplamiento de carga a 90 km/h y 130 km/h	64
Figura 4.30 Resultados de fuerza y presión con el primer deflector a 90 km/h y 130 km/h.	65
Figura 4.31 Resultados de presión y fuerza a 90 km/h y 130 km/h.	66
Figura 4.32 Resultados de fuerza y presión a 90 km/h y 130 km/h con el tercer deflector	67
Figura 5.1 Comparativa de resultados de la fuerza en función de la velocidad	74
Figura 5.2 Comparativa de resultados del coeficiente de arrastre (CD) en función de Reynolds	75
Figura 5.3 Comparativa de resultados de la fuerza en función de la velocidad	75
Figura 5.4 Comparativa de resultados de CD en función de Reynolds	76
Figura 5.5 Coeficiente de arrastre del tráiler y los deflectores a diferentes densidades	77
Figura 5.6 Coeficiente de arrastre del tráiler con acoplamiento de carga a diferentes densidades	77
Figura 5.7 Consumo de consumo de combustible de acuerdo al coeficiente de arrastre	78
Figura 5.8 Resultados del ajuste de curvas por regresión lineal para el tráiler sin deflector	79
Figura 5.9 Resultados del ajuste de curvas para el tráiler con el acoplamiento de carga y sin deflector	80
Figura 5.10 Resultados del ajuste de curvas para el tráiler con acoplamiento de carga y el primer modelo de deflector	80
Figura 5.11 Comportamiento de líneas de flujo a través de tráiler	81
Figura 5.12 Comportamiento de líneas de flujo a través de tráiler con contenedor	81
Figura 5.13 Comparación de resultados de velocidad del tráiler con contenedor	82

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA NUM.	DESCRIPCIÓN	PÁG.
Tabla 2.1	Velocidad permitida de acuerdo al tipo de vehículo	16
Tabla 3.2	Medidas del tráiler Kenworth T800	32
Tabla 3.2	Modelos de referencia	35
Tabla 3.3	Ángulos de ataque de los modelos de deflectores	35
Tabla 3.4	Dimensiones del túnel de viento	36
Tabla 4.1	Resumen de resultados de los diferentes deflectores.	69
Tabla 4.2	Resumen de resultados de los diferentes deflectores a una altura de 2850 ms.n.m.	70
Tabla 4.3	Costos de los materiales de fabricación	71

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN NÚM.	DESCRIPCIÓN	PÁG.
(1)	Ecuación del coeficiente de arrastre.....	27
(2)	Ecuación del número de Reynolds.....	28
(3)	Ecuación de presión.....	28
(4)	Ecuación de fuerza de resistencia a la rodadura.....	29
(5)	Ecuación fuerza a la resistencia a la pendiente.....	29
(6)	Ecuación fuerza de arrastre del modelo base.....	79
(7)	Ecuación fuerza de arrastre del trailer con acoplamiento de carga.....	80
(8)	Ecuación fuerza de arrastre con acoplamiento de carga y el primer deflector.....	81

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO NÚM.	DESCRIPCIÓN	PÁG.
ANEXO I.	Planos del tráiler con contenedor y el primer modelo de deflector	91
ANEXO II.	Planos del tráiler con contenedor y el segundo modelo de deflector	92
ANEXO III.	Planos del tráiler con contenedor y el tercer modelo de deflector	93
ANEXO IV.	Código para obtener el coeficiente de arrastre (CD)	94
ANEXO V.	Código para obtener la presión	96
ANEXO VI.	Diagrama de bloques para obtener la velocidad	97
ANEXO VII.	Tabla de las propiedades del aire	98
ANEXO VIII.	Proceso de diseño del tráiler	99
ANEXO IX.	Proceso de simulación del tráiler	99

RESUMEN

Con el transcurso de los años la aerodinámica de los vehículos ha evolucionado de forma significativa. Sin embargo, en el caso del transporte pesado esta evolución es muy reciente. Con el proyecto de investigación titulado “Análisis dinámico de fluidos computacional CFD aplicado en el rompevientos de los trailers de competencia”, se busca mejorar la aerodinámica del tráiler Kenworth T800 por medio de la implementación de un deflector. Para esto fue necesario el diseño de tres modelos de deflectores inspirados en diseños ya implementados en otros vehículos como son: Freightliner Classic XL, Kenworth T800 Aerocab y el diseño creado a partir de la morfología de un lobo marino de un estudio previo, los cuales fueron realizados con base en la normativa vigente. Por medio del software de diseño CAD se inició por el modelado del vehículo con la ayuda de los diferentes planos y con las medidas establecidas por el fabricante, luego se ajustó los modelos de deflectores a partir de la geometría del vehículo. Posterior a esto, se importó el diseño al software CFD incluyendo el túnel de viento, donde bajo condiciones específicas se realizó el estudio a velocidades de 90 km/h y 130 km/h para identificar valores como: fuerza de arrastre, coeficiente de arrastre, presión y velocidad. La simulación realizada determinó que implementando un deflector se reduce la turbulencia generada en la parte posterior del vehículo, la cual se determina a través de las líneas de flujo obtenidas en la simulación. Además, con el modelo de deflector que presentó las mejores condiciones aerodinámicas se determinó una reducción del 25% en el coeficiente de arrastre para el tráiler con acoplamiento de carga. Sin embargo, en el tráiler sin el contenedor los resultados que se obtuvieron determinaron que no existía mejora alguna con la implementación de deflectores.

Palabras Clave: Diseño, Deflector, CFD, coeficiente de arrastre, Aerodinámica, Vehículo.

ABSTRACT

Over the years the aerodynamics of the vehicles have been improving significantly. However, in the case of heavy transport, this development is very recent. With the research project entitled “Computational fluid dynamic analysis of the deflector of competing trailers” seeks to improve the aerodynamics of the Kenworth T800 trailer through the implementation of a deflector. For this it was necessary to design three models of deflectors inspired by designs already implemented in other vehicles such as: Freightliner Classic XL, Kenworth T800 Aerocab and the design created from the morphology of a sea lion from a previous study, which were carried out based on current regulations. By means of CAD design software it was started by modeling the vehicle with the help of the different drawings and with the measurements set by the manufacturer, then the deflector models were adjusted from the geometry of the vehicle. After this, the design was imported into the CFD software including the wind tunnel, where under specific conditions the study was carried out at speeds of 90 km/h and 130 km/h to identify values such as: drag force, drag coefficient, pressure and speed. The simulation determined that implementing a deflector reduces the turbulence generated in the back of the vehicle, which is determined through the flow lines obtained in the simulation. In addition, with the deflector model that presented the best aerodynamic conditions, a 25% reduction in drag coefficient for trailer with load coupling. However, in the trailer without the container, the results that were obtained determined that there was no improvement with the implementation of baffles.

Keywords: Design, Deflector, CFD, drag coefficient, Aerodynamics, Vehicle.

INTRODUCCIÓN

En el pasado no se consideraba la eficiencia aerodinámica en los transportes de carga pesada, sin embargo, con el incremento de los precios de combustible y el alto consumo que estos vehículos ocasionan, incentiva a los fabricantes a buscar nuevas alternativas y oportunidades para mejorar la aerodinámica.

Para mejorar la eficiencia aerodinámica de los vehículos de carga pesada, es preferible cambiar el diseño de la geometría de la cabina, especialmente en el área frontal donde el aire realiza el primer contacto sobre la carrocería. Además, existe la implementación de dispositivos aerodinámicos sobre la cabina u otras partes de estos vehículos. No obstante, existen pocos estudios acerca de estos dispositivos, por lo que existe poca información que sustente su implementación.

Los deflectores se utilizan en gran medida en vehículos de carga pesada, pero sobre todo por motivos estéticos, los cuales no tienen estudios previos que respalden sus beneficios al momento de ser implementados.

Con el avance de la tecnología, se ha podido desarrollar diseños de vehículos con mejores detalles y además realizar estudios a los dispositivos aerodinámicos. Estos estudios se realizan a partir de la dinámica de fluidos computacional (CFD), donde por medio de modelos CAD y la creación de túneles de viento se simula el comportamiento aerodinámico del vehículo, obteniendo resultados como el coeficiente de arrastre y el comportamiento del aire a través de las paredes del vehículo. De esta manera se puede determinar las ventajas o desventajas que implica la implementación de deflectores sobre los vehículos de carga pesada.

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Antecedentes

En el mundo se utilizan los vehículos de carga pesada como los tráileres para llevar principalmente mercancías, pero en el sector automovilístico, estos también son utilizados en eventos relacionados con las competencias de velocidad. En este tipo de eventos, se logra evidenciar que estos vehículos logran alcanzar altas velocidades, y de esta manera, recorrer una distancia determinada en el menor tiempo posible.

Para que los vehículos alcancen altas velocidades en menor tiempo, no solo se toma en cuenta las características mecánicas, sino que también es fundamental considerar su aerodinámica. No obstante, en el sector automovilístico existe poco desarrollo de diseño aerodinámico del transporte pesado. Esto más bien está enfocado en automóviles livianos de competición. Debido a esto, nace la necesidad de diseñar elementos o dispositivos aerodinámicos en esta gama de vehículos, que permita minimizar la resistencia que genera el aire sobre la carrocería de los camiones (Chowdhury et al., 2017).

El estudio aerodinámico surge de la necesidad de reducir la resistencia que el aire ejerce sobre los vehículos en movimiento. Las formas de análisis y estudios en aerodinámica son muy limitadas, uno de los principales métodos es el uso del túnel de viento. Sin embargo, su implementación demanda una alta inversión debido al tamaño de construcción requerida de acuerdo a las dimensiones reales de un vehículo. La siguiente opción para realizar estos estudios se refiere a la aplicación de herramientas computacionales, que son capaces de procesar mayor cantidad de información en menor tiempo (Romero, 2014).

Con las herramientas computacionales es posible realizar análisis de modelos aerodinámicos a los vehículos de una manera más eficiente y en condiciones similares a la realidad. A través del proceso de simulación en un túnel de viento se obtienen valores de fuerza y coeficientes de arrastre, los cuales muestran la eficiencia aerodinámica de un vehículo. Además, es posible observar líneas de corriente, vórtices y campos de presión para identificar las zonas donde se genera mayor resistencia al aire. (Nigro et al., 2015).

Los vehículos utilizados en el sector del transporte pesado como los tráileres han mejorado aerodinámicamente gracias al desarrollo de deflectores que permiten una mejor circulación del aire. Dicho de otra manera, estos elementos permiten que el flujo de aire circule libremente sobre la cabina y a su vez por el acoplamiento de carga. Previo a la implementación de estos dispositivos, es necesario realizar estudios que determinen la eficiencia aerodinámica y la mejora que estos darían al rendimiento en el consumo de combustible del tráiler (Zhang et al., 2018).

En Ecuador existe poco desarrollo sobre el análisis de cargas aerodinámicas en los vehículos de carga pesada mediante el uso de deflectores. En muchas ocasiones, se colocan dispositivos aerodinámicos sobre los camiones y tráileres de forma artesanal, sin realizar un estudio previo. De los pocos estudios desarrollados, existe un análisis en el HINO serie 500 para el cual se busca mejorar la eficiencia aerodinámica y luego reducir el consumo de combustible. El estudio se refiere a la implementación de deflectores, los cuales fueron analizados en condiciones de turbulencia para determinar el coeficiente de arrastre que estos generan (Fraga, 2017).

En los tráileres con acoplamiento de carga pueden existir varios elementos que mejoran la aerodinámica del vehículo. Un estudio previo demuestra que los deflectores colocados sobre la cabina pueden llegar a reducir la resistencia del aire entre un 20% a 23%. Sin embargo, este resultado depende del diseño y la geometría del deflector, debido a que existen diferentes modelos de cabinas en el campo automotriz (Gao et al., 2022).

1.2 Planteamiento del Problema

El problema surge del requerimiento del análisis aerodinámico de la estructura dimensional del tráiler Kenworth T800, luego de una revisión extensiva en la literatura, no se ha encontrado estudios aerodinámicos desarrollados para este modelo de vehículo. Este tipo de análisis se ha realizado para camiones o tráileres de origen asiático o europeo (Hjelm & Bergqvist, 2009). Por tal motivo, no existe información necesaria que respalde la implementación de deflectores sobre este modelo de tráiler.

En muchas ocasiones los propietarios de estos vehículos de carga pesada implementan deflectores de tipo artesanal por temas estéticos y más no por el mejoramiento aerodinámico, esto conlleva a que se coloquen deflectores inapropiados que perjudican el rendimiento aerodinámico.

1.3 Alcance

Se analizarán las capacidades aerodinámicas del tráiler Kenworth T800 utilizado en situación de competencia de velocidad, con y sin el acoplamiento de carga. A partir de esto, se diseñarán modelos de deflectores que se ajusten a la geometría del vehículo, con el fin de realizar simulaciones aerodinámicas de los mismos y con velocidades definidas. La velocidad de 90 km/h se establece con base en los rangos de circulación en carretera permitidos por la Ley Orgánica de Transporte Terrestre y Seguridad Vial. La velocidad de 130 km/h es debido a la máxima que pueden llegar a alcanzar este tipo de vehículos en condiciones de competencia.

Luego de analizar los resultados aerodinámicos para cada caso, se seleccionará el modelo de deflector que presente las mejores características aerodinámicas y disminuya la resistencia del aire en el tráiler. A partir del modelo seleccionado, se realizarán comparaciones frente a modelos ya comercializados con el fin de verificar la rentabilidad de implementar un deflector sobre el tráiler Kenworth T800.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General.

Analizar las características aerodinámicas de los deflectores en el tráiler Kenworth T800 por medio del uso simulado de dinámica de fluidos, con el fin de mejorar la eficiencia aerodinámica reduciendo la resistencia al aire y aumentando su velocidad.

1.4.2 Objetivos Específicos.

- Identificar la normativa y reglamentación vigente que especifica las condiciones de diseño de deflectores que mejoren la aerodinámica de los vehículos de transporte pesado.
- Diseñar prototipos de deflectores que se ajusten a la geometría del tráiler Kenworth T800.
- Simular la aerodinámica de los modelos de deflectores en el tráiler Kenworth T800.
- Seleccionar el prototipo con las mejores características aerodinámicas.

1.5 Justificación

A través de la normativa y reglamentación vigente se busca cumplir con las dimensiones de los deflectores e iniciar el proceso de diseño. Para el proceso de simulación se establecen las condiciones de frontera, tomando como referencia los rangos de velocidad permitidos en el país.

La aerodinámica siempre ha sido fundamental para el desarrollo de la tecnología automotriz. De los estudios realizados se han obtenido resultados que contribuyen a la mejora de las características del vehículo. De esta forma, los fabricantes de la industria automotriz crean modelos más eficientes y estéticamente agradables. También contribuye a los planes nacionales de desarrollo para salvaguardar los derechos de la naturaleza mediante la implementación de nuevas tecnologías e infraestructuras más amigables con el medio ambiente (Fraga, 2017).

Para obtener resultados aerodinámicos que se aproximen a las condiciones reales es necesario el uso de herramientas computacionales y software CFD, y analizar el comportamiento de cada uno de los deflectores implementados en el tráiler. En el estudio se podrá agregar valores como: velocidad, densidad y presión del fluido, de acuerdo a cada situación de estudio.

El estudio que se pretende realizar en el deflector de un tráiler no solo contribuirá al mejoramiento de las características aerodinámicas, sino también, tendrá un impacto significativo en la reducción de las emisiones. Esto ocurre cuando la fuerza de arrastre ejercida sobre la carrocería se reduce a medida que el aire fluye sobre el deflector, distribuyendo el contacto en todos los puntos del vehículo.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Normativa y Reglamentación

Según la Norma Técnica Ecuatoriana vigente en el país, NTE INEN 2656, correspondiente a Clasificación Vehicular, el tráiler Kenworth T800 pertenece a la subclase “N3”. De igual manera, el vehículo no motorizado o acoplamiento de carga forma parte de la subcategoría O4, el cual es diseñado para ser remolcado por un medio de transporte de arrastre (Servicio Ecuatoriano de Normalización, 2016).

Para la homologación de los vehículos tipo M, N y O, se establece el reglamento (EU) N° 1230/2012, que define las masas y dimensiones permitidas para la circulación en las vías. En este caso el uso de los diferentes dispositivos aerodinámicos puede modificar las dimensiones de los vehículos. Se establecen medidas como: largo y ancho. Ancho: 2.55 m para cualquier vehículo o 2.60 m para vehículos equipados con una carrocería con paredes aisladas de al menos 45 mm de espesor y altura: 4 m (Diario Oficial de la Unión Europea, 2012).

Según el Ministerio de Transporte y Obras Públicas establece una tabla de pesos y dimensiones que deben aplicarse a los diferentes tipos de vehículos de carga pesada. La subcategoría O4 se define como un tipo s2 el cual es un semirremolque de dos ejes con un peso máximo de 20 toneladas, largo de 13 m, ancho de 2.60 m y alto de 4.10 m (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2016).

Para el proceso de medición de los diferentes vehículos se toma en cuenta la normativa ISO 612-1978, la cual determina la manera correcta para tomar las medidas en los distintos planos.

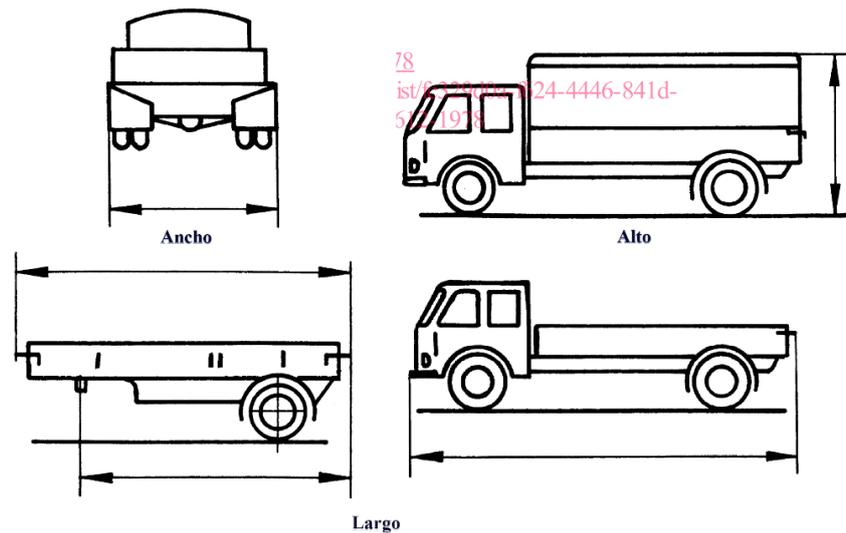


Figura 2.1 Mediciones en los diferentes planos

Fuente: (International Organization for Standardization, 1978)

En la Figura 2.1 se detalla la manera correcta para realizar las mediciones en los diferentes planos, como son el ancho, alto y largo. Para el ancho del vehículo se toma como referencia dos planos paralelos ubicados en la parte frontal y posterior como se muestra en la Figura 2.1 a excepción de los espejos retrovisores, indicadores de presión, indicadores de dirección, guardabarros flexibles, escalones retractiles, cadenas para la nieve. Para la medición de la altura se selecciona un plano horizontal que tiene como referencia el suelo y un plano paralelo que toca la parte superior del vehículo. Así mismo, cuando se requiera tomar las medidas de largo o longitud, tanto en el vehículo o del remolque se aplica un plano en la parte delantera y trasera respectivamente, incluyendo cualquier parte que sobresalga ya sea gancho de remolque, parachoques, entre otros (International Organization for Standardization, 1978).

En el país no existe una normativa o reglamento que especifique los requisitos necesarios para el diseño o implementación de deflectores en tráileres de competencia. Sin embargo, en otros países existen algunos reglamentos en donde se permite tener dos deflectores laterales en la parte trasera de la cabina que no puedan extenderse más de 80 centímetros. En el caso de los deflectores superiores deben estar adheridos de manera que no se desprendan cuando el vehículo este en movimiento y soporten el peso de una persona (British Automobile Racing Club, 2018).

2.1.1 Leyes y reglamentos de velocidad.

En el artículo 191 de la Ley Orgánica de Transporte Terrestre Tránsito y Seguridad Vial (LOTTTSV) el cual establece los límites y rangos moderados de velocidad vehicular a excepción de trenes y autocarriles. En la Tabla 2.1 se muestran los rangos de velocidades de acuerdo al tipo vehículo y el sector de la calzada (Ley Orgánica de Transporte Terrestre Tránsito y Seguridad Vial, 2012).

De acuerdo con lo establecido según LOTTTSV, un vehículo de transporte de carga pesada puede circular a velocidades entre 40 y 50 km/h en vías urbanas, en la perimetral los rangos varían entre 70 y 95 km/h. Cuando el vehículo circula en rectas tiene permitido una velocidad entre 70 y 100 km/h y en curvas puede circular a velocidad entre 40 y 60 km/h. La simulación se hace a 90 km/h porque es un valor permitido en las vías tanto perimetral como rectas, es allí donde mayor resistencia genera el viento sobre la carrocería del vehículo.

Tabla 2.1 Velocidad permitida de acuerdo al tipo de vehículo

	Urbana	Perimetral	Rectas	Curvas
Livianos o motocicletas	$\geq 50 \leq 60$	$\geq 90 \leq 120$	$\geq 100 \leq 135$	$\geq 60 \leq 75$
Transporte público de pasajeros	$\geq 40 \leq 50$	$\geq 70 \leq 100$	$\geq 90 \leq 115$	$\geq 50 \leq 65$
Transporte de carga	$\geq 40 \leq 50$	$\geq 70 \leq 95$	$\geq 70 \leq 100$	$\geq 40 \leq 60$

Según la revista M. DELVAC (2019) menciona que en una competencia de velocidad, la velocidad máxima alcanzada por un tráiler es de 130 km/h. Para la simulación se toma este valor de referencia considerando que está enfocado a la competencia de tráileres.

También existe las competencias del tráiler con contenedor que consiste en una prueba de habilidad y velocidad. Dicha prueba se denomina de resistencia Imal según el CLUB MOBIL DELVAC, en donde se alcanzan velocidades entre 90 km/h y 130 km/h (C. M. DELVAC, 2022).

2.2 Diseño y modelado de deflectores

Los deflectores son dispositivos aerodinámicos que se encargan de distribuir el flujo de aire a través de las paredes del vehículo. Su finalidad es reducir la resistencia que tiene el aire sobre el acoplamiento de carga, reduciendo la formación de flujos de aire que se pueden generar entre la cabina y el contenedor (Hucho, 1987).



Figura 2.2 Prototipo de primer modelo de deflector

Fuente: (Conner, 2015)

A partir de los estudios realizados por la agencia espacial estadounidense de la NASA, nacen los primeros diseños de deflectores implementados en un vehículo de alto tonelaje. El primer dispositivo aerodinámico fue elaborado en láminas de metal y colocado en la parte superior de la cabina, mostrado en la Figura 2.2. Como resultado de la implementación de estos dispositivos se obtuvo una mejora de la aerodinámica en los camiones, llevando a los fabricantes a generar nuevos diseños y mejoras en los vehículos de transporte de carga pesada.

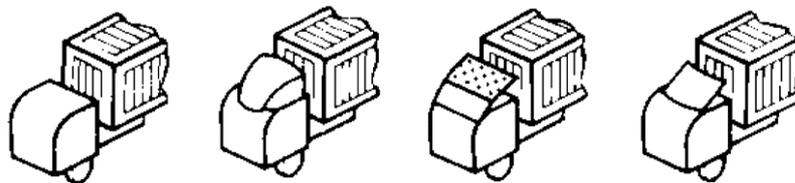


Figura 2.3 Tipos de deflectores

Fuente: (Hucho, 1987)

Desde la creación del primer prototipo de deflector, se ha incursionado en el diseño de múltiples modelos, los cuales se ubican en la parte superior de la cabina como se muestra en la Figura 2.3.

Los modelos de los deflectores pueden tener una forma muy variada y esto depende de la geometría del vehículo. Los modelos de los tráileres pueden ser del tipo americano o europeo, donde pueden tener el motor delante de la cabina o debajo de ella respectivamente. Esta configuración llega a determinar el modelo de deflector debido a que el ángulo de ataque puede tener un valor bajo o alto. La cabina del camión americano es más baja, por tal motivo el modelo de deflector necesita un mayor ángulo de ataque para cubra la parte posterior del acoplamiento de carga (Hariram et al., 2019).

2.2.1 Modelado en software CAD.

En la industria automotriz, el diseño asistido por computador ha tenido una gran influencia, debido a la alta variedad de productos y la demanda de nuevos diseños. Por medio de la tecnología CAD se pueden crear desde piezas que forman parte del vehículo hasta el diseño del mismo (Rojas & Salas, 1999).

El software más habitual para el diseño en el campo automotriz es SolidWorks. En dicho software se puede crear piezas sólidas que conforman el vehículo, hasta el diseño de la carrocería mediante la herramienta de superficies.

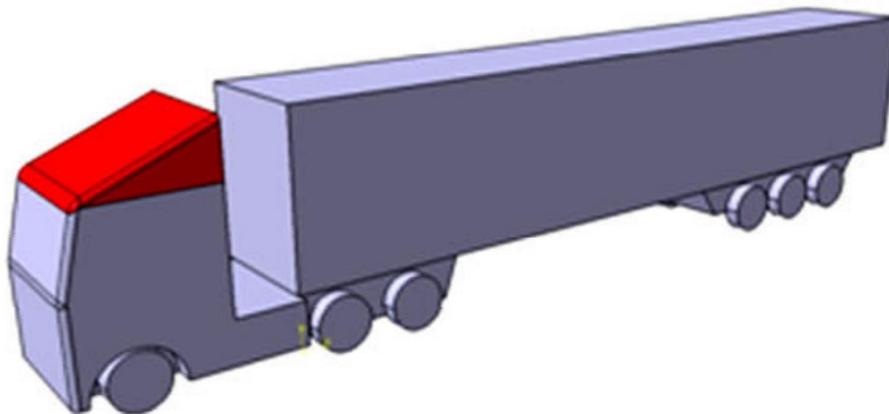


Figura 2.4 Modelado en software CAD

Fuente: (Hosravi et al., 2015)

El diseño del deflector inicia a partir del modelo CAD del vehículo donde constan las dimensiones reales del mismo. Esto con la finalidad de ajustar a la geometría del vehículo, como se muestra en la Figura 2.4.

2.3 Simulación Aerodinámica

La aerodinámica juega un papel fundamental en el vehículo, ya que influye en la reducción de la resistencia al avance. En la Figura 2.5, se evidencia que el fluido toma una trayectoria a través de un dispositivo aerodinámico implementado en el vehículo, impidiendo que el aire colisione con el acoplamiento de carga.



Figura 2.5 Aerodinámica Vehicular

Fuente: (Hucho, 1987)

La simulación de la aerodinámica estudia ciertas acciones y efectos que produce el aire en los vehículos que están en movimiento y la manera en que pueden llegar a ser optimizados. En este sentido, se llegan a identificar los diferentes flujos de aire que actúan de manera interna y externa, así como también las fuerzas aerodinámicas que se ejercen sobre la geometría de la carrocería. (Fraija, 2006).

2.3.1 Flujo.

Estudia el movimiento de un fluido donde intervienen las leyes de movimiento de la Física, las características del fluido y del medio o conducto por el cual fluye. El flujo puede estar relacionado al cambio de velocidad y dirección que sufren las partículas respecto al tiempo y por ello se pueden llegar a generar diferentes tipos de flujos (CENGEL, 2012).

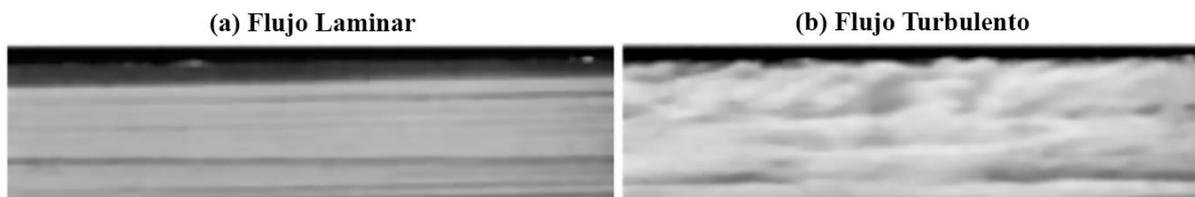


Figura 2.6 Tipos de flujos

Fuente: (Yanus & Yunus Cengel, 2006)

En la Figura 2.6 se detalla los tipos de flujo según el movimiento del fluido. En la Figura 2.6a se muestra el flujo laminar el cual se caracteriza porque el movimiento de sus partículas es suave y ordenado. El fluido se desplaza en láminas paralelas con una sola trayectoria y sin interponerse. En la Figura 2.6b se presenta un flujo desordenado denominado turbulento. Esto se llega a presentar a altas velocidades y en fluidos de baja viscosidad como el aire. El movimiento de las partículas forma pequeños remolinos periódicos donde la trayectoria puede ser impredecible y caótica.

2.3.2 Flujo del aire en el vehículo.

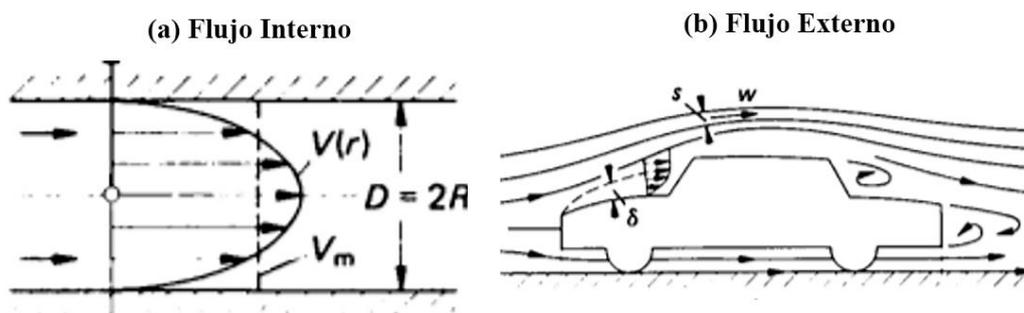


Figura 2.7 Flujo Externo

Fuente: (Hucho, 1987)

Se considera flujo interno al aire que ingresa al vehículo por medio de las entradas de aire de la carrocería. Cuya finalidad es la de refrigerar el compartimento del motor o ventilar habitáculo del mismo. Dicho flujo se muestra en la Figura 2.7a. En cambio, el flujo externo es todo el aire que circula a través de la carrocería como se muestra en la Figura 2.7b. Los factores que influyen en la trayectoria del flujo exterior son: el tamaño y la forma de la carrocería, la velocidad relativa del vehículo respecto al avance, la densidad del fluido y el tipo de superficie de la carrocería (Alba & Guangasi, 2018).

2.3.3 Dinámica de fluidos computacional (CFD).

La dinámica de fluidos computacional o en inglés conocido como Computational Fluid Dynamics (CFD), consiste en resolver todo tipo de problemas físicos que se relacionan con el movimiento de fluidos, esto con el uso de computadores y técnicas numéricas que facilitan el proceso de análisis. El uso de CFD se convirtió en una herramienta práctica al momento de realizar análisis de diseños aerodinámicos en donde principalmente se utilizan fluidos. Sin embargo, depende de los fenómenos que se puedan presentar y los métodos que pueda utilizar (Xamán, 2016).

2.3.4 Análisis CFD en el campo automotriz.

La industria aeroespacial inició con el estudio de dinámica de fluidos computacional, sin embargo, con estas herramientas no se lograba el perfeccionamiento de algunos procesos industriales. Hoy en día, gracias a la mejora de algoritmos se ha llegado a implementar en varias industrias, por ejemplo: la industria aeronáutica, naval, automotriz, de generación eléctrica, pesadas y metalúrgicas, química, electrónica, nuclear, entre otras.

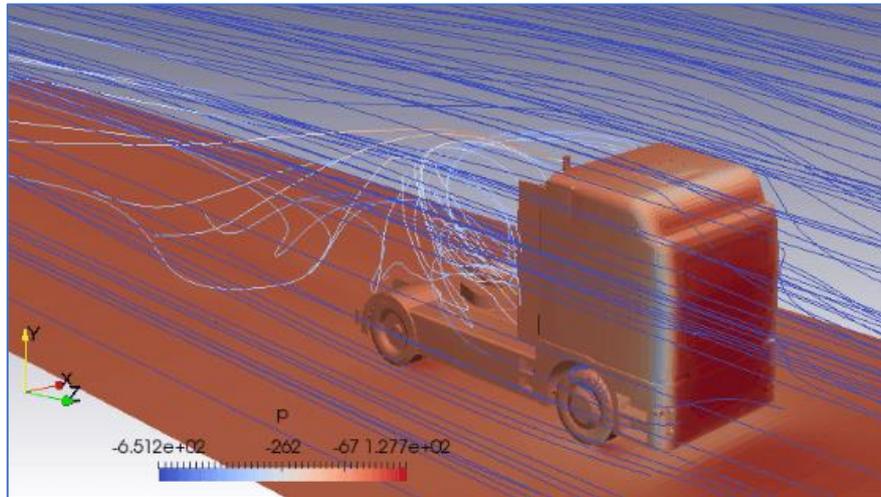


Figura 2.8 Análisis CFD de tráiler.

Fuente: (Crahmaliuc, 2021)

En la industria automovilística se ha vuelto de vital importancia el análisis CFD, en donde se realiza estudios aerodinámicos como se muestra en la Figura 2.8. Además, permite el estudio de la climatización del habitáculo interior, refrigeración de disco de frenos y bloque motor, entre otros aspectos, con la finalidad de reducir tiempo y costo en la creación de nuevos diseños (Oro, 2012).

2.3.5 Estructura de CFD.

En CFD se presenta una serie de partes que son fundamentales para resolver un problema, los cuales son: el preprocesamiento, procesamiento y el post procesamiento. La persona que desarrolla el software de simulación debe tener en cuenta este tipo de estructura, de igual manera tener conocimiento acerca de los fenómenos físicos, así como el desarrollo de algoritmos numéricos para generar resultados de acuerdo al campo de aplicación (Xamán, 2016).

2.3.5.1 Pre-Procesamiento.

El preprocesamiento consiste en la preparación de una cierta cantidad de condiciones para realizar el análisis del estudio. Como primer punto se define una geometría o dominio computacional que se lo importa desde un programa CAD. Se genera una malla del dominio computacional adecuada, se especifican las propiedades físicas del medio que se trabaja y se define las condiciones iniciales de frontera.

El modelado CAD se considera como la representación gráfica de un objeto físico, sobre el cual se plantean ciertos problemas con la finalidad de estudiarlo o mejorarlo. Se puede encontrar de manera simplificada y con las características establecidas del modelo real. En el modelo matemático se definen ecuaciones que representan el comportamiento y los fenómenos físicos.

2.3.5.2 Procesamiento.

Es la etapa en la que el software se encarga de dar la solución al problema por medio de modelos matemáticos. El tiempo de ejecución va a depender de la complejidad del modelo deseado y de la capacidad de procesamiento del computador.

En el procesamiento existen dos pasos: (1) *Discretización*, se define de esta manera cuando se realiza la sustitución de la ecuación o las ecuaciones diferenciales por un conjunto de expresiones algebraicas. (2) *Solución del sistema de ecuaciones diferenciales*, cuando el software mismo implementa un método de inversión de matrices para dar resultado al proceso de discretización, este proceso puede llevar diferentes tiempos de ejecución, dependiendo de la programación.

2.3.5.3 Post – procesamiento.

Es la etapa en la que se reúnen los datos obtenidos y generalmente se muestran por medio de gráficos. La visualización de los resultados es muy importante ya que de ello se obtendrán conclusiones del fenómeno físico que ocurre en este proyecto. En los resultados también se debe apreciar la malla numérica, los contornos, las líneas de flujo y campos de velocidad (Xamán, 2016).

2.3.6 Dominio computacional.

En el proceso de la creación del dominio computacional es muy importante considerar el tamaño de la caja en la que se encontrará el vehículo, los límites de los lados, la entrada y la salida deben estar alejados del modelo, debido a que el flujo de aire debe estabilizarse antes de entrar en contacto con el diseño de estudio.

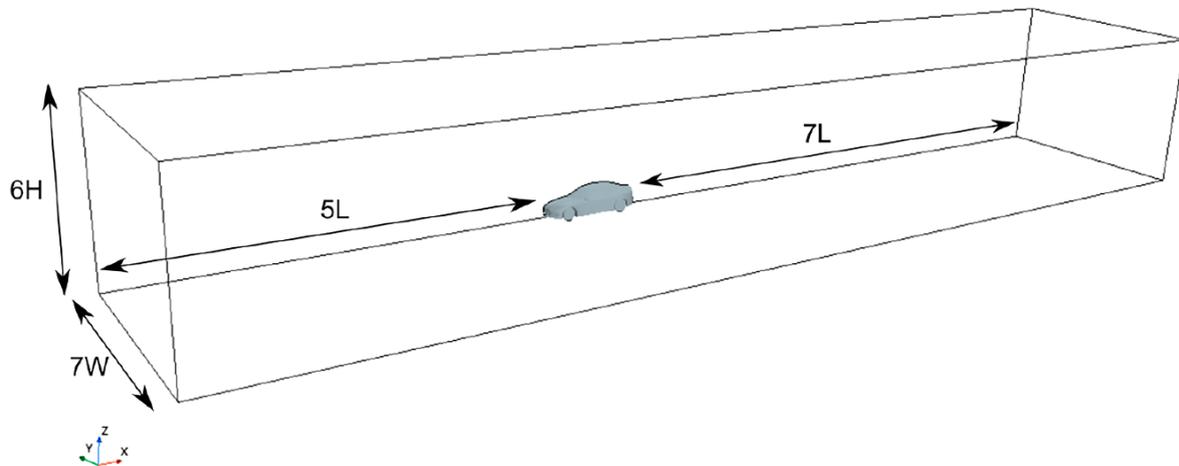


Figura 2.9 Dimensiones del dominio computacional

En la Figura 2.9 se muestra las dimensiones del dominio computacional que se utilizó en la investigación sobre el efecto en el consumo y autonomía de vehículos eléctricos. Donde: (L) corresponde a la longitud del vehículo, (W) el ancho y (H) a la altura. El tamaño del dominio asignado no influye en los resultados finales de la simulación, además que dichas dimensiones fueron establecidas en estudios posteriores donde realizan simulaciones en un fórmula SAE (Alegre Ituarte, 2022).

Según Careno et al. (2013) afirma que en los dominios de grandes dimensiones se requerirá mayor capacidad computacional o hardware y más tiempo de procesamiento, concluyendo que a mayor tamaño no influye en los resultados finales. Es decir, no es necesario sobredimensionar los túneles de viento.

2.3.7 Calidad malla.

La malla describe los puntos donde se van a resolver las ecuaciones de flujo, de esto también depende la precisión que tendrán los cálculos según el tipo y la calidad de malla que

se vaya a generar. El 70% del proceso de simulación CFD se dedica a generar una malla de buena calidad, dependiendo del rendimiento computacional que se tenga disponible.

(a) Skewness



(b) Orthogonal Quality

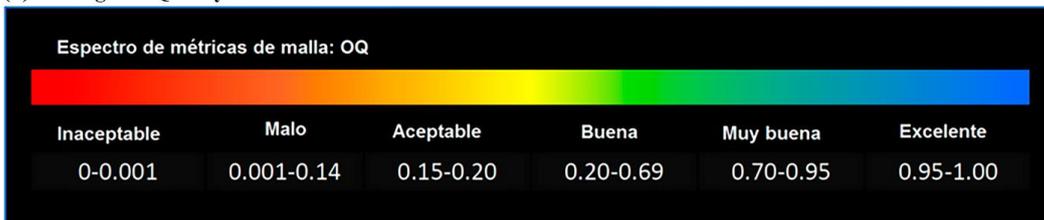


Figura 2.10 Calidad de malla

Fuente: (ANSYS, 2015)

La oblicuidad se encarga de medir la calidad de malla, indicando que tan cerca está una cara o un elemento de alcanzar su forma ideal. En la Figura 2.10a se observa los rangos en los cuales se puede medir la calidad de malla obtenida (Molina & Vilaña, 2018).

Orthogonal Quality se encuentra relacionada con la distancia que existe entre los ángulos y las caras de los elementos adyacentes con el fin de formar un ángulo óptimo. Esto da como resultado una evaluación de la calidad del mallado arrojando valores que varían entre 0 a 1 para su comparación como se muestra en la Figura 2.10b (Valencia Chávez, 2017).

2.3.8 Tipos de mallas.

2.3.8.1 Malla Tetraédrica.

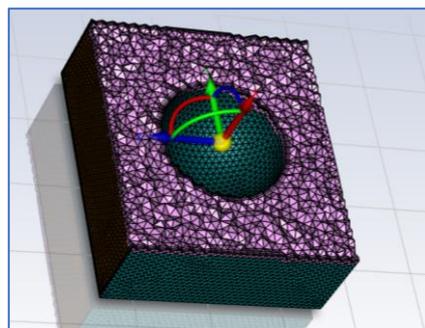


Figura 2.11 Malla Tetraédrica

Fuente: (ANSYS, 2015)

El uso de malla tetraédrica surgió a partir de la complejidad de las geometrías, la cual genera elementos tetraédricos haciéndolo de manera más sencilla. Sin embargo, la precisión de los resultados no ha sido la deseada, debido a que se necesita una mayor cantidad de tetraedros lo que conlleva a un mayor gasto computacional. En la Figura 2.11 se muestra un ejemplo de este tipo de malla (ANSYS, 2018).

2.3.8.2 Malla hexcore.

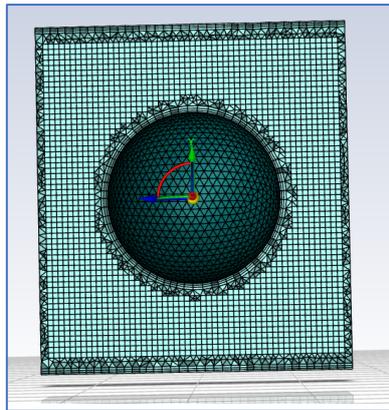


Figura 2.12 Malla hexcore

Fuente: (ANSYS, 2015)

Este tipo de malla fue creado con la finalidad de obtener resultados de mayor calidad respecto al mallado poliédrico. Hexcore llena la mayor cantidad de la geometría con mallas hexagonales octree. Sin embargo, tiene la desventaja que al momento de obtener los resultados los tiempos de solución son más extensos, mayor consumo de RAM, en consecuencia, necesita de mayor almacenamiento. En la Figura 2.12 consta un ejemplo de este tipo de mallado (ANSYS, 2015).

2.3.8.3 Malla Poliédrica.

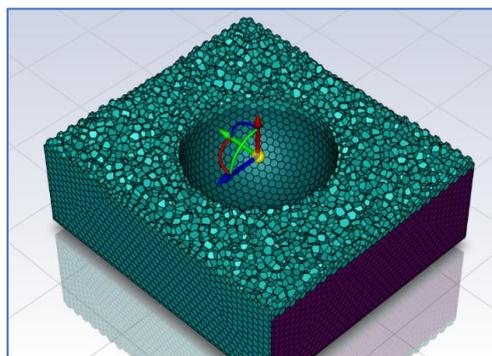


Figura 2.13 Malla Poliédrica

Fuente: (ANSYS, 2015)

En este tipo de malla cada una de las celdas tiene muchas conexiones, debido a esto los gradientes poseen una mejor aproximación. Son menos sensibles al estiramiento a comparación de los tetraedros, lo que resulta en una mejor calidad de malla con mejor estabilidad en el modelo. La malla tetraédrica se convierte en malla poliédrica mediante una descomposición de la celda en múltiples sub-volúmenes que posteriormente se ajustan y se fusionan con sus vecinas. Un claro ejemplo se muestra en la Figura 2.13 (Sosnowski et al., 2018).

2.3.8.4 Malla Poly hexcore.

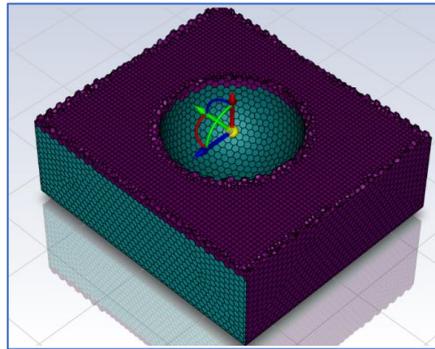


Figura 2.14 Malla Poly hexcore

Fuente: (ANSYS, 2015)

A comparación de la malla hexcore convencional, este tipo de malla tiene una mejor calidad y se caracteriza debido a que genera mayor velocidad para el solucionador, dependiendo de la aplicación. En CFD este tipo de mallado permite utilizar nuevas estrategias para resolver el flujo alrededor de geometrías complejas con mayor precisión y velocidad. Como ejemplo se muestra la Figura 2.14 (Krishna et al., 2019).

2.4 Propiedades de análisis

2.4.1 Coeficiente de arrastre (CD).

El coeficiente de arrastre es un número adimensional que define la resistencia que presenta un objeto a través del aire. En la industria automotriz el valor depende de varios factores, por ejemplo: la forma de la parte delantera del vehículo, inclinación del parabrisas, techo, laterales, bajos, remolques, entre otros (Prada, 2008).

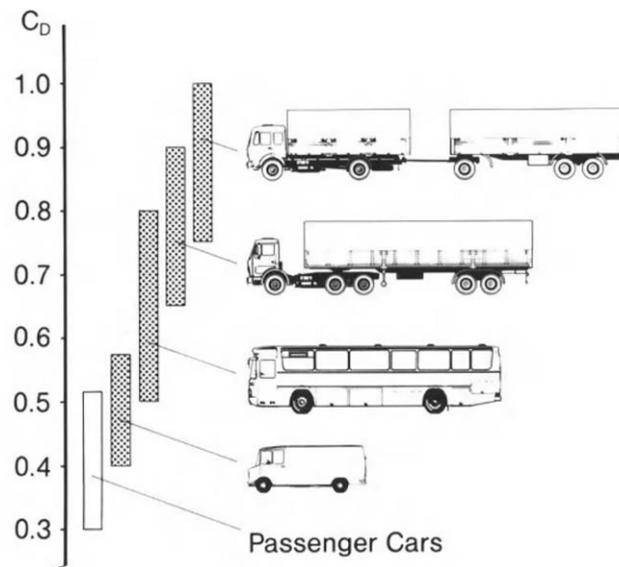


Figura 2.15 Coeficiente de arrastre de acuerdo al vehículo

Fuente: (Hucho, 1987)

En la Figura 2.15 se muestra el valor del coeficiente de arrastre que presentan los vehículos de acuerdo a su categoría. Donde los vehículos de pasajeros presentan los valores más bajos y los vehículos de carga pesada con doble acoplamiento de carga tienen valores cercanos a 1, siendo este el valor más alto.

Con el fin de mejorar la aerodinámica de los vehículos de carga pesada, nace la idea de implementar dispositivos aerodinámicos, los cuales impiden que el aire choque directamente sobre la carrocería del vehículo, obteniendo una reducción en el coeficiente de arrastre, el cual se obtiene por medio de la ecuación (1):

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

Donde:

C_D = Coeficiente de arrastre [adimensional]

F_D = Fuerza de arrastre

A = Área frontal [m^2]

ρ = Densidad del aire [kg/m^3]

v = Velocidad relativa entre el flujo de aire y el automóvil [m/s]

2.4.2 Número de Reynolds.

El número de Reynolds mostrado en la ecuación (2) se caracteriza por ser adimensional y se utiliza principalmente en mecánica de fluidos y transferencia de calor. Su finalidad es predecir el comportamiento del fluido para determinar si se trata de un flujo laminar o turbulento. Por ejemplo, para ser flujo laminar el valor es menor a 2000; si es mayor que 4000 este será turbulento. Cuando se obtiene valores entre estos números se denomina zona crítica, donde el flujo puede ser laminar o turbulento (Mott, 2006, p. 231).

$$R_e = \frac{vd\rho}{\mu} = \frac{vD}{\nu} \quad (2)$$

Donde:

Re=Reynolds

v=Velocidad media [m/s]

d=Radio de la tubería [m]

ν = Viscosidad cinemática del fluido [m²/s]

ρ = Densidad del fluido [Kg*s/m⁴]

μ = Viscosidad absoluta [Kg*s/m²]

2.4.3 Presión.

El flujo de aire que se ejerce sobre la superficie del vehículo genera zonas de presión en las diferentes paredes. A medida que la velocidad aumenta se genera mayor presión, influyendo en la resistencia aerodinámica generada. Además, la geometría del vehículo es fundamental en el aumento o disminución del valor de la presión (Frajia, 2006).

En este caso para obtener la presión que se genera en el tráiler se utiliza la siguiente fórmula:

$$P = \frac{F}{A} \quad (3)$$

Donde:

P = Presión del aire [Pa]

F = Fuerza de resistencia al avance [N]

A = Área frontal [m²]

2.4.4 Fuerza de resistencia a la rodadura.

Una de las fuerzas que se opone al movimiento del vehículo es la resistencia a la rodadura que actúa al momento en que las ruedas se encuentran en contacto con la calzada. Esta fuerza se relaciona con el coeficiente a la rodadura que depende del tipo de vehículo y las condiciones de suelo en las que se encuentra (Tobar & Torres, 2017).

$$R_x = fr * M * g * \cos\theta \quad (4)$$

Donde:

fr = Coeficiente de rodadura [adimensional]

M = Masa del vehículo [kg]

g = Gravedad [m/s²]

θ = Pendiente [grados]

2.4.5 Fuerza de resistencia a la pendiente.

Este tipo de fuerza se relaciona con la masa del vehículo y el ángulo de inclinación que tiene la calzada. Una parte del peso se encuentra en sentido contrario a la marcha lo que ocasiona una fuerza opuesta a la propulsión o tracción del vehículo (Tobar & Torres, 2017).

$$R_g = M * g * \text{Sen}\theta \quad (5)$$

Donde:

R_g = Fuerza de resistencia a la pendiente [N]

M = Masa del vehículo [kg]

g = Gravedad [m/s²]

θ = Pendiente [grado]

CAPÍTULO III

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Normativa y Reglamentación

De acuerdo con la normativa ecuatoriana 2656 correspondiente a Clasificación Vehicular, el tráiler Kenworth T800 pertenece a la subclase N3, de clase Tracto Camión, el cual es un vehículo destinado para apoyo y arrastre de unidades de carga.

El Ministerio de Transporte y Obras Públicas define las dimensiones máximas que puede tener un tráiler para la correcta circulación en cualquier condición que se encuentre. Para esto se aplican condiciones de medida como el largo, ancho y alto máximo permitido, incluyendo los diferentes dispositivos aerodinámicos que pueden llegar a modificar dichas dimensiones.

La norma ISO 612:1978 menciona que el ancho de un vehículo está limitado entre dos planos paralelos que tocan a ambos lados. Se tomarán en cuenta cualquier tipo de pieza fija, sin embargo, no se tomarán en cuenta los espejos retrovisores, cualquier tipo de luces o guardabarros flexibles. En cuanto a la altura, se tomará como referencia el plano horizontal que toca la parte superior e inferior del vehículo, tomando en cuenta dispositivos fijos que se encuentren en el mismo.

Al no existir una normativa específica para la regularización de deflectores en vehículos de transporte pesado, se ha optado por tomar las dimensiones permitidas de circulación en la vía. Con respecto a la altura de los vehículos de transporte pesado, no se debe sobrepasar el límite establecido de 4.10 m, esta medida incluye los dispositivos aerodinámicos que se colocan en la parte superior de la cabina. El ancho de los deflectores es igual al de la carrocería del vehículo, por lo tanto, no existe modificación en la medida.

3.2 Modelado 3D/CAD

Para iniciar con el proceso de diseño se utiliza el software SolidWorks, en el cual se modela en croquis 2D y 3D, con el uso de la herramienta de Superficies. Al ser un modelado por medio de superficies, se debe tener en cuenta que todas las partes se encuentren unidas entre sí. Aunque parezca imperceptible, no se podrá generar el túnel de viento y también afectará la calidad de mallado debido a que las superficies no han sido cerradas correctamente.

3.2.1 Proceso de modelado del tráiler.



Figura 3.1 Tráiler T800

Fuente: (Kenworth, 2018)

En la Figura 3.1 se muestra el tráiler Kenworth T800, el cual es un vehículo de carga pesada diseñado para realizar trabajos de transporte de grandes magnitudes y es apto para recorrer largas distancias. Sin embargo, ha sido utilizado para realizar competencias de velocidad debido a la alta potencia que es capaz de generar (Kenworth, 2018)

Según la empresa INDUSUR, encargada de la comercialización de vehículos marca Kenworth, asegura que el modelo T800 es el tráiler más vendido debido a su potencia confiable, gran capacidad de carga, fácil mantenimiento y un eficiente rendimiento (INDUSUR, 2020).

La selección de este tráiler se debe a que es uno de los más vendidos, por lo tanto, uno de los más utilizados en el país. Para este modelo se pretende diseñar un deflector que le ayude a mejorar su aerodinámica disminuyendo el coeficiente de arrastre. Existe otro modelo de similares características que incluye un deflector proveniente de fábrica, con el cual se pretende realizar una comparativa para determinar si es más factible la implementación de deflectores.

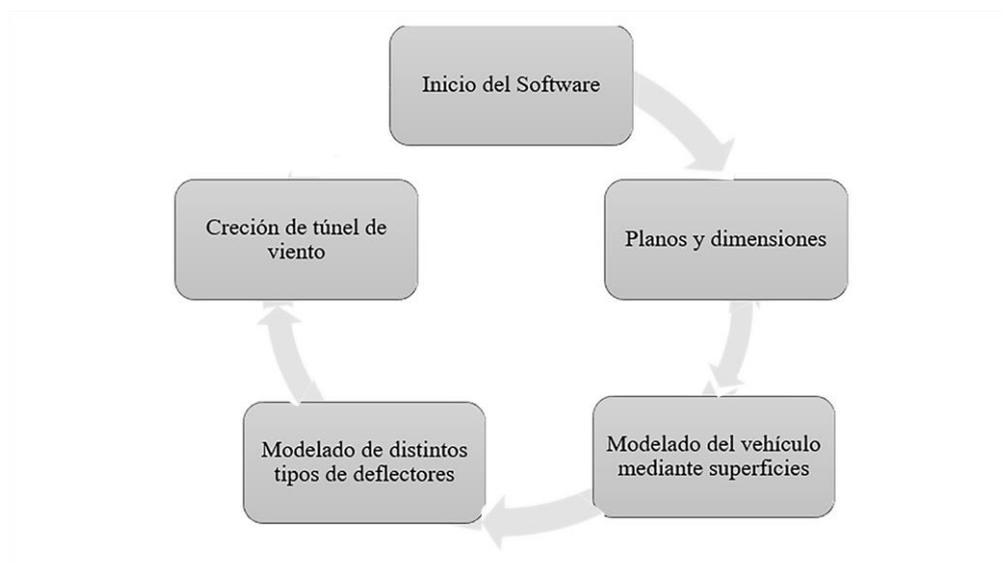


Figura 3.2 Proceso de modelado en SolidWorks.

En la Figura 3.2 se indica el proceso de modelado del tráiler y sus deflectores con su respectivo túnel de viento.

Para el proceso de diseño del tráiler es necesario tener las medidas y los planos del modelo, detallados en la Tabla 3.1, donde se muestran las dimensiones necesarias para el modelado del vehículo.

Tabla 3.1 Medidas del tráiler Kenworth T800

CARACTERÍSTICAS	MEDIDAS (mm)
Anchura (Con espejos)	2870.2
Anchura (Sin espejos)	1833.88
Ancho vía delantera	2100.58
Ancho vía trasera	1899.92
Batalla	4597.4
Longitud total	8589.4
Altura	3082.8

Fuente: (Company, 2012)

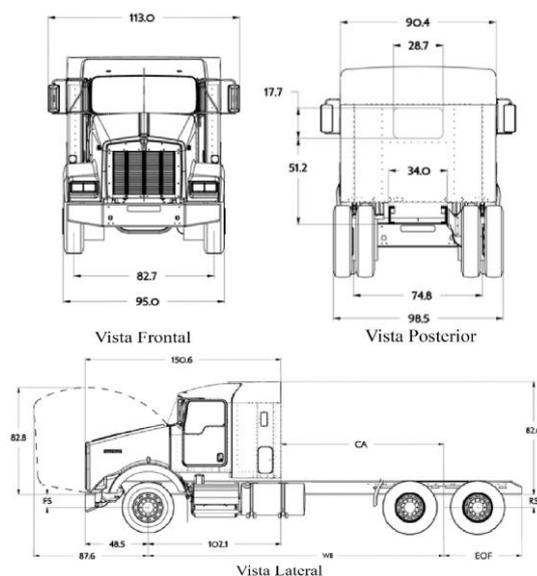


Figura 3.3 Planos en 2D del tráiler.

Fuente: (Company, 2012)

En la Figura 3.3 constan los planos que fueron obtenidos del catálogo del fabricante, los cuales son importados como imagen al software SolidWorks. Es necesario tener dos o más vistas, las que deben ser insertadas en los distintos planos, como son: lateral, alzado y posterior.

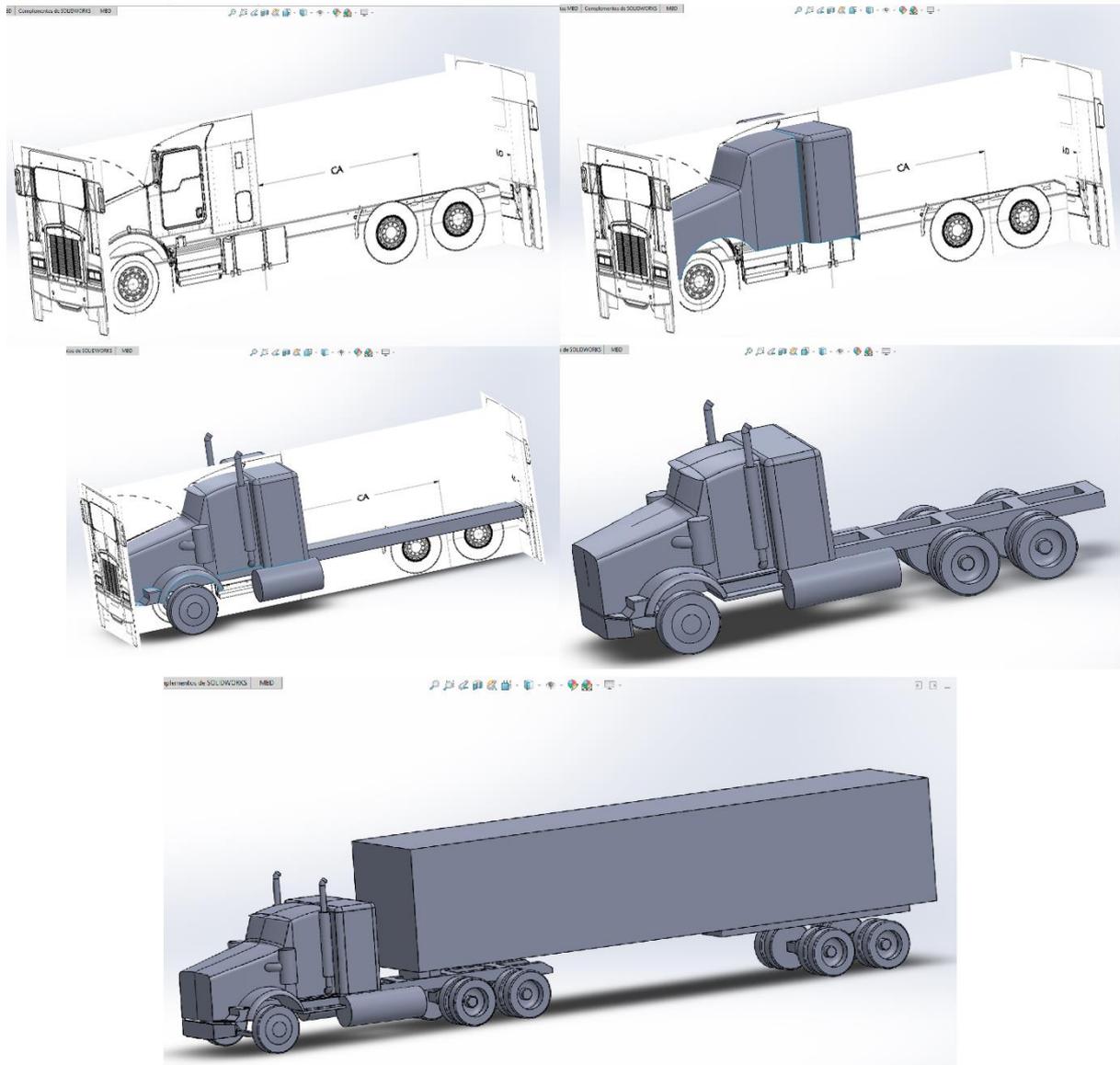


Figura 3.4 Modelado del tráiler en el software CAD

En la Figura 3.4 se muestra el proceso de modelado del tráiler. Donde se inicia con la ubicación de los diferentes planos en las vistas: lateral, alzado y posterior, con sus respectivas dimensiones. Luego con la herramienta de superficies y proyección de curvas se da forma al vehículo. Al final, se obtiene el modelo CAD lo más similar posible con la realidad y de esta manera obtener resultados confiables.

3.2.2 Proceso de modelado de los deflectores.

Según un estudio realizado, el ángulo de ataque ideal para un deflector de un camión europeo es de 19.6° . En caso de aumentar, el coeficiente de arrastre también lo hará, ya que la presión no se distribuye de manera correcta sobre la superficie de circulación y aumenta la resistencia por el flujo de aire (Hosravi et al., 2015).

Sin embargo, el ángulo de ataque puede variar dependiendo el modelo del tráiler, ya sea de tipo europeo o americano. Los deflectores de origen americano no solo aplican ángulos de ataque, sino también se aplica los radios de curvatura según su diseño (Hjelm & Bergqvist, 2009).

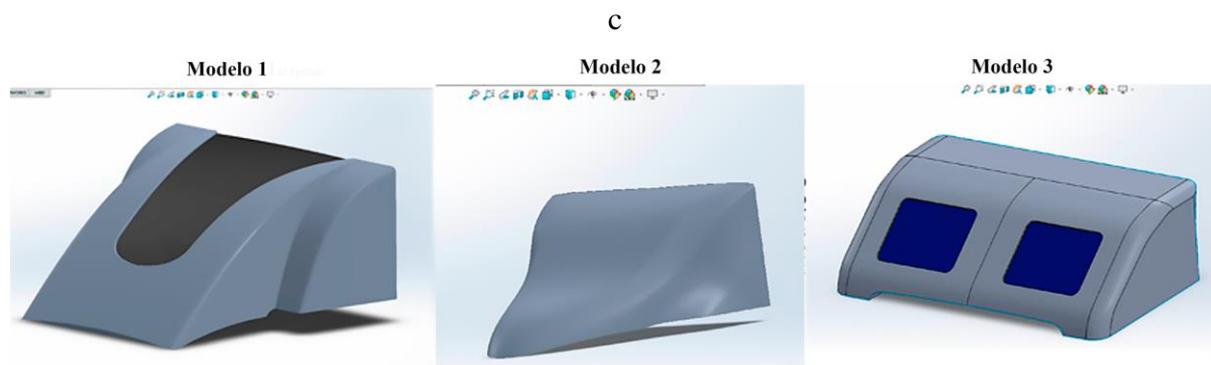


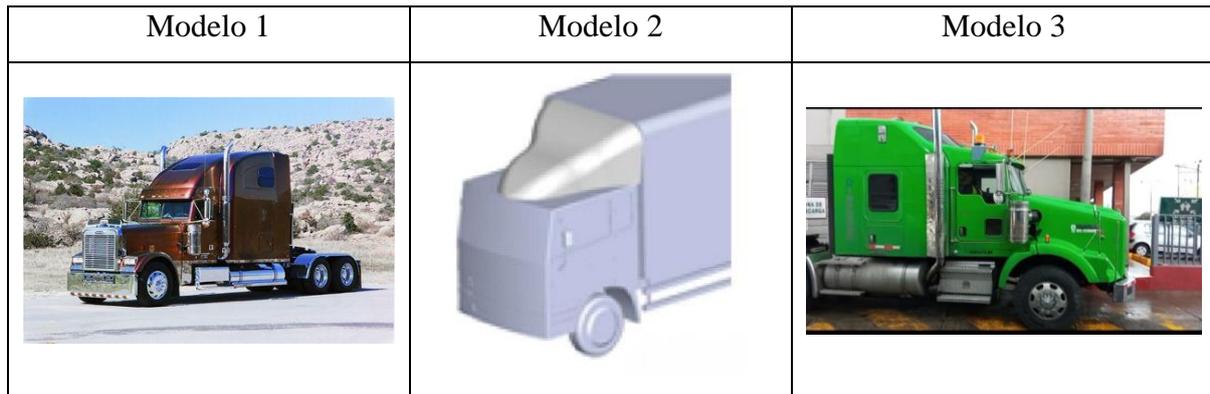
Figura 3.5 Diseño de deflectores

El diseño de los deflectores que se muestran en la Figura 3.5, han sido realizados en base a modelos de otras marcas de vehículos, como se muestra en la Tabla 3.2.

El primer modelo ha sido elaborado tomando como referencia el tráiler Freightliner Classic XL, el cual cuenta con un deflector superior que cubre en su totalidad el techo del vehículo. Respetando la forma del deflector, se adapta a la geometría del tráiler Kenworth T800.

El segundo modelo ha sido realizado en base a un estudio donde se analiza el comportamiento de los seres vivos, especialmente de un lobo marino, el cual tiene un cuerpo aerodinámico de acuerdo a sus características morfológicas para una mejor adaptación en su entorno.

El tercer modelo es una adaptación que pertenece al tráiler Kenworth T800 Aerocab, el cual tiene un deflector superior que forma parte del camarote del vehículo. Es decir, forma un solo cuerpo con la carrocería y no se puede desmontar.

Tabla 3.2 Modelos de referencia

En la Tabla 3.3 se muestra los ángulos respectivos de los diferentes modelos de deflectores ya diseñados, tomados previamente del software de diseño.

Tabla 3.3 Ángulos de ataque de los modelos de deflectores

Deflector	Ángulo
Modelo 1	42.11°
Modelo 2	48.73°
Modelo 3	38.64 °

3.2.3 Proceso de modelado del túnel de viento.

Según Carengo et al., (2013) el diseño de túneles de viento de grandes dimensiones no influye sobre los resultados, sino que aumenta el tiempo de cálculo, generando un mayor gasto computacional.

Además Anbarci et al., (2013) establece sus propias medidas para el túnel de viento según el tamaño del vehículo al cual está analizando, dando como resultado 0.8 % de error entre las diferentes medidas utilizadas.

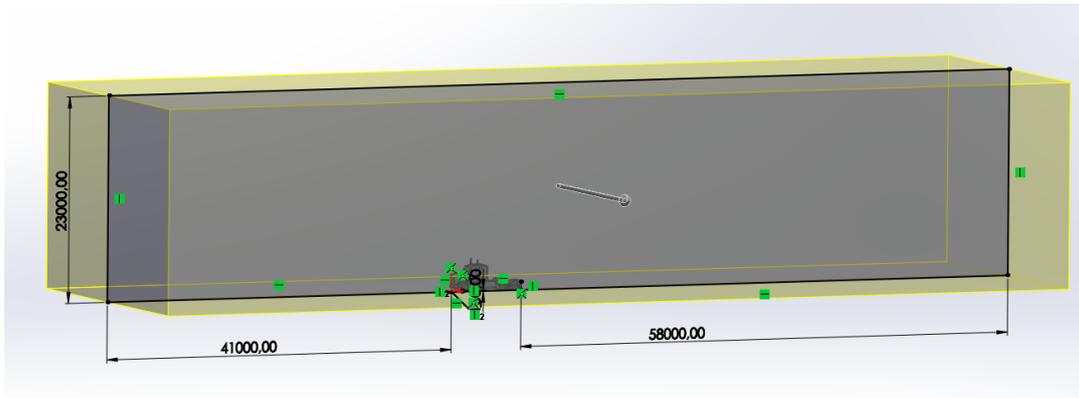


Figura 3.6 Diseño de túnel de viento para tráiler

En la Figura 3.6 se muestran las dimensiones del túnel de viento para el tráiler sin contenedor que son: 107 metros de largo, 23 metros de alto y 35 metros de ancho. Además, se detalla que el tráiler se encuentra a 41 metros de la entrada por donde va ingresar el fluido.

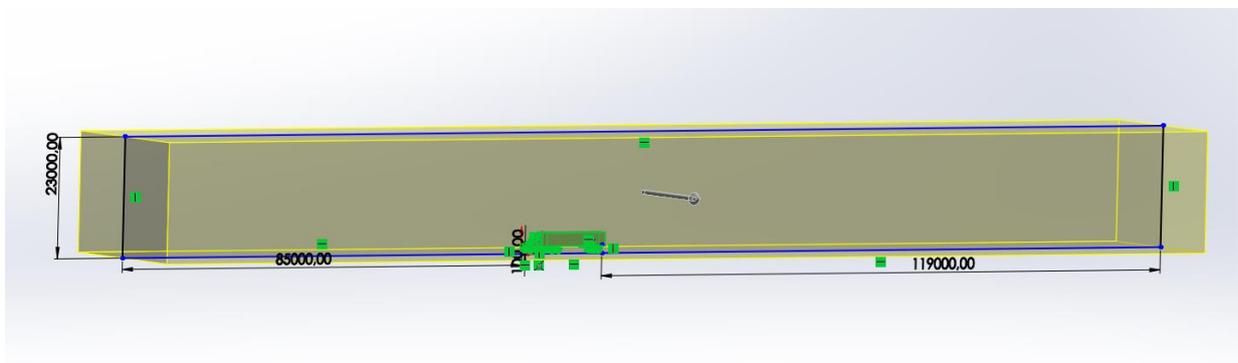


Figura 3.7 Diseño de túnel de viento para tráiler con contenedor

En el diseño del túnel de viento para el tráiler con el acoplamiento de carga, se establecen las dimensiones que se muestran en la Figura 3.7. Dichas medidas son: 23 metros de alto, 221 metros de largo, 35 metros de ancho. El tráiler se encuentra a 85 metros de la superficie por donde va a ingresar el aire.

En la Tabla 3.4 se muestran las medidas del túnel de viento según sea la condición, con contenedor y sin el mismo. Estas medidas fueron establecidas de acuerdo a las dimensiones del vehículo, tomando como referencia la Figura 2.9 correspondiente a un estudio previo.

Tabla 3.4 Dimensiones del túnel de viento

Dimensión	Tráiler sin contenedor	Tráiler con contenedor
Largo (m)	107	221
Alto (m)	23	23
Ancho (m)	35	35

3.3 Proceso de simulación CFD

El proceso de simulación CFD se desarrolla mediante el software ANSYS, con el módulo de Fluent With Fluent Meshing, el cual permite realizar estudios dinámicos relacionados con fluidos. Además, genera un mallado eficiente y de buena calidad, para obtener mejores resultados. El estudio permite: la importación de la geometría, condiciones de frontera, validación de malla y condiciones de borde.

3.3.1 Importación de la geometría.

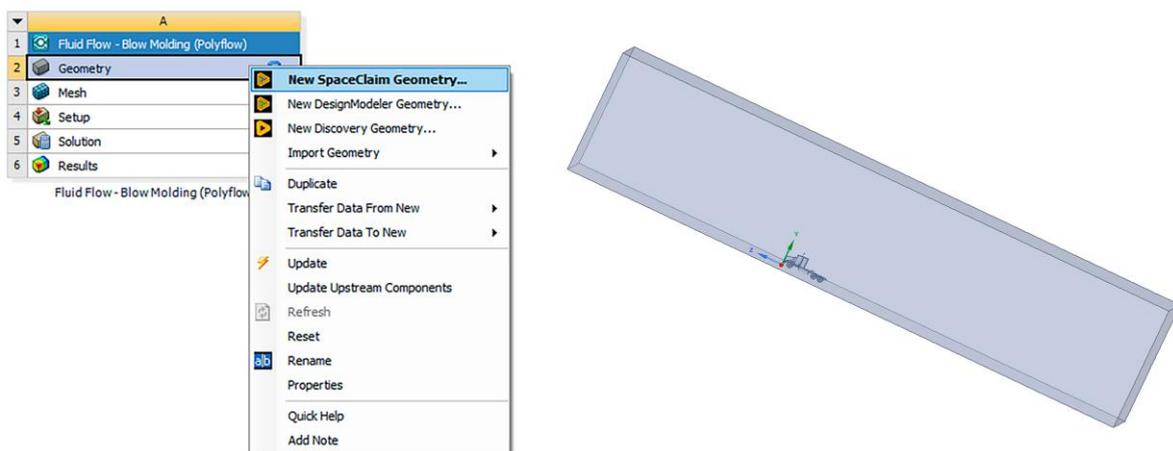


Figura 3.8 Importación de geometría

En la Figura 3.8 consta el proceso de importación de la geometría al software ANSYS desde SolidWorks, dicho documento debe ser guardado como parasolid o también denominado formato (x_t). Luego será abierto en SpaceClaim como se muestra en la imagen.

3.3.2 Asignación de entrada y salida.



Figura 3.9 Área de entrada y salida del fluido

La Figura 3.9 muestra las áreas por donde va a ingresar y evacuar el aire. En el dominio computacional el área de color amarillo es por donde va a ingresar el aire y se encuentra frente

al vehículo, la cual se denomina “Entrada”. El área de color anaranjado se encuentra ubicada en la parte posterior del tráiler y se denomina “Salida”.

3.3.3 Generación de malla.

Se denomina malla a la capa formada por líneas y nodos que forman figuras tetraédricas y se visualizan sobre los objetos de estudio. En el proceso de simulación es muy importante garantizar la calidad de mallado, debido a que se relaciona directamente con los resultados del estudio.

Para la verificación de la calidad de malla se utiliza dos herramientas de medición, las cuales son: 1) Skewness: mide la calidad de malla de superficie y 2) Orthogonal Quality mide la calidad de malla de volumen. Los resultados del mallado son arrojados por el software de simulación y comparados de acuerdo a la Figura 2.10, donde se determina si la malla es (inaceptable, mala, aceptable, buena, muy buena y excelente) de acuerdo a los valores obtenidos entre 0 y 1.

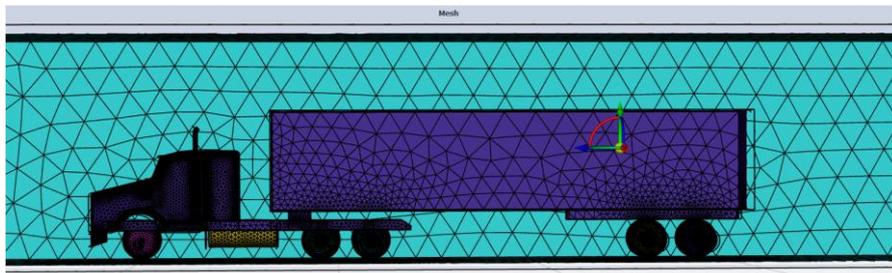


Figura 3.10 Malla de superficie

En la Figura 3.10 se muestra el resultado de la malla de superficie en la cual se podrá verificar el valor de Skewness.

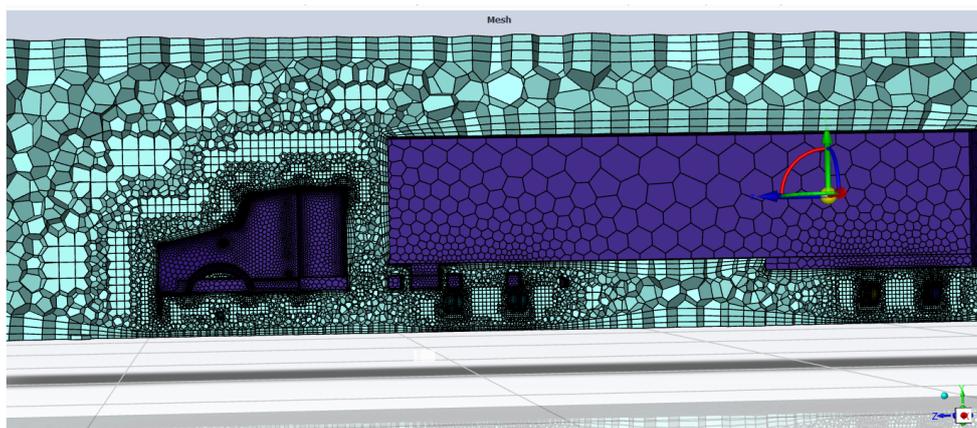


Figura 3.11 Malla de volumen

La Figura 3.11 se puede observar el resultado de la malla de volumen, del cual se puede obtener el valor de Orthogonal Quality.

3.3.3.1 Validación de malla.

dead7	0	0.058184148	0.54768961	1568
dead8	0	0.040664878	0.59657639	4016
dead9	0	0.043467575	0.59075264	3966
dead10	0	0.046891628	0.59887696	9332
dead11	0	0.043191672	0.59979308	3990
dead12	0	0.041823895	0.59779328	4014
dead13	0	0.041165731	0.58929975	3966
dead14	0	0.043174555	0.59992718	4014
dead15	0	0.041853704	0.57526204	3976
dead16	0	0.046247382	0.59940076	9366

name	skewed-cells (> 0.60)	averaged-skewness	maximum-skewness	face count
fff-solid1	0	0.040411509	0.59992718	139422

----- After Surface mesh, the model consists of 1 fluid/solid regions and 17 voids.

----- Surface Meshing of FFF complete in 0.23 minutes, with a maximum skewness of 0.60.

Figura 3.12 Resultado calidad de malla Skewness

La calidad de malla según el criterio de Skewness es fundamental para la obtención de resultados confiables, en la Figura 3.12 se tiene un promedio de 0.04, lo que significa que la malla es “excelente”. La Figura 2.10a muestra los rangos de calificación según el valor obtenido, en donde los valores cercanos a 0 determinan una calidad de malla confiable.

name	id	cells (quality < 0.10)	minimum quality	cell count
fluid_2	1886	0	0.22232326	5252
solid1	102	0	0.2001966	626787

name	id	cells (quality < 0.10)	minimum quality	cell count
Overall Summary	none	0	0.2001966	632039

Figura 3.13 Resultado calidad de malla Orthogonal Quality

Otra forma para verificar la calidad de mallado es por medio del criterio de Orthogonal Quality. En la Figura 3.13 se observa un valor mínimo de 0.2, lo que significa que la malla está en el rango de “Buena”. Dicha valoración se da en base a la Figura 2.10b.

3.3.4 Condiciones de borde.

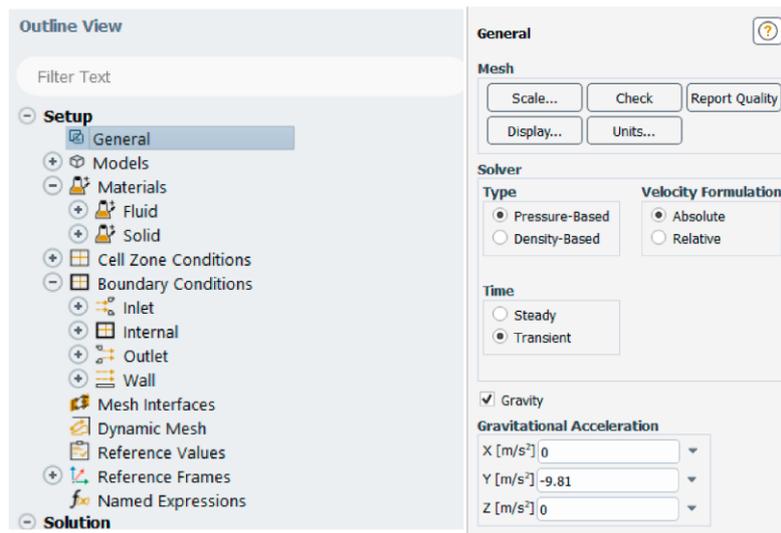


Figura 3.14 Configuración de forma general

En la opción de “General”, se selecciona el tiempo transitorio como se indica en la Figura 3.14, esto con la finalidad de obtener resultados con mayor veracidad, debido a que en el estado estacionario los resultados no varían en el tiempo. En el estado transitorio se obtienen resultados que cambian a medida que el tiempo varía. Sin embargo, el tiempo seleccionado requiere de mayor gasto computacional. Además, se ingresa la gravedad con un valor de $-9,81 \text{ m/s}^2$ en el eje “y”, de acuerdo con la posición del diseño.

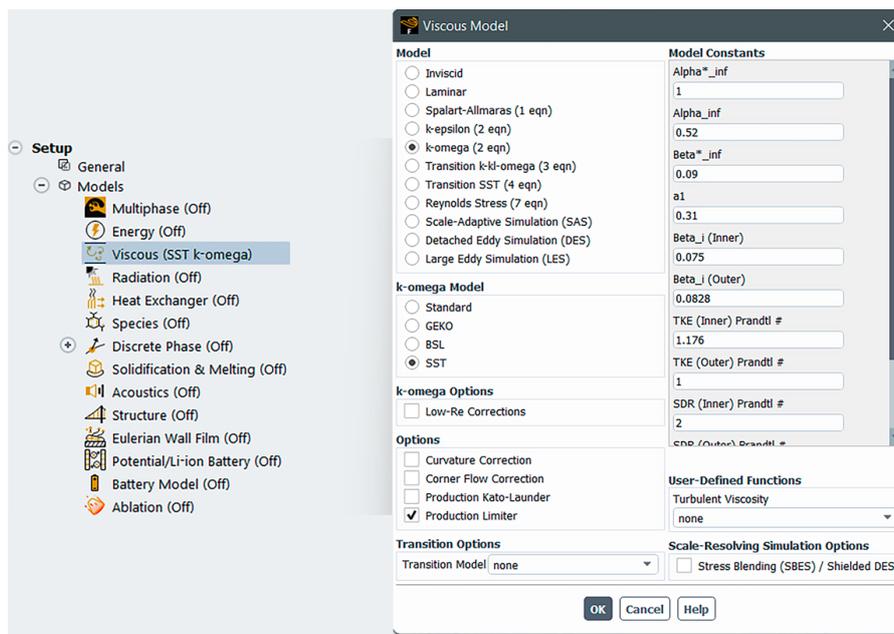


Figura 3.15 Selección del modelo de viscosidad

Se selecciona el modelo de viscosidad k-omega como se indica en la Figura 3.15, debido a que es un modelo el cual trabaja bajo condiciones turbulentas y resuelve los parámetros de turbulencia muy cercanos a la pared.

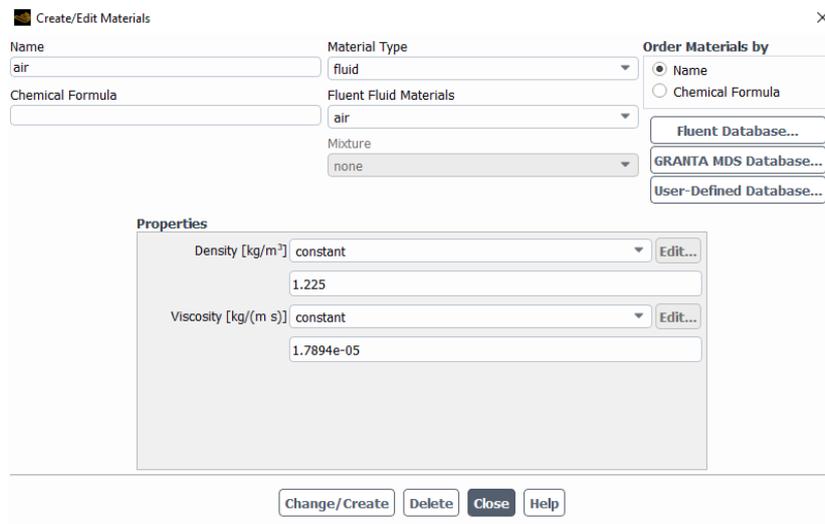


Figura 3.16 Propiedades del fluido

En la Figura 3.16 se muestra las propiedades del aire en condiciones ideales, las cuales son a 1 atm y a una altura sobre el nivel del mar. Es decir, a una densidad de 1.225 kg/m^3 . Sin embargo, es necesario realizar una nueva simulación a una altura de 2850 msnm, correspondiente a la ciudad de Quito, con una densidad de 0.8696 kg/m^3 .

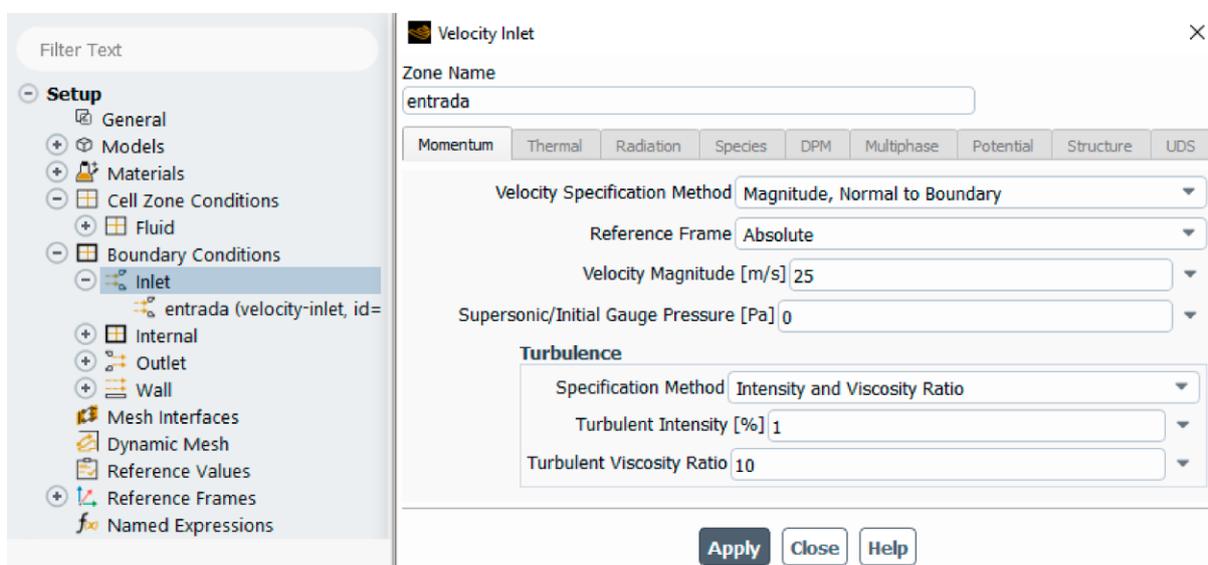


Figura 3.17 Condiciones de entrada a 90km/h

En la Figura 3.17 se indica una velocidad de 25 m/s o lo que es equivalente a 90km/h. En el caso de la intensidad de turbulencia se selecciona el valor de 1, debido a que es un túnel de viento sin condiciones complejas. Es decir, no se toma en cuenta intercambios de calor o flujo rotativo en las paredes del mismo.

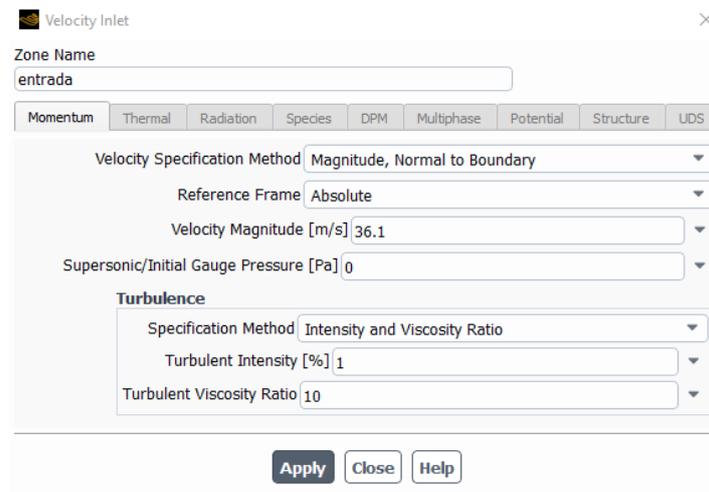


Figura 3.18 Condiciones de entrada a 130km/h

En la Figura 3.18 se ingresa la velocidad por la superficie que se estableció como la entrada en el dominio computacional, la cual tiene un valor de 36.1 m/s o lo que equivale a 130 km/h.

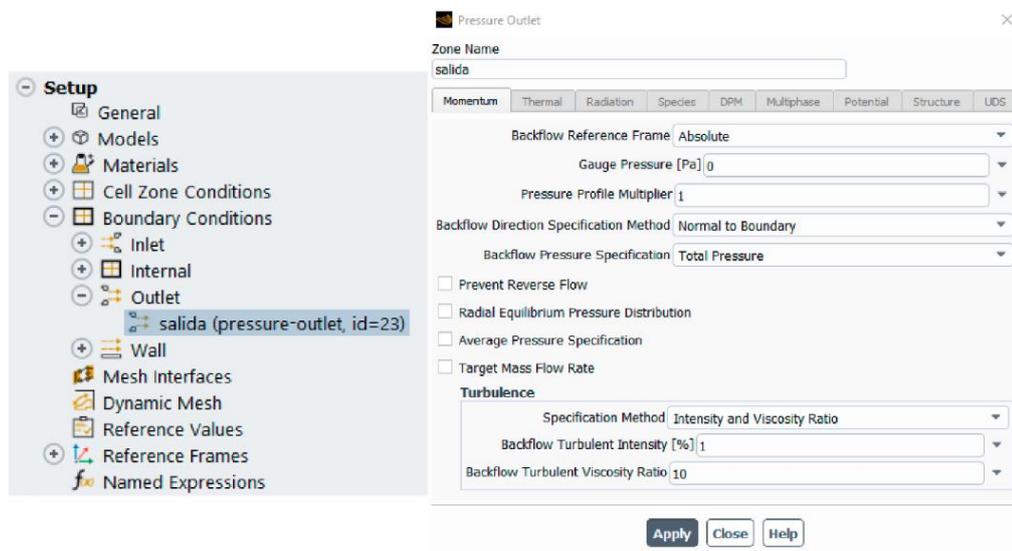


Figura 3.19 Parámetros de presión como condición de salida

En la Figura 3.19 en la intensidad de turbulencia se cambia a 1, puesto que el túnel no tiene configuraciones complejas.

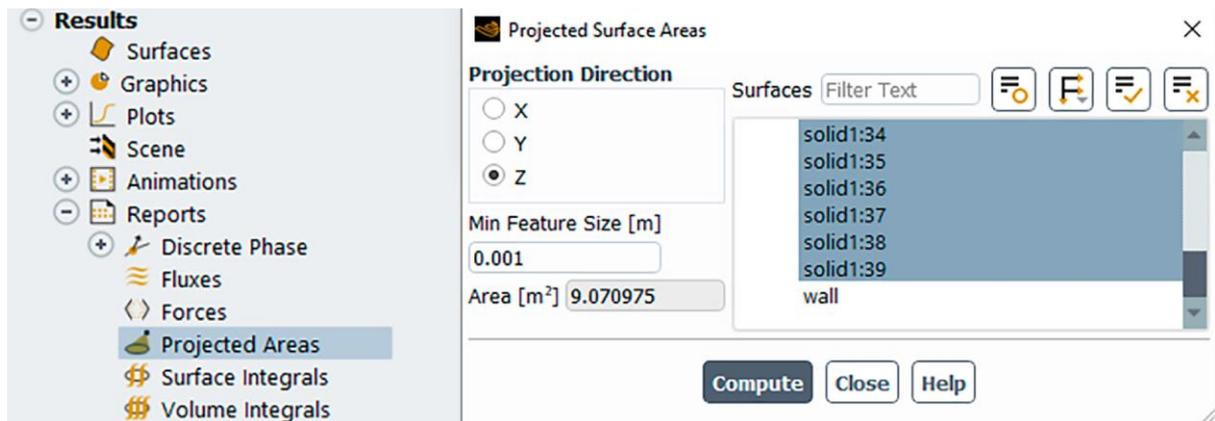


Figura 3.20 Área frontal del tráiler

Para calcular el área frontal del vehículo se utiliza la herramienta de Proyección de áreas. Mediante los resultados se obtiene una proyección de las caras en diferentes ejes, seleccionando el eje “z” que pertenece a la proyección de la cara frontal y generando el resultado del área en metros cuadrados como se muestra en la figura 3.20.

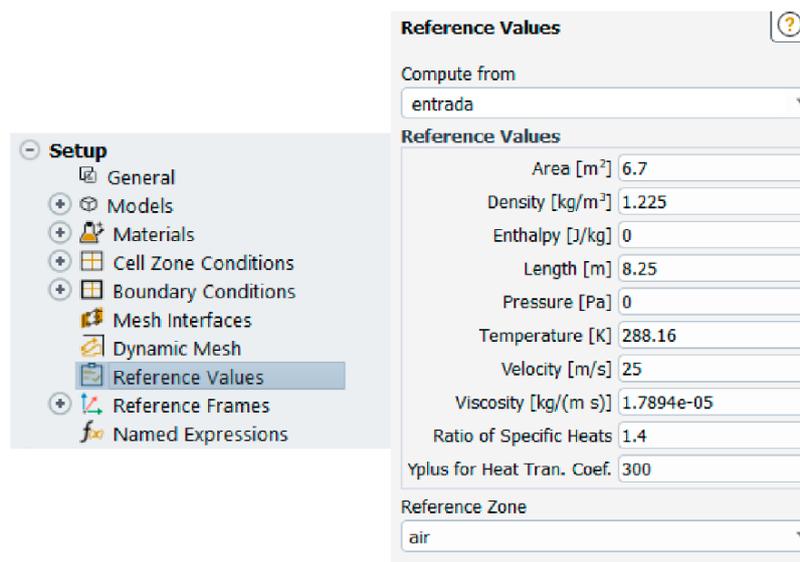


Figura 3.21 Valores de referencia dimensional del vehículo

En la Figura 3.21 se ingresan los valores de las características del vehículo, como son: área frontal, longitud total, donde se debe verificar que la velocidad y densidad estén de acuerdo a los valores ingresados anteriormente. Se selecciona la zona donde se va iniciar el cálculo, en este caso es la entrada.

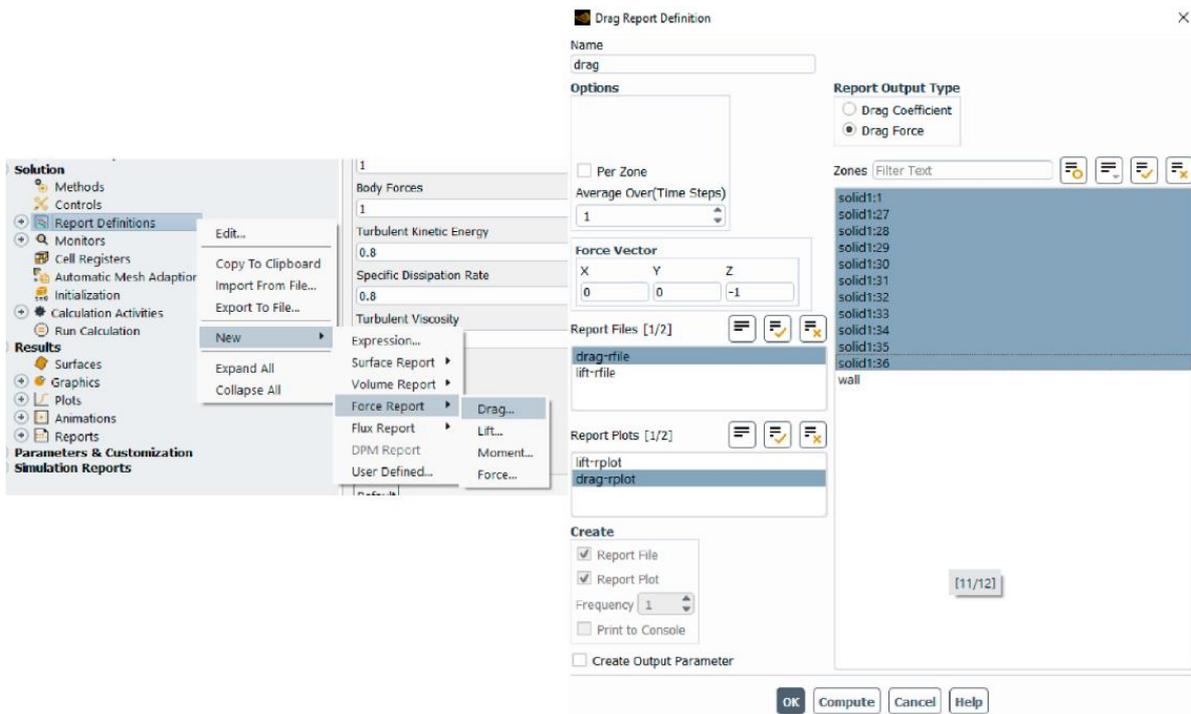


Figura 3.22 Configuración para la obtención de la fuerza de arrastre

Para obtener el resultado de la fuerza de arrastre se crea una nueva configuración siguiendo los pasos que se indican en la Figura 3.22. Se seleccionan todos los sólidos que conforman el modelo del vehículo. Se configura la dirección del vector de fuerza dependiendo de la posición de la geometría, en este caso con dirección al eje Z negativo con un valor de -1.

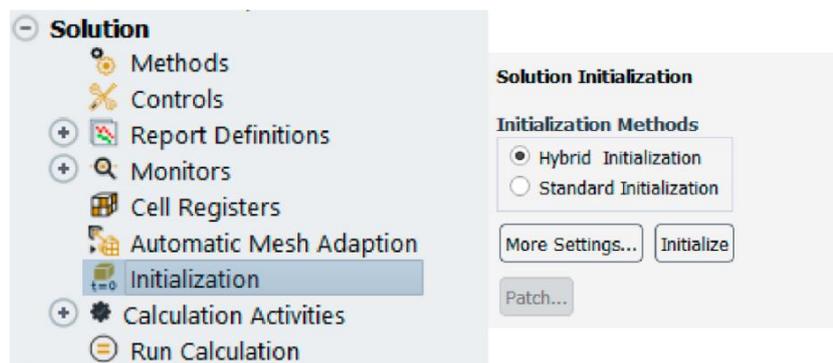


Figura 3.23 Selección del método de inicialización

En este apartado se selecciona la forma de inicialización Hybrid, como se indica en la Figura 3.23. Esta forma optimiza y acelera el cálculo en general, debido a que resuelve una serie de iteraciones con resultados más simplificados llegando a tener una mejor estimación de las variables de flujo.

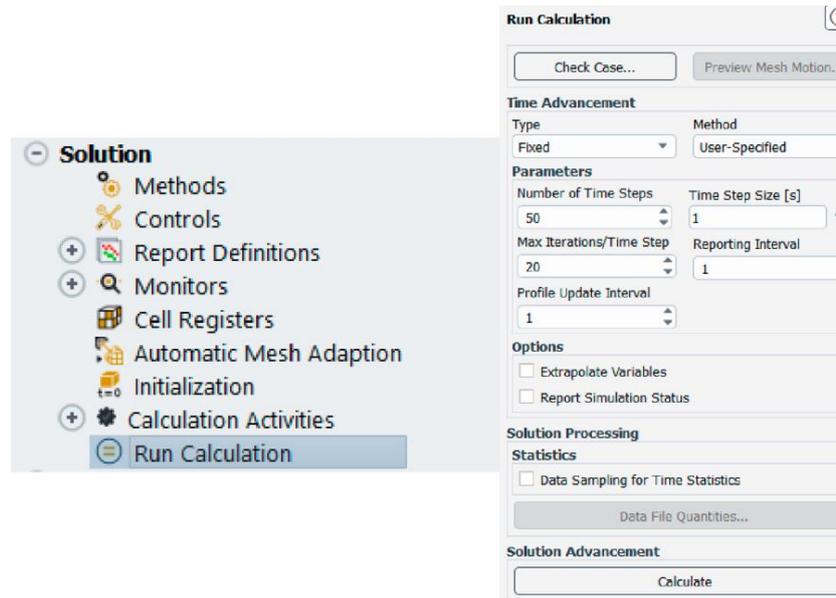


Figura 3.24 Ejecución del estudio

Para finalizar con las configuraciones de la simulación, se añade el número de iteraciones con las que se va ejecutar el análisis. En el estudio se establecen 50 iteraciones por cada segundo como se indica en la Figura 3.24 y finalmente se selecciona la opción “Calculate”.

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados a partir de la simulación aerodinámica del tráiler y el acoplamiento de carga, además de la comparación de los diferentes modelos de deflectores y diferentes velocidades. Las estimaciones de las simulaciones realizadas se muestran en tablas y figuras en donde se detalla los valores de velocidad, fuerza y presión.

4.1 Resultado del diseño de los modelos de deflectores

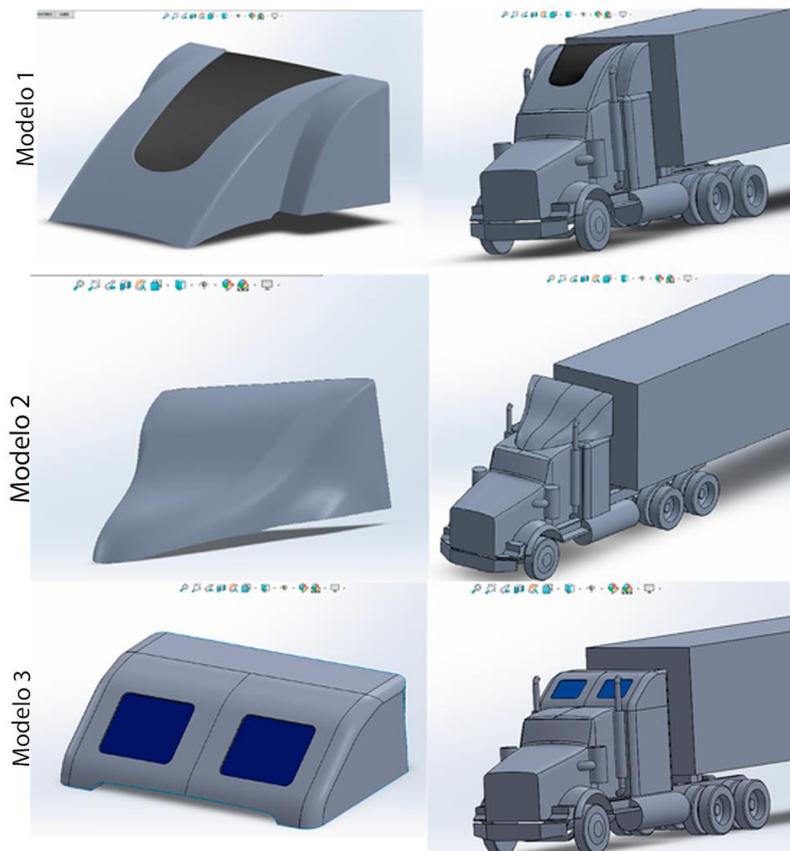


Figura 4.1 Resultado de los modelos de deflectores implementados en el tráiler

En la Figura 4.1 se muestran los modelos deflectores ajustados a la geometría del tráiler Kenworth T800. Los modelos 1 y 2, conservan la forma de los diseños en los cuales fueron inspirados. Sin embargo, la altura se modifica de tal manera que se encuentre al mismo nivel con el acoplamiento de carga. Mientras que el tercer modelo, conserva el diseño, geometría y dimensiones del prototipo base.

4.2 Resultados de calidad de mallado

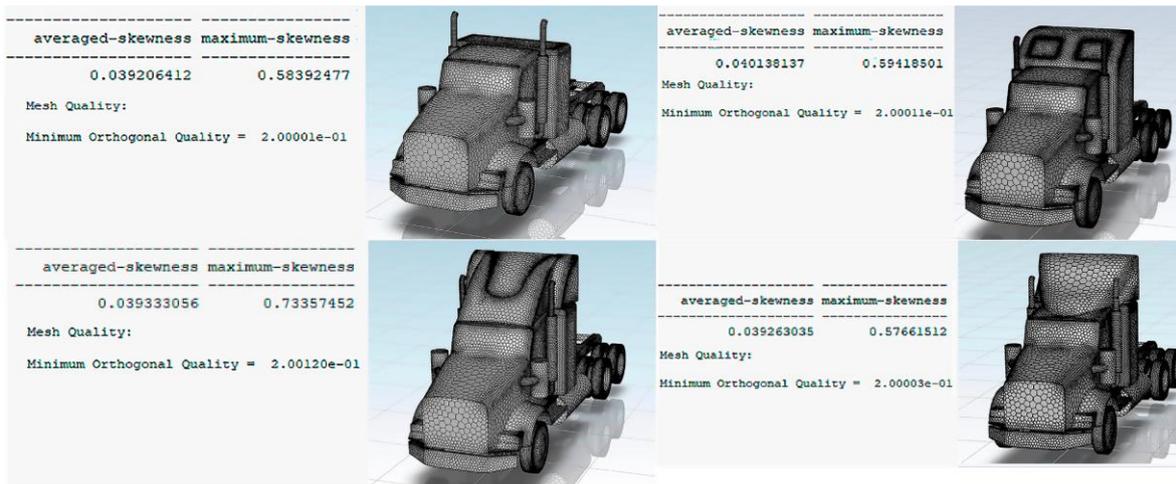


Figura 4.2 Calidad de malla del tráiler con deflectores

Los resultados de malla de los diferentes modelos se muestran en la Figura 4.2, los cuales dan como valores entre 0.03 y 0.04 en Skewness, que representa un estado “excelente” de mallado según los valores que se tiene en la Figura 2.10a. En Orthogonal Quality se muestra un valor mínimo igual a 0.20 lo que determina que se encuentra en un rango de calidad “buena”, según se muestra en la Figura 2.10b.

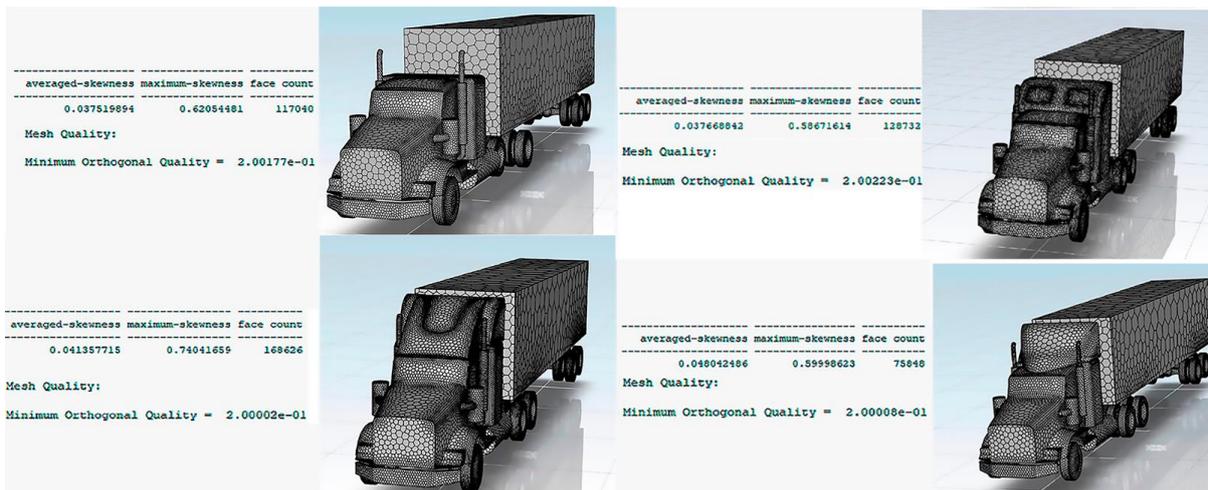


Figura 4.3 Calidad de malla del tráiler con deflectores y acoplamiento de carga

De igual manera, para que todos los resultados sean confiables, se realiza el mallado cuando al tráiler se le implementa el acoplamiento de carga y los deflectores, bajo los criterios de Skewness y Orthogonal Quality, como se indica en la Figura 4.3. Los valores promedio que se obtienen en Skewness varían entre 0.03 y 0.04, ingresando en el rango establecido como “excelente” según este criterio. Bajo el criterio de Orthogonal Quality se obtienen valores mínimos iguales o superiores a 0.20, lo que indica que se tiene una calidad de mallado “Buena”.

4.3 Resultados del área frontal

4.3.2 Resultados del área frontal del tráiler y deflectores.

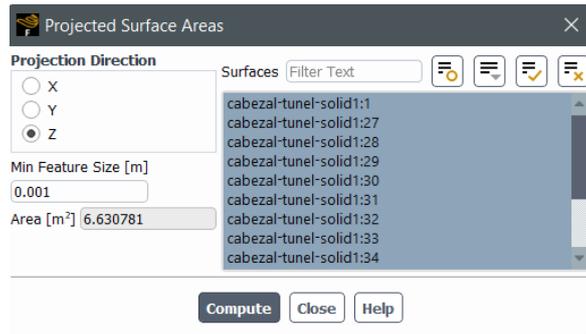


Figura 4.4 Área frontal del tráiler

También es necesario conocer el valor del área frontal del tráiler, el cual se obtiene mediante el software de análisis, dando como resultado 6.63 m^2 , como se observa en la Figura 4.4.

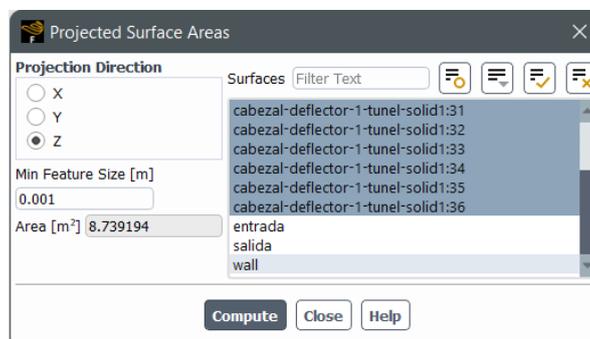


Figura 4.5 Área frontal del tráiler con el primer deflector.

En la Figura 4.5 se muestra el resultado del área frontal del tráiler con el primer deflector, dando un valor de 8.73 m^2 .

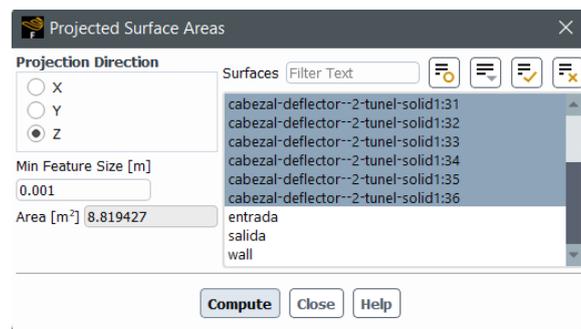


Figura 4.6 Área frontal del tráiler con el segundo deflector.

El área frontal del tráiler con el segundo modelo tiene un valor de 8.81 m^2 , como se observa en la Figura 4.6.

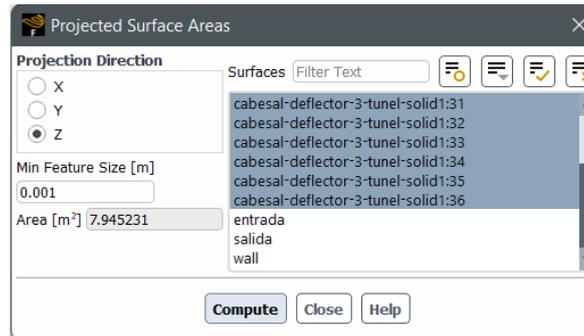


Figura 4.7 Área frontal del tráiler con el tercer deflector.

El tráiler con el tercer modelo de deflector tiene un área frontal de 7.94 m^2 , como se muestra en la Figura 4.7.

4.3.3 Resultados del área frontal del tráiler con acoplamiento de carga y deflectores.

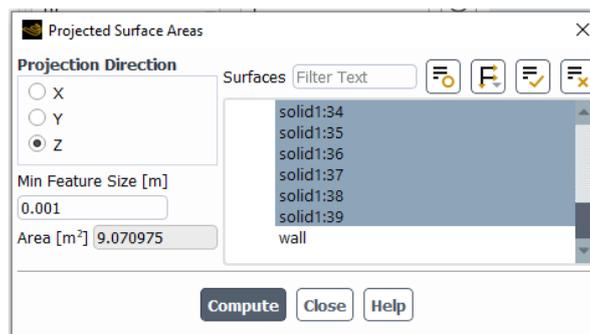


Figura 4.8 Área frontal del tráiler con contenedor.

Es necesario conocer el área frontal del tráiler cuando se le ha agregado el acoplamiento de carga, en la Figura 4.8 se muestra un valor de 9.07 m^2 .

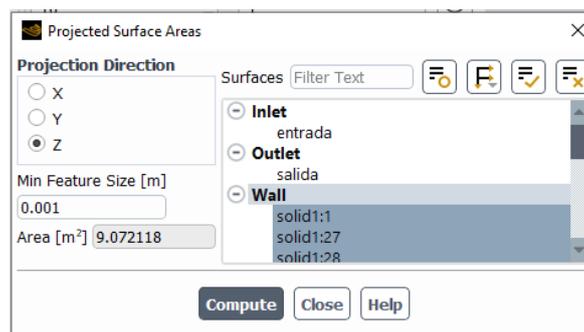


Figura 4.9 Área frontal del tráiler con contenedor y el primer deflector.

En la Figura 4.9 se muestra el resultado del área frontal del tráiler incluyendo el contenedor y el primer deflector dando como valor de 9.07 m^2 , similar al área sin deflector y acoplamiento de carga, esto debido a que el deflector no sobrepasa los límites del contenedor.

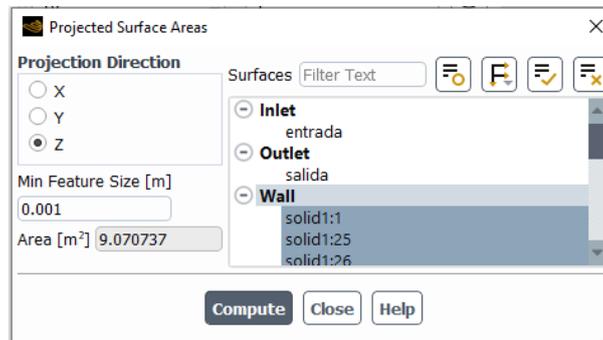


Figura 4.10 Área frontal del tráiler con contenedor y el segundo deflector.

Cuando al tráiler se le agrega el contenedor y adicional el segundo deflector se tiene un valor de 9.07 m^2 , como se indica en la Figura 4.10.

4.4 Simulación del tráiler y los modelos de deflectores

4.4.1 Resultados del tráiler sin deflector a 90 y 130 km/h.

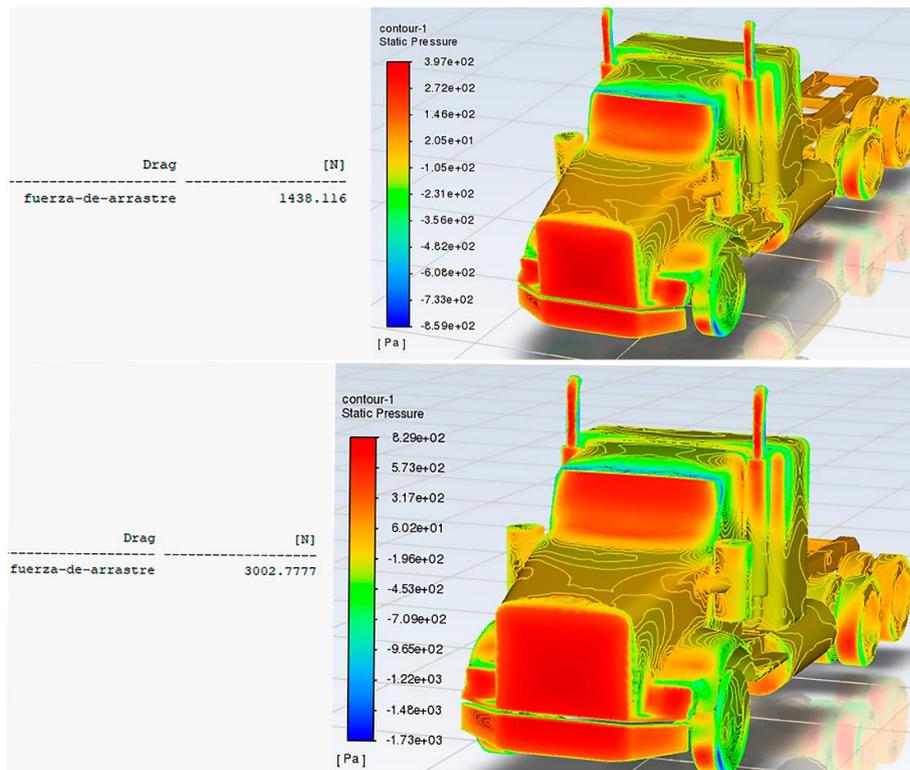


Figura 4.11 Resultados de fuerza y presión del tráiler

En la Figura 4.11 se puede observar los resultados de fuerza y presión que se ejerce en las distintas paredes del tráiler sin deflector y sin acoplamiento de carga a 90 y 130 km/h, dando como resultado una fuerza de arrastre de 1438.11 N y 3002.77 N respectivamente.

4.4.2 Resultados del primer modelo de deflector a 90 y 130 km/h.

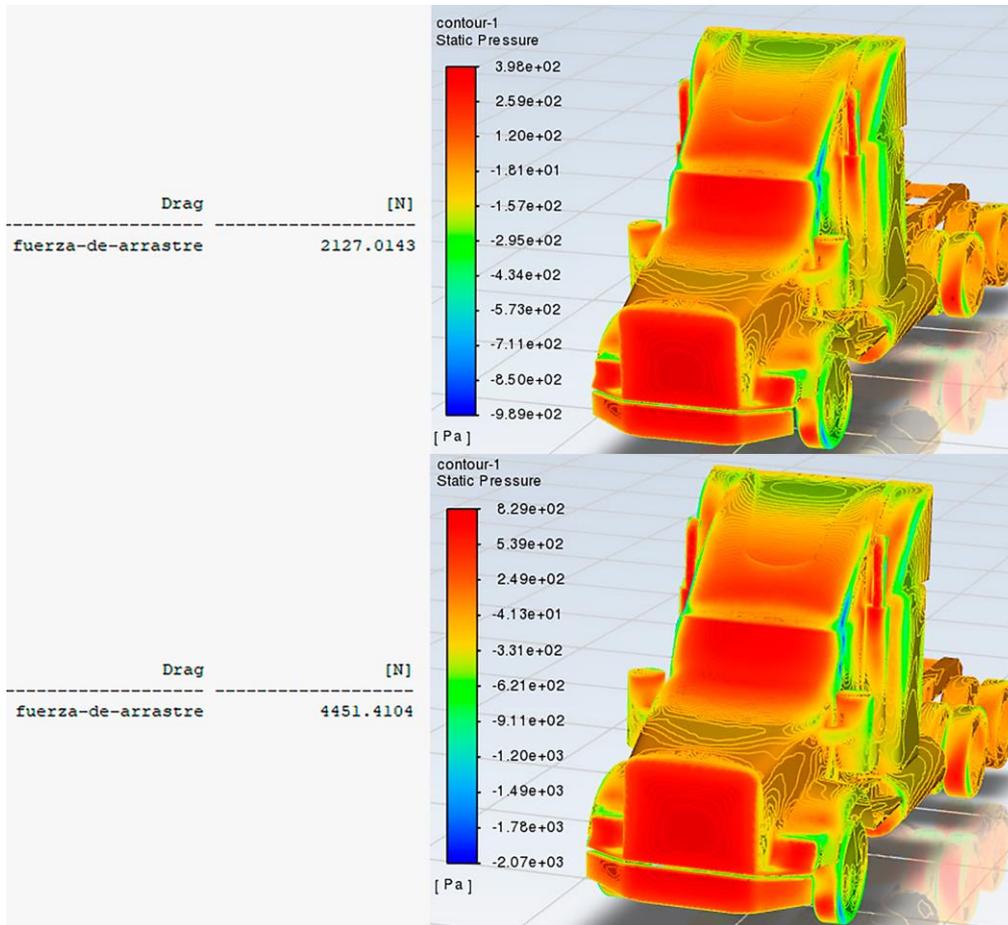


Figura 4.12 Resultados de presión y fuerza del tráiler con el primer modelo

Los resultados mostrados en la Figura 4.12 representan los valores de presión y fuerza a 90 y 130 km/h. En la columna derecha se observa la presión ejercida en el tráiler cuando se ha implementado el primer modelo. Los lugares de color rojo son las zonas donde existe valores altos de presión. En la parte izquierda de la figura se muestra los resultados de la fuerza ejercida, obteniendo 2127.01 N y 4451.41 N respectivamente.

4.4.3 Resultados del segundo modelo de deflector a 90 y 130 km/h.

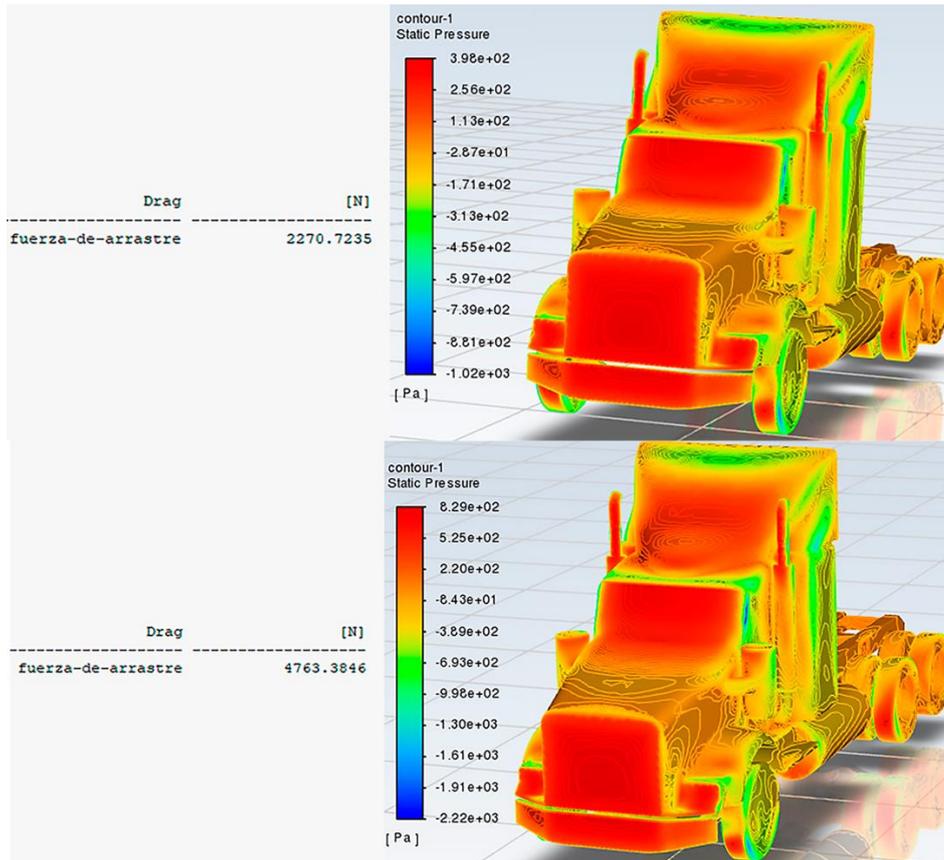


Figura 4.13 Resultados de presión y fuerza del tráiler y segundo modelo

En la Figura 4.13 se muestran los resultados de presión y fuerza a 90 y 130 km/h correspondientes al segundo modelo. En la columna derecha se muestra la presión que se ejerce en el vehículo y el deflector. El color rojo representa las zonas donde mayor resistencia tiene el aire sobre la carrocería del tráiler, las partes más afectadas son: el guardachoques, faros, parrilla y parabrisas. En la parte izquierda de la figura se muestra el valor de la fuerza obtenida que es de 2270.72 N y 4763.38 N.

4.4.4 Resultados de la tercera modelo de deflector a 90 y 130 km/h.

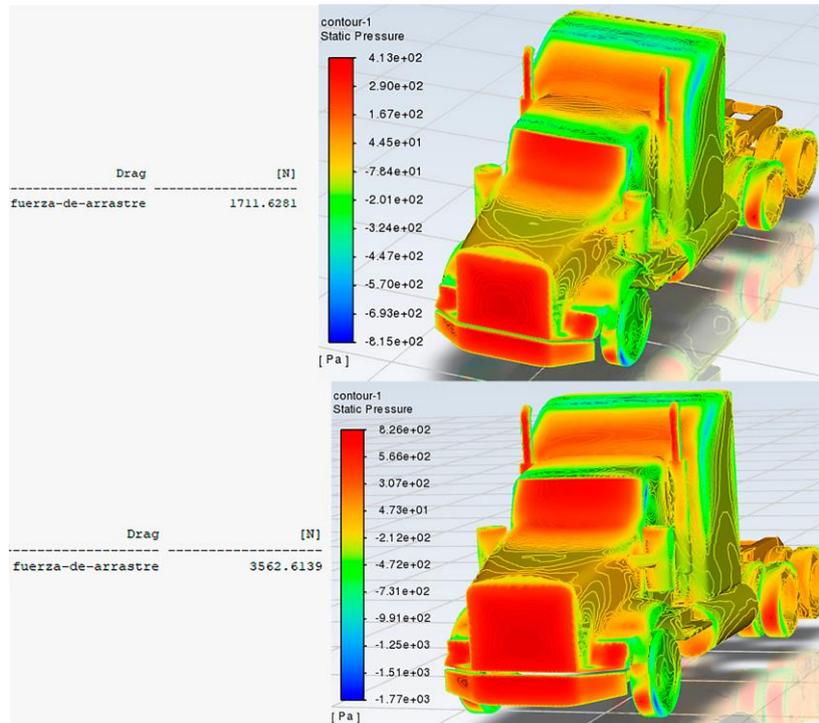


Figura 4.14 Resultados de presión y fuerza del tráiler y tercer modelo

En la Figura 4.14 se obtienen los resultados de presión y fuerza del tráiler con el tercer modelo deflector a velocidad de 90 y 130 km/h. La presión más alta se genera en toda la zona frontal del vehículo incluido parte del deflector. De igual forma se obtuvo un valor de 1711.62 N y 3562.61 N de fuerza para cada velocidad respectivamente.

4.4.5 Cálculo del coeficiente de arrastre y presión.

Para la obtención de resultados del coeficiente de arrastre y la presión, se realiza un modelo matemático generado en software, mediante la utilización de las ecuaciones (2) y (3). Posteriormente, se muestra los valores para cada caso de estudio los cuales son presentados mediante imágenes.

```
Command Window

ModeloBase =

    0.5666    0.5670

Modelo1 =

    0.6365    0.6384

Modelo2 =

    0.6733    0.6769

Modelo3 =

    0.5631    0.5618

fx >>
```

Figura 4.15 Resultados del coeficiente de arrastre

En la Figura 4.15 se muestra los resultados del coeficiente de arrastre, obtenidos mediante el software Matlab. En esta figura constan los valores del coeficiente de arrastre del tráiler, así como también los valores del mismo con cada uno de los deflectores. Los valores se obtienen con las dos velocidades establecidas de 90 y 130 km/h.

```
Command Window

ModeloBase =

   216.9095   452.9065

Modelo1 =

   243.6438   509.8981

Modelo2 =

   257.7435   540.6788

Modelo3 =

   215.5693   448.6914

fx >>
```

Figura 4.16 Resultados de presión

De igual manera, con la finalidad de verificar y constatar el deflector con mejores resultados, se considera necesario obtener los valores de presión. Los cuales fueron obtenidos a dos velocidades, 90 km/h como velocidad mínima y 130 km/h como velocidad máxima.

4.5 Simulación del tráiler con acoplamiento de carga y los diferentes deflectores

En esta sección se realiza un estudio CFD del tráiler junto con el acoplamiento de carga y los modelos de deflectores, con la finalidad de ver si los diseños ofrecen una mejora en la aerodinámica del vehículo. De igual forma se realiza el análisis a 90 y 130 km/h, obteniendo los resultados de fuerza, presión y velocidad.

4.5.1 Resultados de simulación del tráiler con acoplamiento a 90 y 130 km/h.

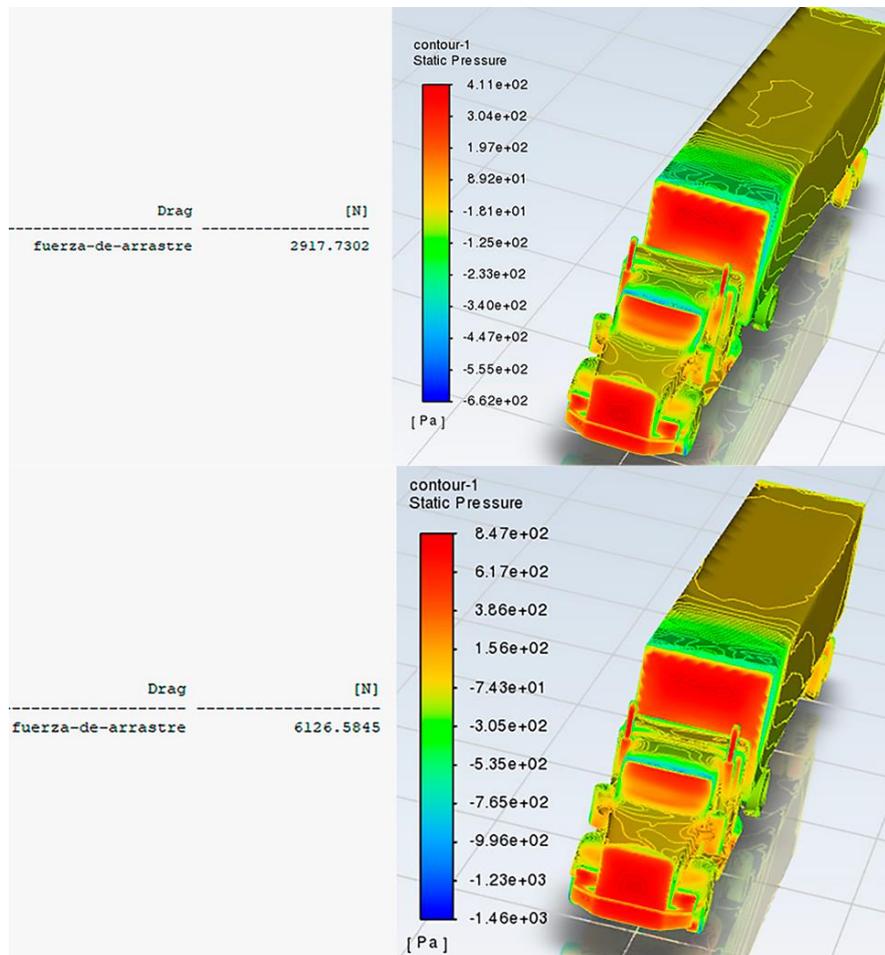


Figura 4.17 Resultados de presión y fuerza del tráiler con acoplamiento

En la Figura 4.17 se muestra los resultados de presión a 90 y 130 km/h, con el tráiler incluido el acoplamiento de carga y sin implementar los deflectores. Se puede apreciar que la

presión se ejerce tanto en la zona delantera, el parabrisas y además en el contenedor. Las zonas de color rojo indican donde mayor presión se ejerce sobre las superficies antes mencionadas. En la parte izquierda de la imagen se muestra el resultado de la fuerza generada, la cual tiene un valor de 2917.73 N y 6126.58 N respectivamente, notándose que incrementa significativamente a medida que aumenta la velocidad.

4.5.2 Resultados del tráiler con acoplamiento de carga incluido el primer deflector a 90 y 130 km/h.

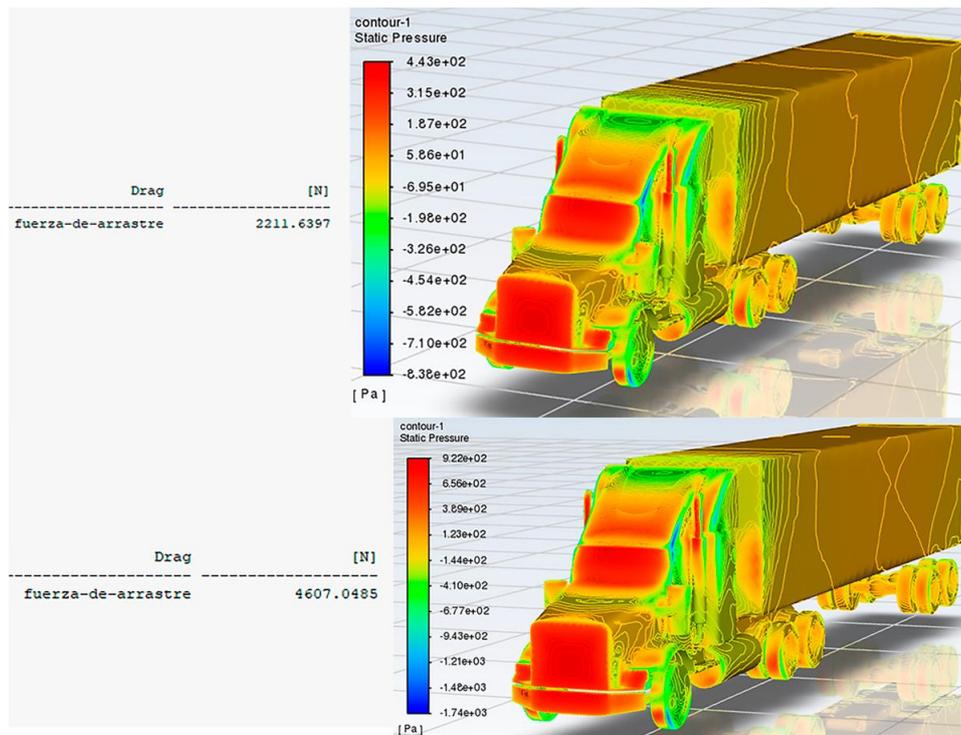


Figura 4.18 Resultados de fuerza y presión con el primer deflector.

En la Figura 4.18 se obtienen los valores de presión a 90 y 130 km/h con la implementación del primer deflector y el acoplamiento de carga, en donde se puede observar a simple vista que el prototipo implementado es de gran ayuda, puesto que la presión que se ejercía sobre el contenedor en este caso ya no existe. El aire no ejerce presión sobre el contenedor ya que pasa por la parte superior del mismo, impidiendo que el aire choque sobre la pared frontal del acoplamiento. Esto se logra debido a la altura del deflector, el cual se encuentra al mismo nivel del acoplamiento de carga y el valor de la fuerza disminuye de manera significativa, obteniendo un resultado de 2211.63 N y 4607.04 N para cada velocidad establecida respectivamente.

4.5.3 Resultados del tráiler acoplamiento de carga incluido el segundo deflector a 90 y 130 km/h.

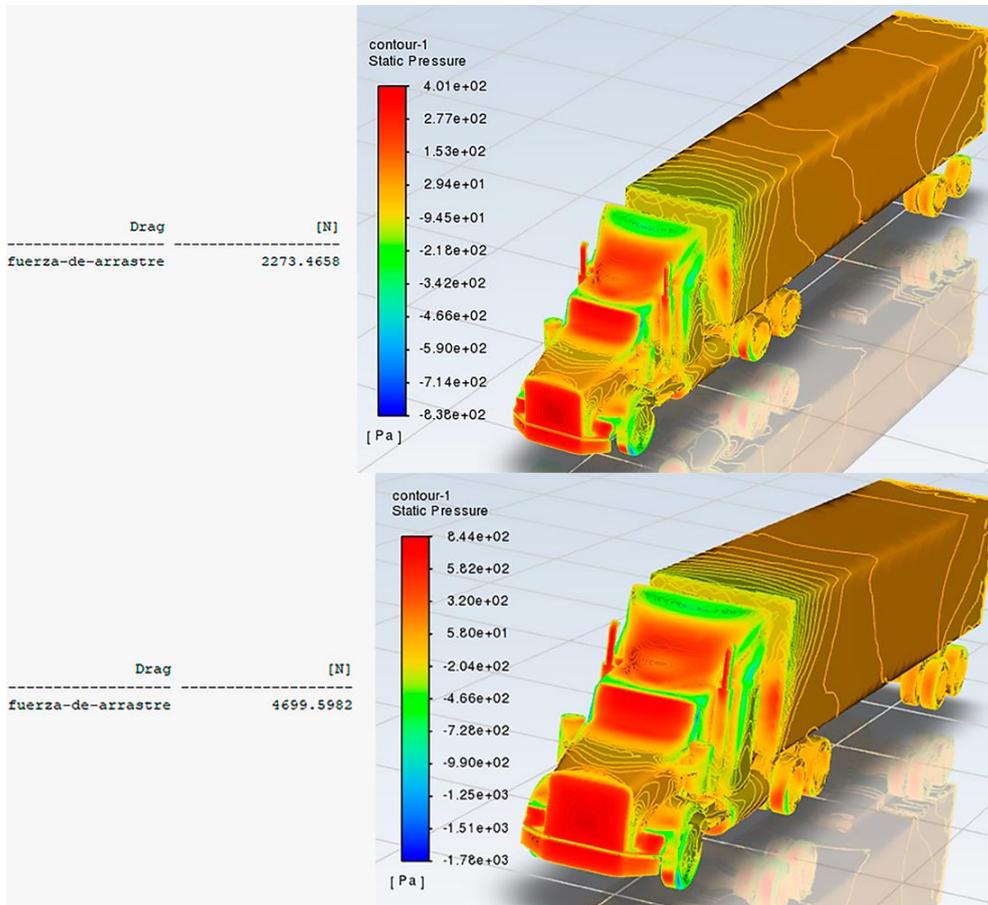


Figura 4.19 Resultados de fuerza y presión con el segundo deflector

Como se puede observar en la Figura 4.19 se obtiene los resultados de fuerza y presión a 90 y 130 km/h, del tráiler incluido el acoplamiento de carga y con la implementación del segundo modelo, con lo cual se puede apreciar que tiene una mejora sobre el contenedor en donde no existe una presión alta. Sin embargo, la presión es más alta en la parte delantera del vehículo incluyendo el deflector, a diferencia del primer modelo. La fuerza obtenida con las dos velocidades establecidas es mayor a diferencia del primer modelo, obteniendo valores de 2273.46 N y 4699.59 N respectivamente.

4.5.4 Resultados del tráiler acoplamiento de carga incluido el tercer deflector a 90 y 130 km/h.

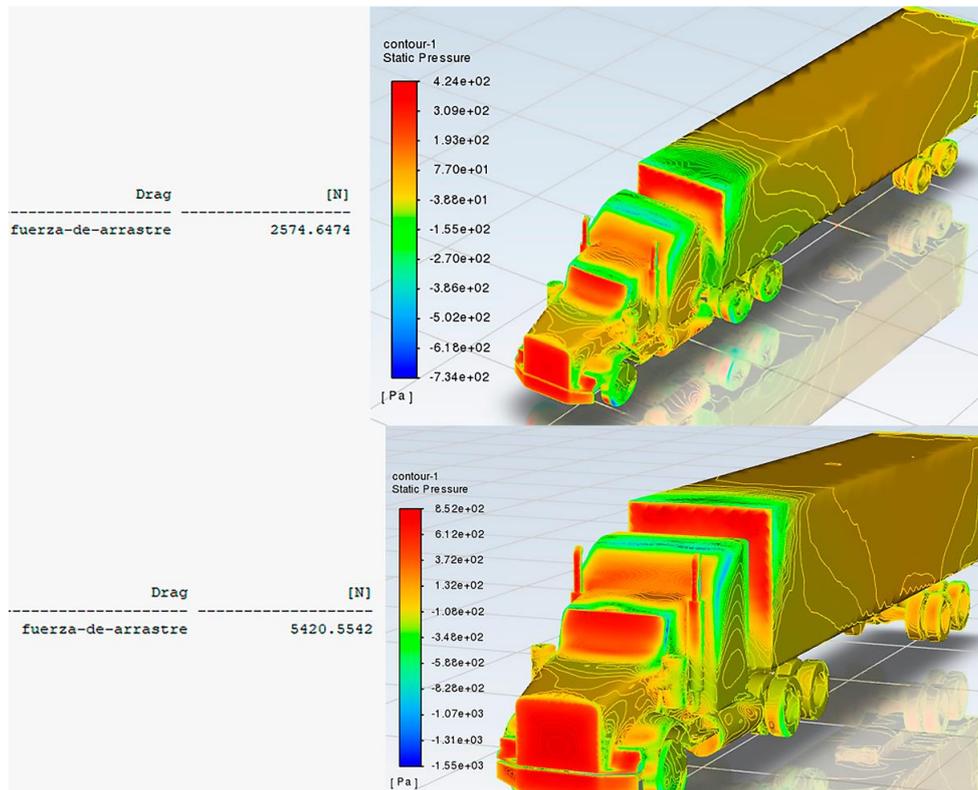


Figura 4.20 Resultados de fuerza y presión con el tercer deflector

En la Figura 4.20 se observa los resultados de fuerza y presión a 90 y 130 km/h, del tráiler con acoplamiento de carga y el tercer modelo de deflector. Donde se observa que la presión afecta en la parte frontal del vehículo y en la parte alta del contenedor debido a que el deflector no cubre en su totalidad la zona frontal del mismo, pues este no se encuentra a la misma altura. Se obtuvo una fuerza de arrastre de 2574.64 N y 5420.55 N a 90 km/h y 130 km/h respectivamente, notando un aumento considerable frente a los modelos uno y dos.

4.5.5 Resultado del coeficiente de arrastre y presión del tráiler incluyendo los deflectores y el acoplamiento de carga.

En esta sección se muestran los resultados del coeficiente de arrastre y presión, del tráiler con acoplamiento de carga y los tres diseños de deflectores propuestos.

```

Command Window

ModeloBase =

    0.8403    0.8457

Modelo1 =

    0.6370    0.6360

Modelo2 =

    0.6548    0.6487

Modelo3 =

    0.7415    0.7483

fx >>

```

Figura 4.21 Resultados del coeficiente de arrastre del tráiler con acoplamiento de carga y deflectores

En la Figura 4.21 se detalla los resultados del coeficiente de arrastre del tráiler con contenedor y los modelos de deflectores. Se observa que con los tres modelos de deflectores se obtiene valores inferiores a comparación del modelo base con el acoplamiento de carga.

```

Command Window

ModeloBaseContenedor =

    321.6902    675.4774

Modelo1 =

    243.8401    507.9427

Modelo2 =

    250.6571    518.1466

Modelo3 =

    283.8633    597.6351

fx >>

```

Figura 4.22 Resultados de presión del tráiler con acoplamiento de carga y deflectores

En la Figura 4.22 se muestra los resultados de la presión con el tráiler, el acoplamiento de carga y la implementación de los distintos tipos de deflectores que se han propuesto. Los

valores más bajos se obtienen con la implementación de los modelos de deflectores, a diferencia del tráiler con el acoplamiento de carga en donde se obtiene valores altos.

4.6 Simulación del tráiler y los modelos de deflectores a una altura de 2850 msnm

En esta sección se realizan nuevas simulaciones con los parámetros establecidos de 90 y 130 km/h. Sin embargo, se establece una densidad del aire de 0.8696 kg/m^3 , correspondiente a una altura de 2850 msnm, la cual pertenece a la ciudad de Quito.

4.6.1 Resultados del tráiler sin deflector.

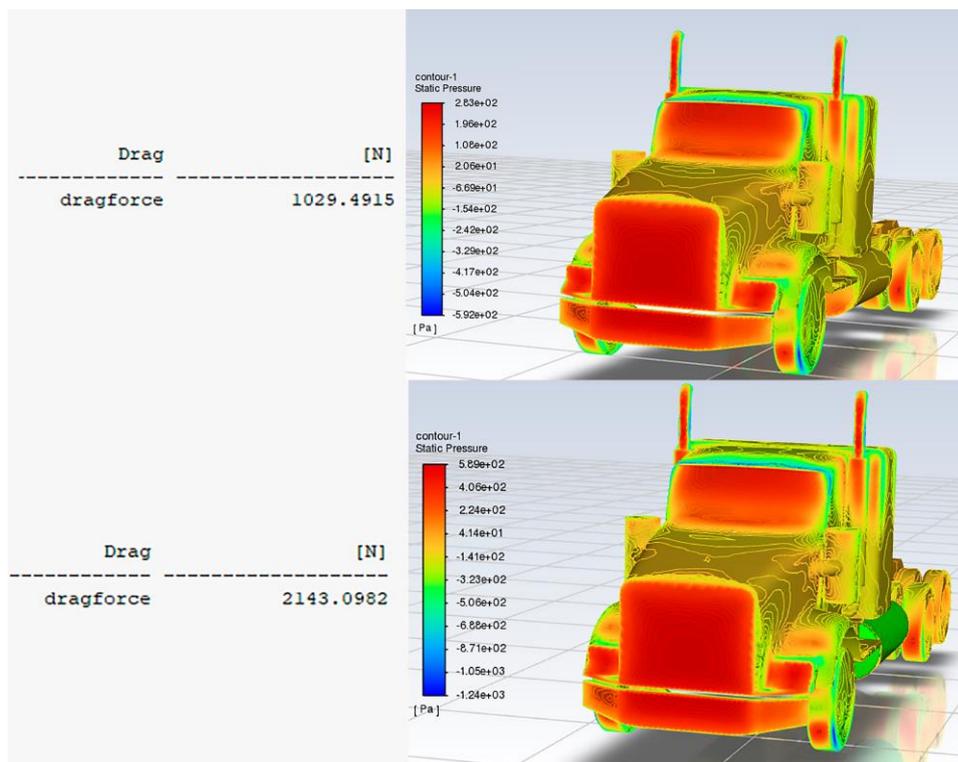


Figura 4.23 Resultados de fuerza y presión del tráiler sin deflector a 90 y 130 km/h.

En la Figura 4.23 constan los valores de fuerza y presión obtenidas a las velocidades de 90 y 130 km/h. La presión más alta actúa en la zona frontal del vehículo, esto debido a la geometría del tráiler Kenworth T800. El valor de la fuerza obtenido se muestra en la columna izquierda de la figura, obteniendo 1029.49 N y 2143.09 N respectivamente.

4.6.2 Resultados del primer modelo de deflector.

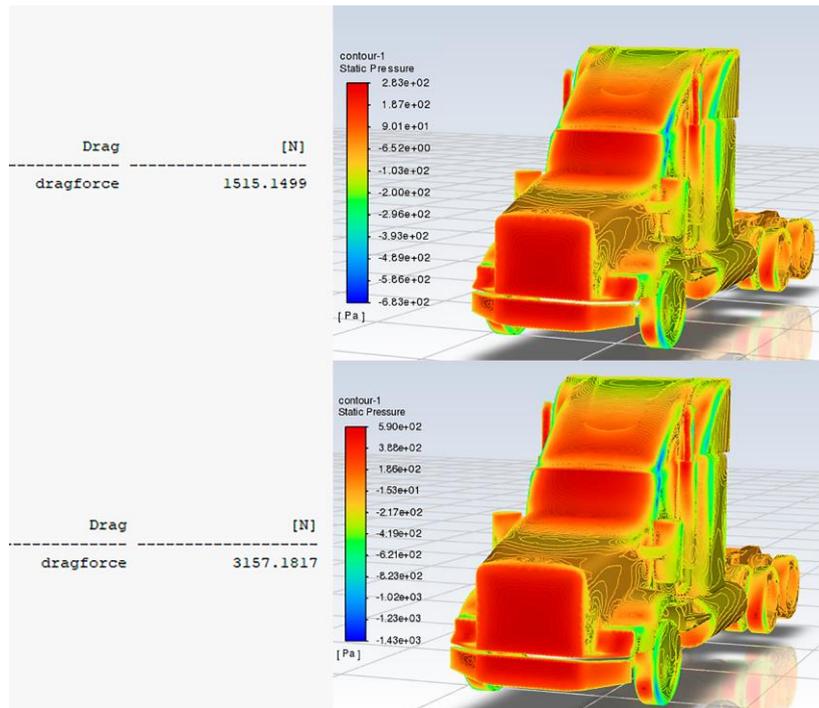


Figura 4.24 Resultados de presión y fuerza a 90 y 130 km/h.

En la Figura 4.24 se muestran los resultados de fuerza de arrastre y presión para el tráiler con el primer modelo de deflector, teniendo como resultado de 1515.14 N y 3157.18 N a 90 y 130 km/h respectivamente.

4.6.3 Resultados del segundo modelo de deflector.

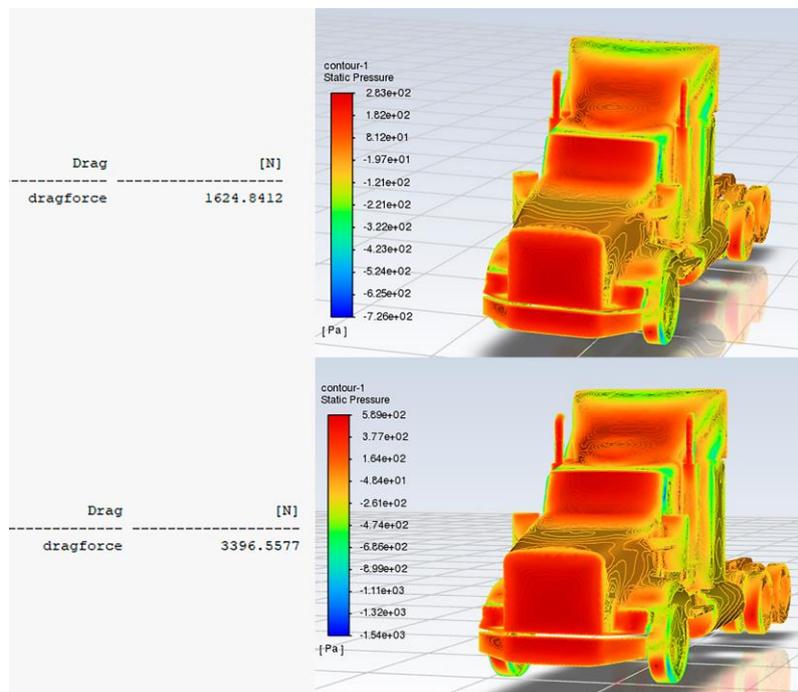


Figura 4.25 Resultados de presión y fuerza a 90 y 130 km/h.

En la Figura 4.25 se muestran los resultados de presión y fuerza con el tráiler incluido el segundo modelo de deflector con las dos velocidades y con la densidad indicada, obteniendo los siguientes valores: 1624.84 N y 3396.55 N respectivamente, dichos valores son mayores a diferencia del primer modelo de deflector. La presión se ejerce en la zona frontal del vehículo y del deflector.

4.6.4 Resultados del tercer modelo de deflector.

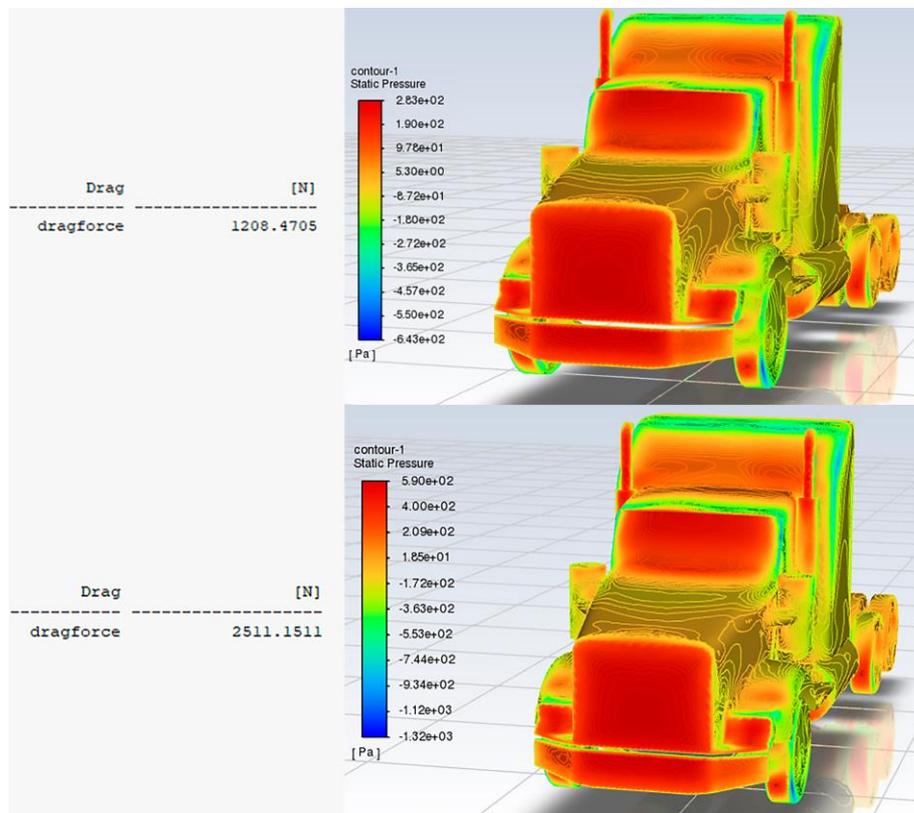


Figura 4.26 Resultados de presión y fuerza a 90 y 130 km/h.

En la Figura 4.26 se observa los resultados de la fuerza de arrastre a 90 y 130 km/h, obteniendo como valores de 1208.47 N y 2511.15 N respectivamente. Las zonas donde mayor presión ejerce el fluido son representadas con el color rojo demostrando así donde son los lugares de mayor resistencia con el fluido.

4.6.5 Resultados de presión y coeficiente de arrastre.

```

Command Window

ModeloBase =

    155.2775    323.2413

Modelo1 =

    173.5556    361.6472

Modelo2 =

    184.4313    385.5335

Modelo3 =

    152.2003    316.2657

fx >>

```

Figura 4.27 Resultados de presión del tráiler con contenedor y deflectores a 2850 m

Los resultados de presión con las velocidades de 90 y 130 km/h se muestran en la Figura 4.27, con el tráiler y los modelos de deflectores. Donde el modelo base obtiene valores similares con el tercer modelo de deflector.

```

Command Window

ModeloBase =

    0.5714    0.5701

Modelo1 =

    0.6387    0.6378

Modelo2 =

    0.6787    0.6800

Modelo3 =

    0.5601    0.5578

fx >>

```

Figura 4.28 Resultados del coeficiente de arrastre del tráiler sin contenedor y deflectores a 2850 m

En la Figura 4.28 se muestra los resultados del coeficiente de arrastre del tráiler sin deflector y con la implementación de los tres modelos respectivamente. De igual manera, los valores de CD obtenidos entre CDT, correspondiente al tráiler y CD3 al tráiler con la implementación del tercer modelo obtienen valores similares.

4.7 Simulación del tráiler con acoplamiento de carga y los modelos de deflectores a 2850 m

En este apartado se realiza la simulación CFD para el tráiler con el contenedor y las propuestas de deflectores a las velocidades establecidas de 90 y 130 km/h, a una altura de 2850 m correspondiente a la ciudad de Quito, obteniendo una densidad de 0.8696 kg/m^3 . La finalidad es analizar la fuerza y presión obtenidas para realizar comparativas y verificar si existen ventajas o desventajas con la implementación de deflectores.

Se realiza el estudio incluido el acoplamiento de carga debido a que este tipo de vehículos están diseñados para el transporte de mercancías. Al ser un instrumento necesario, afecta directamente la fuerza de arrastre que el vehículo genera, ya que el fluido choca con la pared delantera del contenedor.

4.7.1 Resultados de simulación del tráiler con acoplamiento de carga y sin deflector.

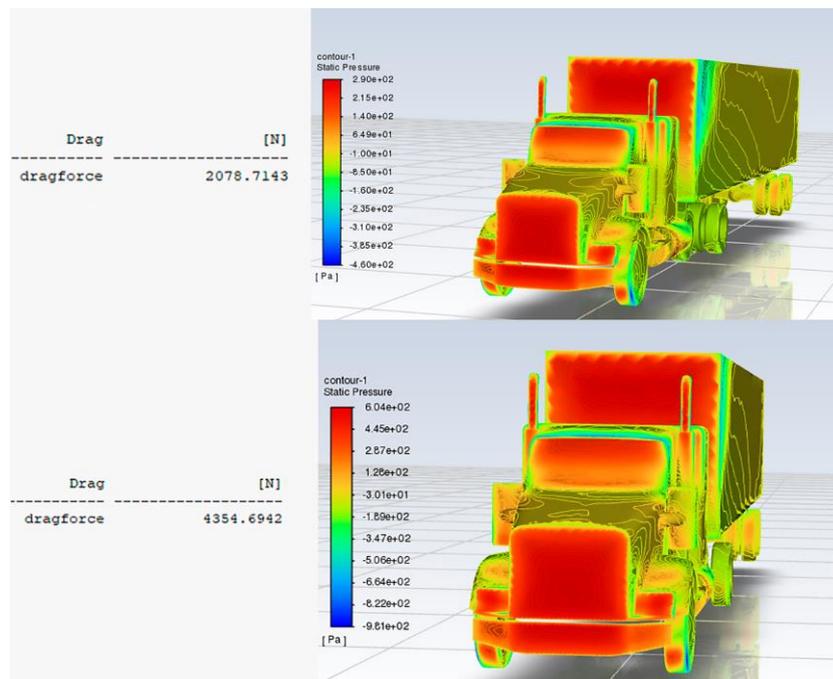


Figura 4.29 Presión y fuerza del tráiler con acoplamiento de carga a 90 y 130 km/h

En la Figura 4.29 se muestra el resultado de fuerza y presión del tráiler con acoplamiento de carga y sin ningún modelo de deflector, obteniendo valores de 2078.71 N y 4354.59 N a 90 y 130 km/h respectivamente.

4.7.2 Resultados del tráiler con el acoplamiento de carga y el primer deflector.

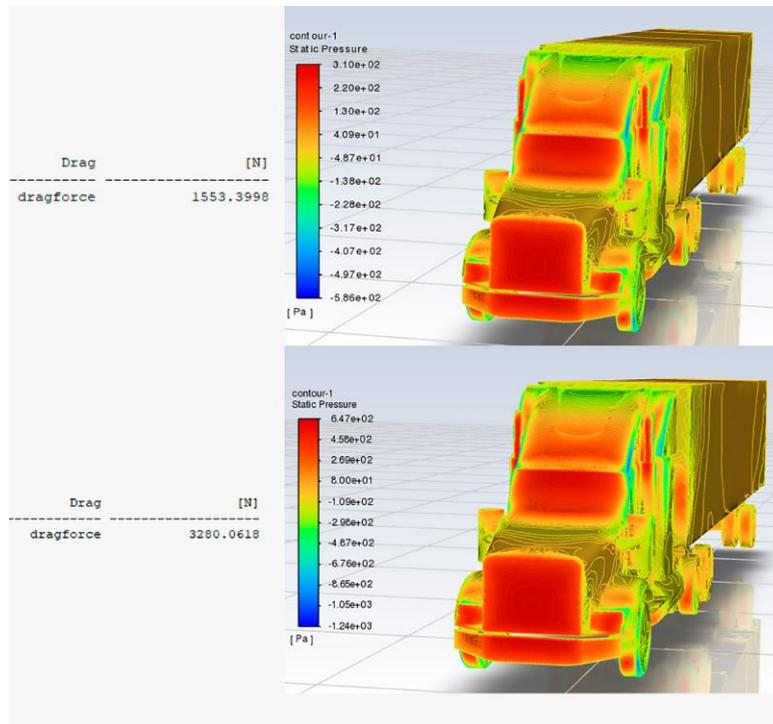


Figura 4.30 Resultados de fuerza y presión con el primer deflector a 90 y 130 km/h.

La Figura 4.30 muestra los valores de fuerza y presión para el primer deflector incluido el acoplamiento de carga, obteniendo 1553.39 N y 3280.06 N respectivamente. Además, la presión se ejerce en toda la zona frontal del vehículo y parte del deflector.

4.7.3 Resultados del tráiler con acoplamiento de carga y el segundo deflector.

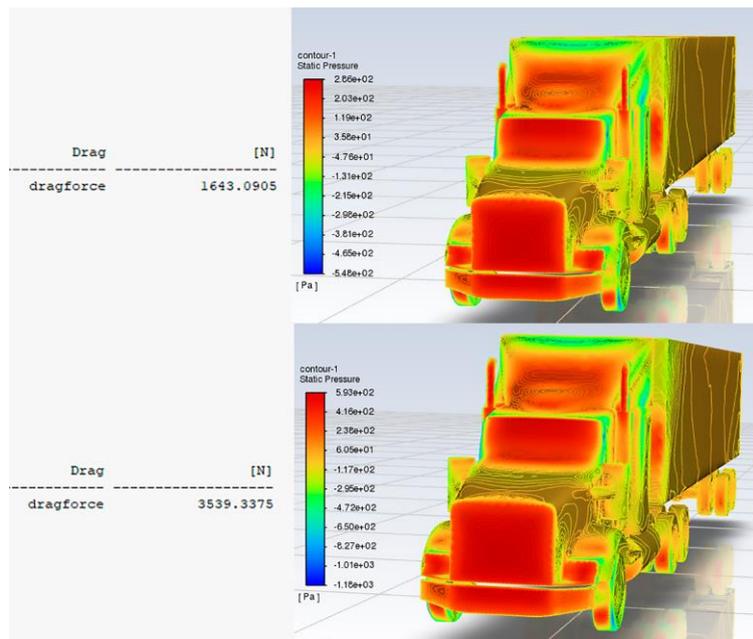


Figura 4.31 Resultados de presión y fuerza a 90 y 130 km/h.

En la Figura 4.31 constan los valores de fuerza y presión para el tráiler con el acoplamiento de carga y el segundo modelo de deflector, dando como resultado 1643.09 N 3539.33 N para las dos velocidades establecidas respectivamente. En la parte derecha de la figura se muestra las zonas de presión, en donde las partes de color rojo demuestran que existe mayor resistencia del aire. No existe presión sobre el contenedor porque el deflector se encuentra a la altura del mismo, impidiendo que el fluido ingrese en el espacio que se encuentra entre el tráiler y el contenedor.

4.7.4 Resultados del tráiler con acoplamiento de carga y el tercer deflector.

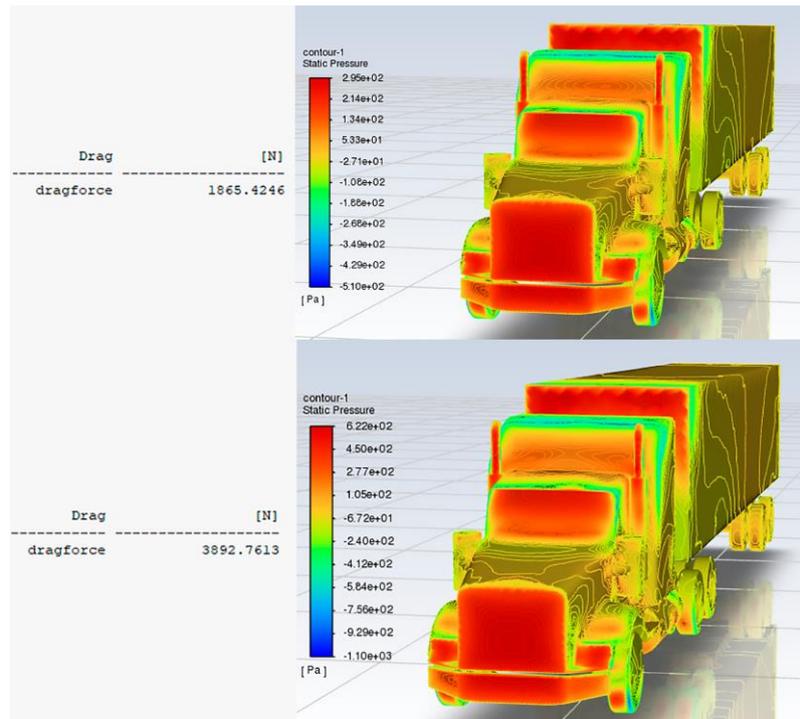


Figura 4.32 Resultados de fuerza y presión a 90 y 130 km/h con el tercer deflector

En la Figura 4.32 se observan los resultados de fuerza y presión del tráiler con el tercer modelo de deflector que pertenece al Kenworth T800 Aerocab, donde se obtiene 1865.42 N y 3892.76 N a 90 y 130 km/h respectivamente. El fluido ejerce presión en una zona del contenedor debido a que el deflector no posee la suficiente altura para cubrir toda la pared del contenedor.

4.7.5 Resultados de presión y coeficiente de arrastre.

```

Command Window

ModeloBaseContenedor =

    229.1852    480.1202

Modelo1 =

    171.2668    361.6384

Modelo2 =

    181.1566    390.2238

Modelo3 =

    205.6692    429.1907

fx >>

```

Figura 4.33 Resultados de presión del tráiler con acoplamiento de carga y deflectores

En la Figura 4.33 se muestran los resultados de presión para el tráiler con acoplamiento de carga y los modelos de deflectores propuestos. En la columna de la izquierda se muestran los valores a 90 km/h y en la derecha a 130 km/h; en donde se puede observar que sin la implementación de los deflectores se ejerce mayor presión, ya que el fluido va a chocar con el contenedor puesto que este se encuentra a mayor altura que el tráiler.

```

Command Window

ModeloBase =

    0.8434    0.8468

Modelo1 =

    0.6302    0.6378

Modelo2 =

    0.6666    0.6882

Modelo3 =

    0.7568    0.7570

fx >>

```

Figura 4.34 Resultados del coeficiente de arrastre del tráiler con el acoplamiento de carga y deflectores

En la Figura 4.34 se observan los resultados de CD del tráiler con acoplamiento de carga y sin deflector denominado como CDT y de los diferentes modelos respectivamente. Para el

tráiler sin deflector se obtiene un valor de 0.84 a comparación del primer modelo que posee 0.63, en donde se puede constatar que este modelo es el más aerodinámico a diferencia de los demás modelos que tienen valores más altos.

4.8 Resumen de resultados generales

En la Tabla 4.1 se realiza un compendio de los resultados de la fuerza de arrastre, presión máxima y coeficiente de arrastre de los tres modelos de deflectores diseñados, tanto para el tráiler, el acoplamiento de carga e incluyendo los modelos de deflectores.

Tabla 4.1 Resumen de resultados de los diferentes deflectores.

Tráiler con los modelos de deflectores					
Prototipo	Velocidad(km/h)	Área (m ²)	Fuerza (N)	Presión (Pa)	CD
Modelo Base	90	6.63	1438.11	216.90	0.56
	130		3002.77	452.90	
Modelo 1	90	8.73	2127.01	243.64	0.63
	130		4451.41	509.89	
Modelo 2	90	8.81	2270.72	257.74	0.67
	130		4763.38	540.67	
Modelo 3	90	7.94	1711.62	215.56	0.56
	130		3562.61	448.69	
Tráiler con contenedor y los diferentes deflectores					
Modelo Base con contenedor	90	9.07	2917.73	321.69	0.84
	130		6126.58	675.47	
Modelo 1	90	9.07	2211.63	243.84	0.63
	130		4607.04	507.94	
Modelo 2	90	9.07	2273.46	250.65	0.64
	130		4699.59	518.14	
Modelo 3	90	9.07	2574.64	283.86	0.74
	130		5420.55	597.63	

En la Tabla 4.2 de igual manera se obtiene los resultados en base a los parámetros antes mencionados, pero con la densidad de 0.8696 kg/m³ correspondiente a una altura de 2850 m de altura la cual es tomada como referencia de la ciudad de Quito.

Tabla 4.2 Resumen de resultados de los diferentes deflectores a una altura de 2850 ms.n.m.

Densidad del aire 0.8696 a 2850 m s. n. m.					
Tráiler con los modelos de deflectores					
Prototipo	Velocidad(km/h)	Área (m ²)	Fuerza (N)	Presión (Pa)	CD
Modelo Base	90	6.63	1029.49	155.27	0.57
	130		2143.09	323.24	
Modelo 1	90	8.73	1515.14	173.55	0.63
	130		3157.18	361.64	
Modelo 2	90	8.81	1624.84	184.43	0.67
	130		3396.55	385.53	
Modelo 3	90	7.94	1208.47	152.20	0.56
	130		2511.15	316.26	
Tráiler con contenedor y los diferentes deflectores					
Modelo Base con contenedor	90	9.07	2078.71	229.18	0.84
	130		4354.69	480.12	
Modelo 1	90	9.07	1553.39	171.26	0.63
	130		3280.06	361.63	
Modelo 2	90	9.07	1643.09	181.15	0.66
	130		3539.33	390.22	
Modelo 3	90	9.07	1865.42	205.66	0.75
	130		3892.76	429.19	

4.9 Costos de producción

En la Tabla 4.3 se muestra los costos aproximados de los materiales para la fabricación de un deflector, incluyendo la mano de obra. Dichos costos fueron consultados en lugares de fabricación, dando un valor estimado de 454.10 dólares americanos.

Tabla 4.3 Costos de los materiales de fabricación

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	PRECIO UNITARIO (\$)	PRECIO (\$)
4	Resina poliéster	L	16.00	64.00
2	MEK	Kg	1.90	3.80
2	Cobalto	Ml	1.25	2.50
12	Fibra	M	1.50	18.00
4	Masilla	Gal	18.95	75.80
2	Fondo	L	10.50	21.00
20	Lijas	--	0.35	7.00
¼	Pintura	L	28.00	28.00
¼	Barniz	L	24.00	24.00
1	Thinner	Gal	6.00	6.00
3	Tríplex	--	18.00	54.00
1	Mano de obra	--	150.00	150.00
TOTAL				454.10

4.10 Resultado del comportamiento del aire

4.10.1 Resultados en el tráiler con los distintos modelos de deflectores a 90km/h y 130 km/h.

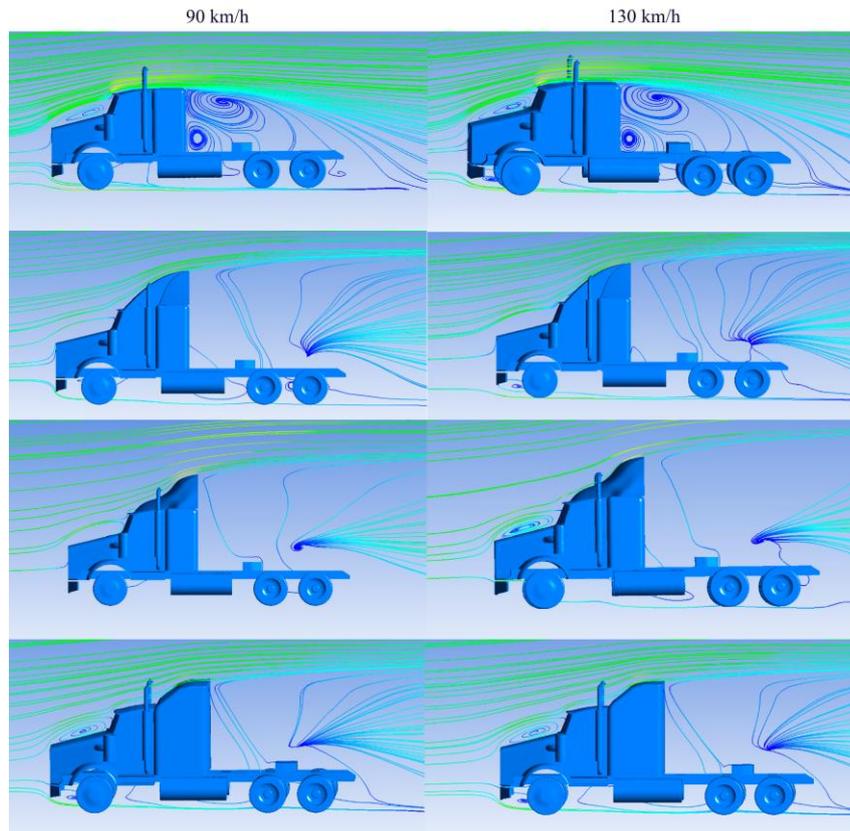


Figura 4.35 Representación del fluido en líneas de flujo en el tráiler y deflectores

En la Figura 4.35 se muestra un compendio de imágenes del tráiler y los deflectores implementados en el mismo a 90 y 130 km/h, donde constan las líneas de flujo que muestran la trayectoria que toma el fluido a través de la geometría del vehículo.

4.10.2 Resultados en el tráiler con contenedor y los modelos de deflectores a 90 y 130 km/h.

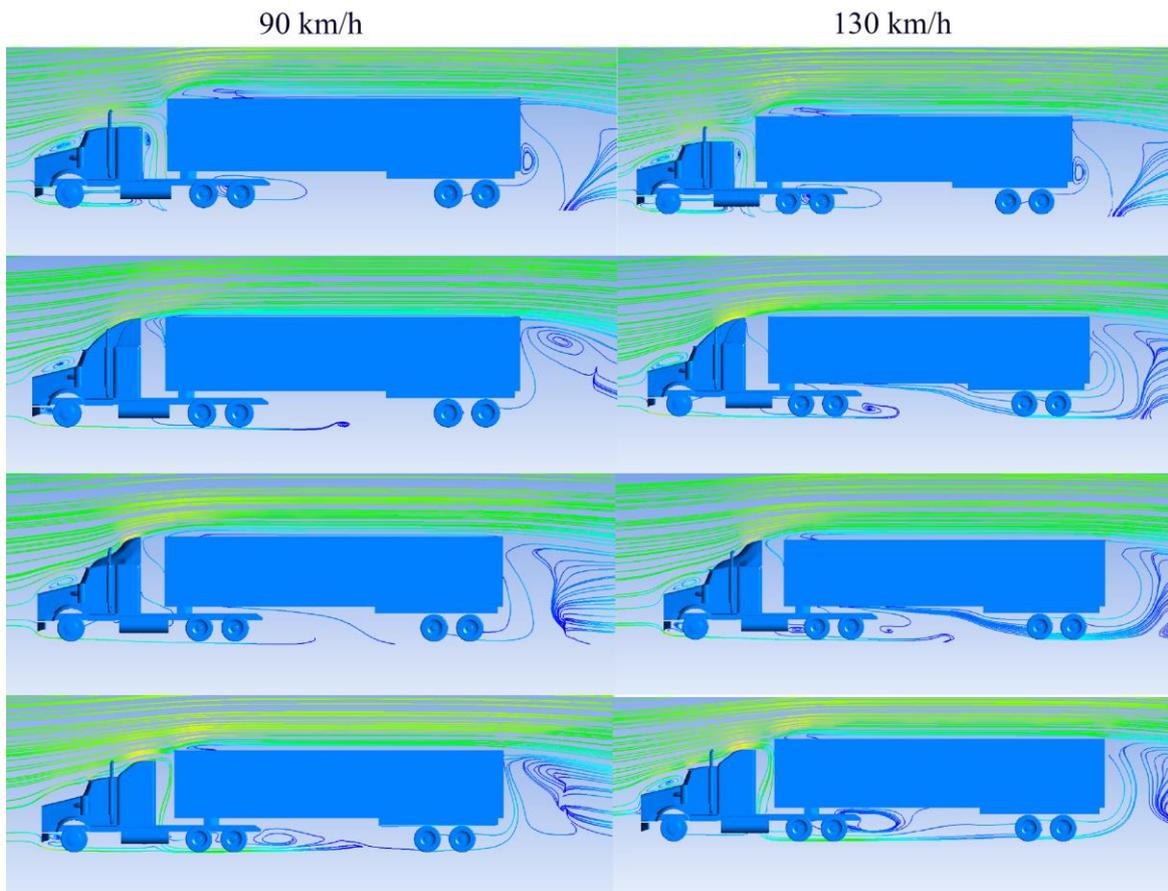


Figura 4.36 Representación del fluido en líneas de flujo para el tráiler con acoplamiento de carga y los modelos de deflectores.

En la Figura 4.36 se observa el comportamiento del fluido alrededor de las paredes del tráiler y a lo largo del acoplamiento de carga, representadas como líneas de flujo.

CAPÍTULO V

5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Comparación de resultados del modelo base con los diferentes modelos de deflectores

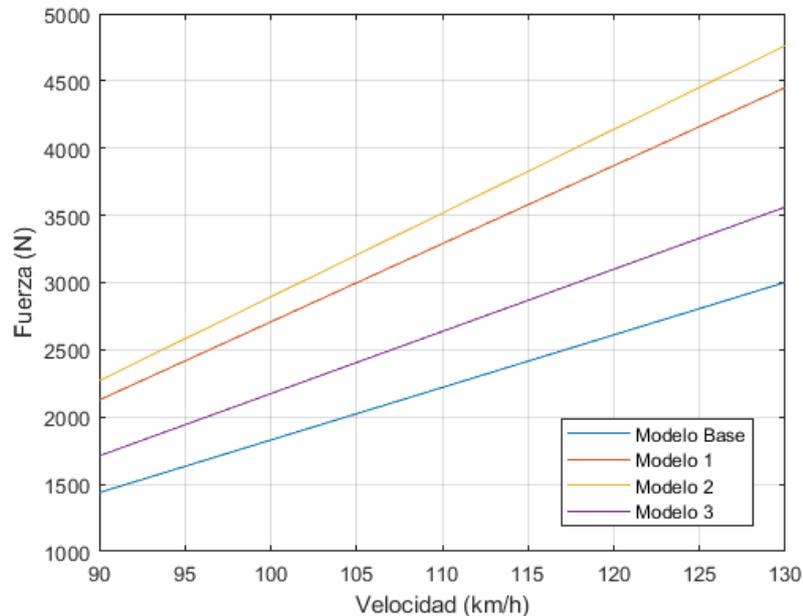


Figura 5.1 Comparativa de resultados de la fuerza en función de la velocidad

En la Figura 5.1 se muestran los resultados obtenidos de la fuerza de arrastre en función de la velocidad del modelo base y los tres modelos de deflectores. Por medio de esta gráfica se comparará la fuerza de arrastre que genera el tráiler con cada deflector.

Con los resultados obtenidos en la gráfica se puede interpretar que existe una variación de la fuerza de arrastre entre cada uno de los modelos de deflectores. El Modelo 3 tiene menor fuerza de arrastre a comparación de los modelos 1 y 2, ya sea a 90 y 130 km/h. Por lo tanto, el aire tiene menos zonas de resistencia que se generan al hacer contacto con la carrocería.

Sin embargo, con la implementación de los deflectores no se obtienen resultados favorables. La razón radica que al momento de implementar los deflectores se aumenta el área frontal del Modelo base. Por lo tanto, las zonas de resistencia del aire aumentan, generando mayor fuerza de arrastre en el tráiler.

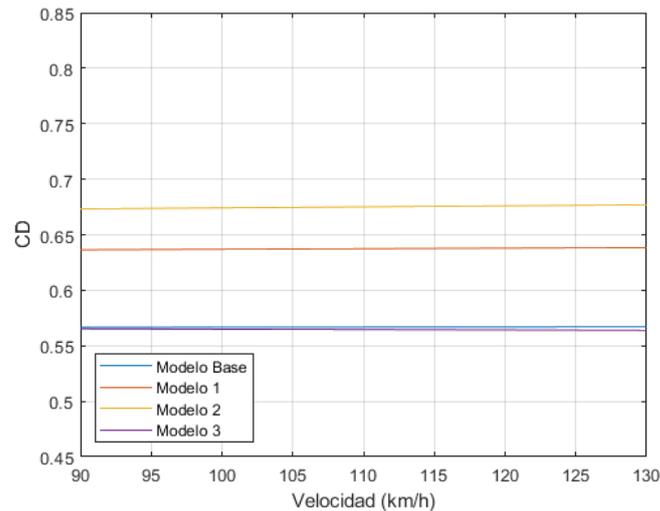


Figura 5.2 Comparativa de resultados del coeficiente de arrastre (CD) en función de velocidad

En la Figura 5.2 se realiza una comparación de resultados del coeficiente de arrastre en función de la velocidad de los diferentes modelos de deflectores. En donde se puede evidenciar que a medida que la velocidad aumenta, el CD se mantiene. Donde el Modelo 3 es el que menor coeficiente de arrastre presenta a comparación de los modelos 1 y 2.

Al ser un análisis referente a la competencia de tráileres se puede determinar que, sin el acoplamiento de carga y con la implementación de los modelos de deflectores, no mejoraría la aerodinámica del vehículo, sino más bien la empeoraría. Esto se debe a que aumenta el área frontal del tráiler y esto genera que el aire tengas más zonas de resistencia sobre la carrocería.

5.2 Comparación de resultados del tráiler con acoplamiento de carga y los modelos de deflectores

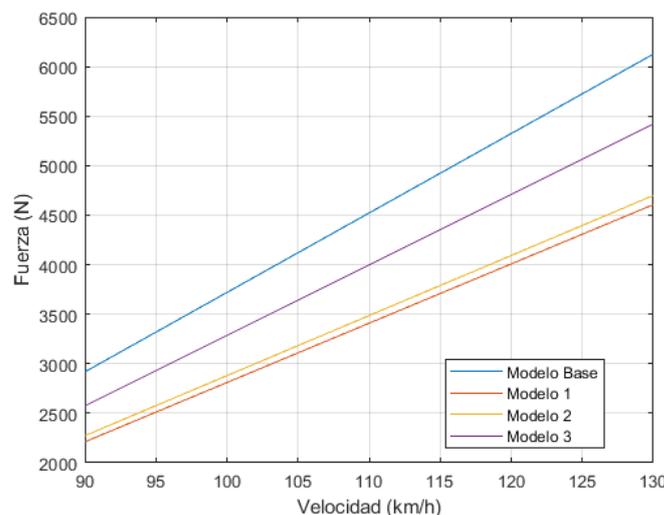


Figura 5.3 Comparativa de resultados de la fuerza en función de la velocidad

En la Figura 5.3 se observa los resultados de la fuerza en función de velocidad del tráiler con acoplamiento de carga, representado por la línea de color azul.

Se puede evidenciar que con la implementación de los diferentes modelos de deflectores la fuerza es inferior ya sea a la velocidad mínima y velocidad máxima. Con el primer modelo de deflector se obtiene menor fuerza de arrastre. El motivo de este resultado se debe a que el aire no genera mayor resistencia directamente en la cara frontal del acoplamiento de carga, debido a que el deflector se encuentra al mismo nivel de altura. Así también, con el segundo modelo se obtiene valores de fuerza bajos, sin embargo, la curvatura del deflector genera mayor resistencia al aire en la zona frontal del mismo.

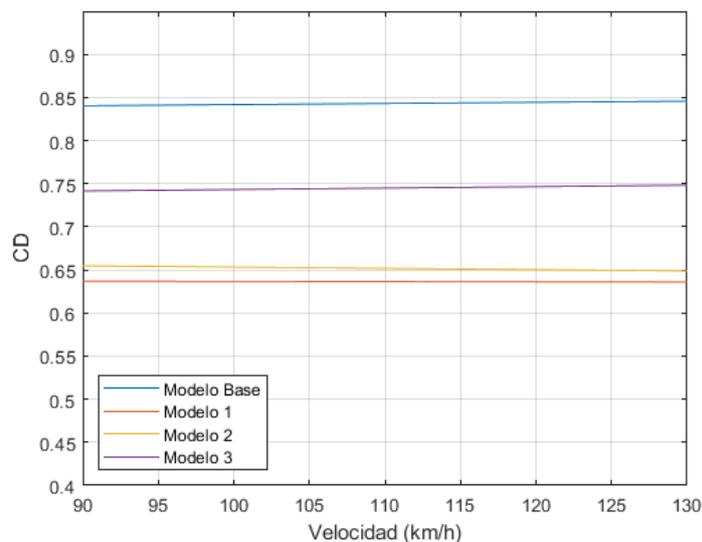


Figura 5.4 Comparativa de resultados de CD en función de velocidad

En la Figura 5.4, se puede observar el resultado del coeficiente de arrastre en función de la velocidad, donde el Modelo 1 es el más eficiente, debido a que su coeficiente de arrastre es menor al resto de modelos. El modelo base sin deflectores tiene un valor de CD alto debido a la turbulencia que se genera entre el camarote y la pared delantera del contenedor, pues el aire llega a generar mayor resistencia sobre esta pared impidiendo que pase por encima del contenedor.

Con la implementación del modelo 3 el resultado del coeficiente de arrastre es alto porque no cubre la pared del contenedor en su totalidad, esto conlleva a la generación de turbulencias en el espacio del tráiler y el acoplamiento de carga. Por el contrario, con los modelos 1 y 2, el aire pasa sobre el contenedor, porque se encuentra a la misma altura. Sin

embargo, el diseño del modelo 2 genera mayor resistencia al aire debido a la geometría que este tiene.

5.3 Comparación del coeficiente de arrastre a diferentes densidades

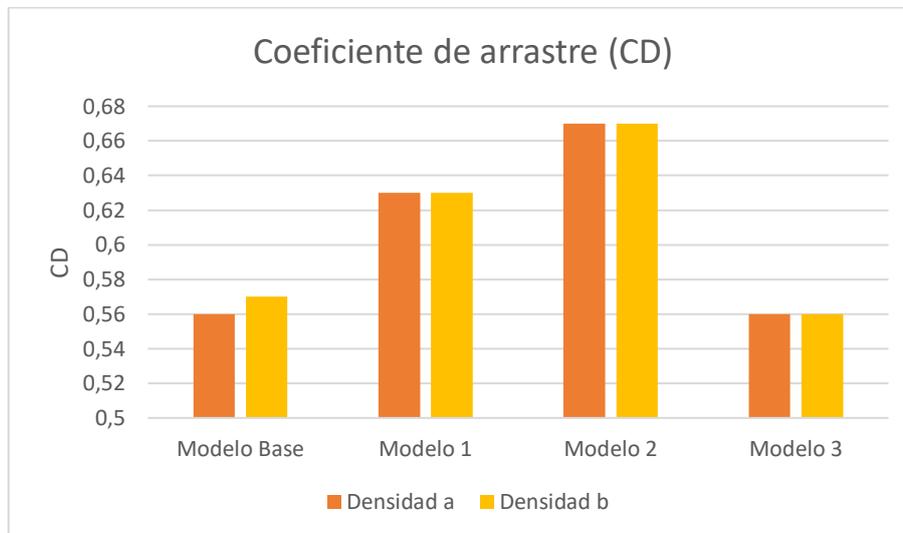


Figura 5.5 Coeficiente de arrastre del tráiler y los deflectores a diferentes densidades

En la Figura 5.5 se muestra el coeficiente de arrastre, tanto a densidad sobre el nivel del mar denominada “Densidad a” y a una altura de 2850 msnm representada como “Densidad b”, correspondiente a la ciudad de Quito. Por medio de las barras queda demostrado que, aun existiendo una variación de altura el CD no varía, pues este valor depende de la geometría del vehículo.

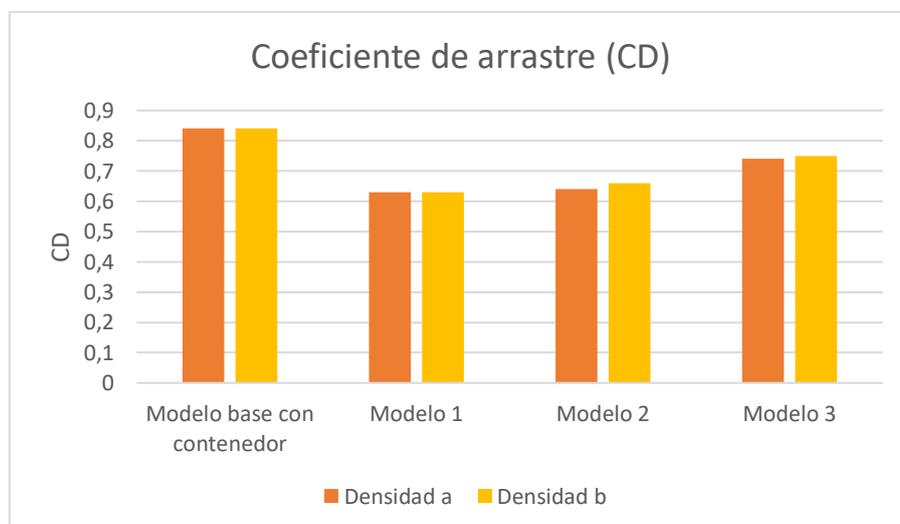


Figura 5.6 Coeficiente de arrastre del tráiler con acoplamiento de carga a diferentes densidades

En la Figura 5.6, se realiza un gráfico de barras para el tráiler con el acoplamiento de carga y los modelos de deflectores, a densidad sobre el nivel del mar y a una altura de 2850 msnm. También se evidencia que la variación de altura no afecta el valor del coeficiente de arrastre. Además, por medio de la figura se puede constatar que la implementación de deflectores si llega a mejorar la aerodinámica del vehículo, cuando se implementa el acoplamiento de carga.

5.4 Beneficios de la reducción del coeficiente de arrastre

Según Young (2001) el coeficiente de arrastre puede llegar a tener gran importancia en lo que se refiere al consumo de combustible en vehículos de carga pesada. Dicha afirmación es representada mediante una gráfica en donde muestra una relación entre el porcentaje de reducción del coeficiente de arrastre (CD) y el porcentaje que corresponde con el ahorro de combustible. Este estudio lo realiza de forma de forma teórica debido a que los valores pueden ser diferentes dependiendo el tipo y modelo de vehículo.

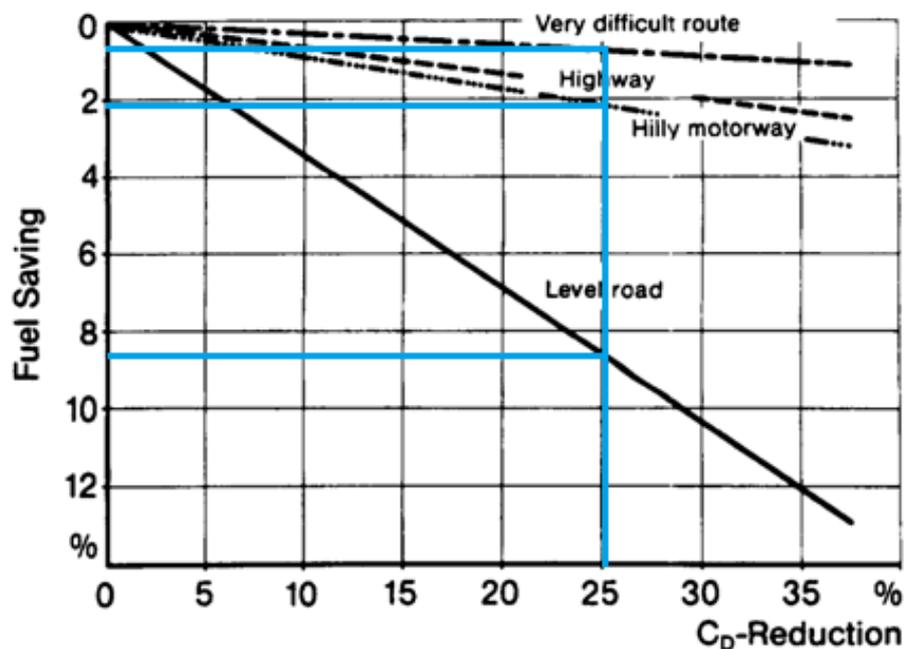


Figura 5.7 Consumo de consumo de combustible de acuerdo al coeficiente de arrastre (Young, 2001)

Por medio de la implementación de deflectores se logra reducir el coeficiente de arrastre (CD) de forma significativa. Cuando al tráiler se le incluye el acoplamiento de carga, se logra reducir el coeficiente de arrastre en un 25%, esto implica menor consumo de combustible. Por ejemplo, al encontrarse circulando en vías sin pendiente se puede ahorrar alrededor del 8.5% de combustible. En autopistas montañosas, el consumo de combustible es mayor, sin embargo,

con la implementación de un deflector se obtiene una reducción aproximada de 2%. En carreteras la reducción es más baja, pero se obtiene bajar el consumo aproximadamente 1.5%.

5.5 Ajuste de curvas por regresión lineal del modelo más idóneo

En esta sección se realiza el ajuste de curvas por regresión lineal del tráiler sin deflectores y el tráiler con acoplamiento de carga incluido el primer modelo. Esto se realiza con el objetivo de conocer la fuerza de arrastre en cualquier intervalo de velocidad para posteriormente calcular su presión y coeficiente de arrastre. Dicho procedimiento se realiza con la herramienta de “CurveFitting” del software Matlab.

El resultado de este procedimiento es una ecuación polinómica, donde: F corresponde a la Fuerza de arrastre y V es la velocidad del tráiler.

5.5.1 Ajuste de curvas del tráiler sin deflector.

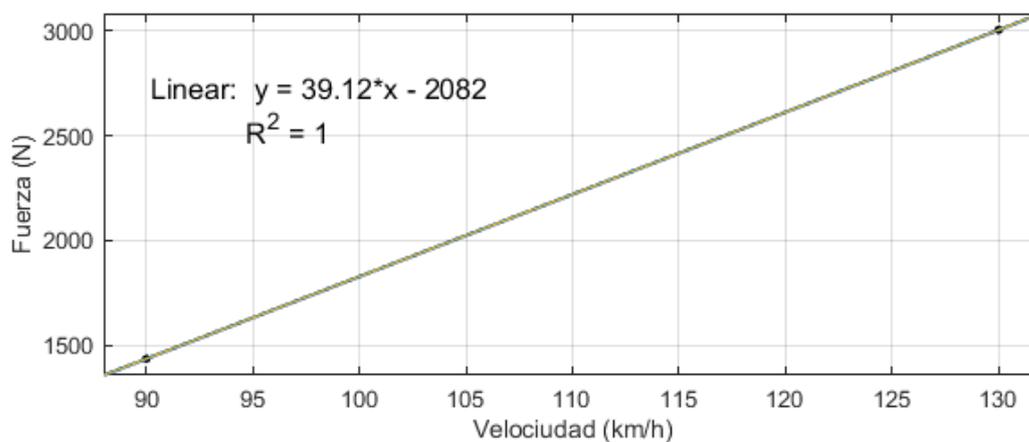


Figura 5.8 Resultados del ajuste de curvas por regresión lineal para el tráiler sin deflector

En la Figura 5.8 se observa el resultado en forma de ecuación la cual ayuda a predecir el comportamiento de la fuerza en cualquier intervalo de velocidad del tráiler sin deflector. Para determinar la validez de la ecuación se aplica el coeficiente de determinación por regresión lineal (R), el cual arroja valores entre 0 y 1, siendo 1 el valor que más fiabilidad da a la ecuación obtenida. Como resultado para la ecuación de tipo polinómica se obtiene un valor de $R=1$, determinando así un modelo confiable para la obtención de datos en cualquier punto de la gráfica.

$$F = 39.12 * V - 2082 \text{ (N)} \quad (6)$$

5.5.2 Ajuste de curvas del tráiler con acoplamiento de carga y sin deflector.

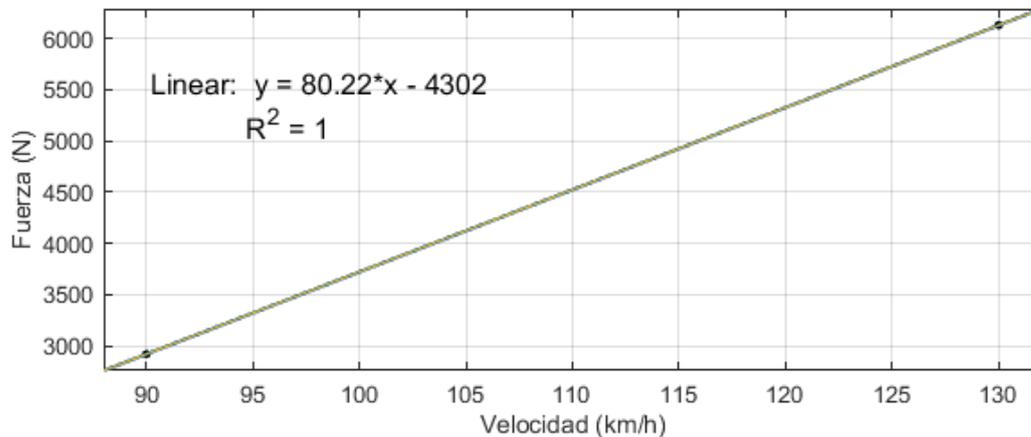


Figura 5.9 Resultados del ajuste de curvas para el tráiler con el acoplamiento de carga y sin deflector

En la Figura 5.9 se muestra como resultado la ecuación de la regresión lineal, la cual ayuda a predecir el comportamiento de la fuerza de arrastre generada por el tráiler con acoplamiento de carga a diferentes intervalos de velocidad. El resultado del coeficiente de determinación es $R=1$, donde se determina que el modelo de regresión lineal es el indicado.

$$F = 8022 * V - 4302 (N) \quad (7)$$

5.5.3 Ajuste de curvas del tráiler con acoplamiento de carga y deflector.

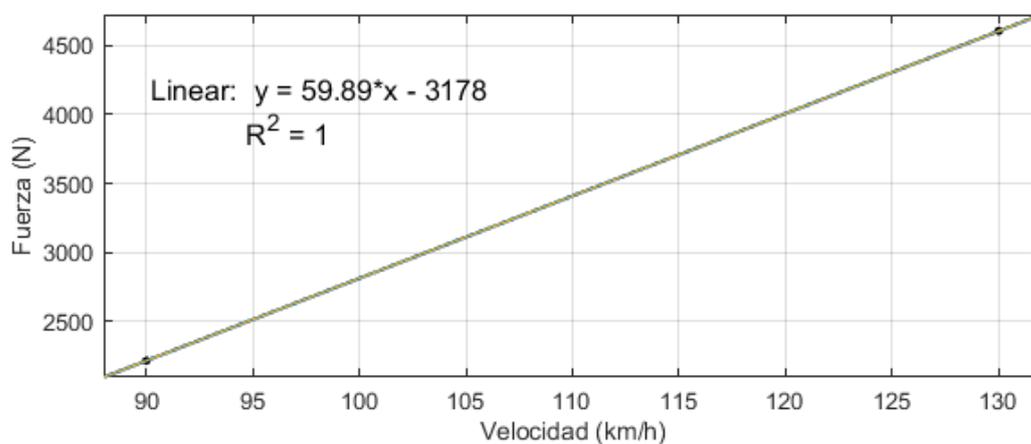


Figura 5.10 Resultados del ajuste de curvas para el tráiler con acoplamiento de carga y el primer modelo de deflector

En la Figura 5.10 se observa el resultado de la ecuación polinómica que permite predecir el comportamiento del tráiler con acoplamiento de carga y el primer modelo de deflector. El coeficiente de determinación obtenido es $R=1$.

$$F = 59.89 * V - 3178 \text{ (N)} \quad (8)$$

5.6 Comparación del comportamiento del aire representado en líneas de flujo

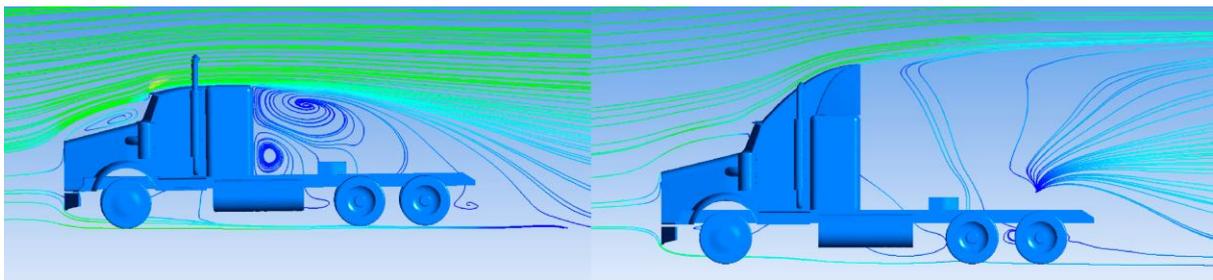


Figura 5.11 Comportamiento de líneas de flujo a través de tráiler

La Figura 5.11 muestra el resultado de las líneas de flujo a través del tráiler y el deflector. En el lado izquierdo se muestra el paso del aire a través de la carrocería del tráiler, en donde se puede observar que se genera una turbulencia atrás del camarote. A diferencia del tráiler con deflector, el aire toma una trayectoria que pasa sobre el vehículo y llega a caer en la parte trasera de los ejes, generando menor turbulencia. Sin embargo, a partir de los resultados obtenidos en base a la fuerza y coeficiente de arrastre, se determina que la implementación de deflectores para este caso no es conveniente.

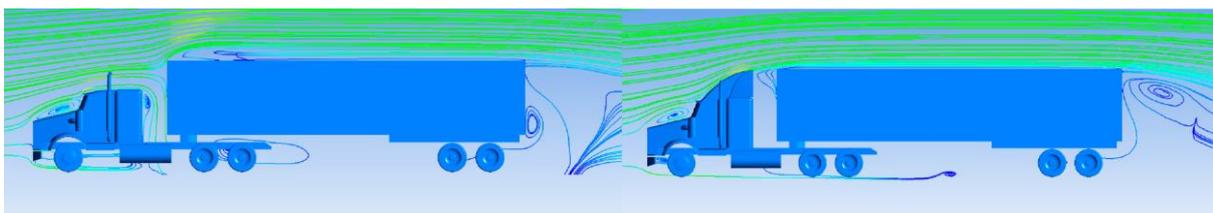


Figura 5.12 Comportamiento de líneas de flujo a través de tráiler con contenedor

En la Figura 5.12, se muestra el comportamiento de las líneas de flujo a través de tráiler incluido el acoplamiento de carga. Cuando no se ha incluido el deflector, el aire llega a generar

turbulencia en el espacio que hay entre la cabina y el contenedor, a causa de la diferencia de altura entre el tráiler y el acoplamiento de carga. En el lado derecho de la figura se observa que el primer modelo de deflector impide que se genere turbulencia, debido a que este dispositivo aerodinámico influye sobre la trayectoria del aire, llevándolo a la parte superior del acoplamiento e impidiendo que genere resistencia en la cara frontal del mismo.

5.7 Comparación de resultados de velocidad del vehículo en función del tiempo

Para la comparación de velocidad en función del tiempo se realiza un diagrama de bloques en Simulink, la cual es una extensión del software Matlab, donde por medio de las ecuaciones (1), (4) y (5) se obtiene la fuerza de tracción, que se encarga de generar el movimiento al vehículo. Se toma la variable velocidad para posteriormente sacar la respectiva grafica en función del tiempo.

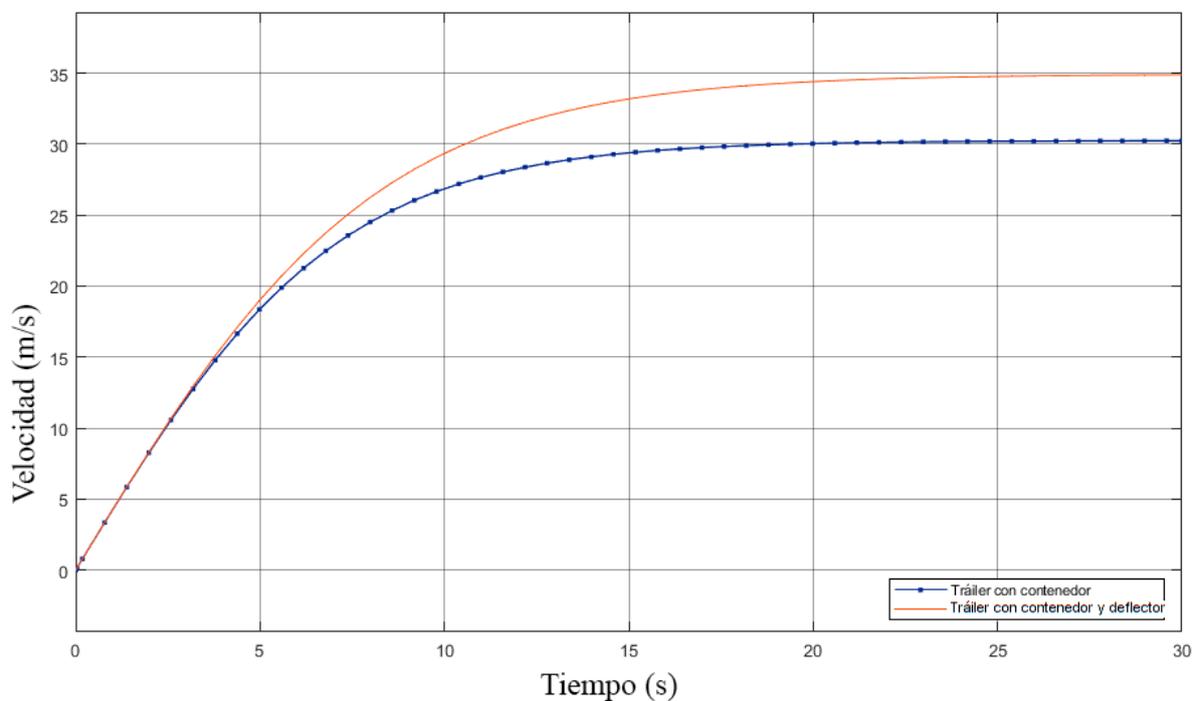


Figura 5.13 Comparación de resultados de velocidad del tráiler con contenedor

En la Figura 5.13 se realiza una comparación de velocidad entre el Modelo base con acoplamiento de carga y el Modelo 1, ya que este fue el que mejores condiciones aerodinámicas

presenta. La curva de color amarillo representa al Modelo base y la curva de color azul hace referencia al Modelo 1.

Por medio de la gráfica se demuestra que la implementación de un deflector al tráiler con acoplamiento de carga tiene mejores resultados respecto al Modelo base. Esto se debe a que en el mismo lapso de tiempo se llega a tener mayor velocidad, ya que se genera una menor resistencia al aire.

5.8 Comparación de precios del tráiler y deflectores

En la Tabla 5.4 se detallan los precios de los vehículos comparados entre el Kenworth T800 Clásico y su similar Kenworth T800 Aerocab, este último cuenta con un deflector que forma parte del camarote, procedente de fábrica. La diferencia de costos entre estos dos vehículos es significativa. Sin embargo, sin la implementación del acoplamiento de carga poseen características aerodinámicas similares.

Con el acoplamiento de carga y el primer modelo de deflector, el tráiler Kenworth T800 clásico tiene mejores resultados aerodinámicos, determinando que la implementación de deflectores es necesario y viable económicamente a comparación del modelo similar.

Tabla 5.4 Comparación de precios de fabricación

Fabricante	Precio (\$)
Kenworth T800 classic	153 000
Kenworth T800 Aerocab	165 000
Deflector Zona Norte	850
Deflector Sinotruck	780
Deflector modelo 1 analizado	454.10

En el proyecto de investigación se planteó una propuesta de elaboración de un deflector, en el cual se estimó los precios de los materiales y mano de obra que tendría el proceso de fabricación. Se tiene como resultado un valor inferior a comparación de los deflectores que se comercializan en los lugares de venta de vehículo.

CAPÍTULO VI

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- El reglamento impuesto por el Ministerio de Transporte y Obras Publicas establece un límite máximo de altura de 4.10 m para los vehículos de transporte pesado. En base a esta dimensión se limita la altura máxima del tráiler incluyendo los diferentes modelos de deflectores. Sin embargo, no existe normativas o reglamentos que estandaricen la implementación de deflectores en este tipo de vehículos en competencia. A pesar de esto existen reglas internas de cada competencia en donde se menciona que el deflector debe estar bien adherido y soporte el peso de una persona.
- El modelado 3D CAD se realiza a partir de las dimensiones obtenidas del vehículo real. Esto con la finalidad de obtener el modelo base y posterior a ello diseñar prototipos de deflectores que se ajusten a la carrocería del tráiler. Los diseños fueron inspirados en base a modelos de otras marcas, como: Freightliner Classic XL, Kenworth T800 Aerocab y el estudio de un deflector basado en un lobo marino.
- El análisis del comportamiento aerodinámico del tráiler con los modelos de deflectores se lleva a cabo mediante un proceso de simulación. Para esto es necesario iniciar con la creación del túnel de viento o dominio computacional, el cual fue dimensionado en base a estudios previos. También, es fundamental validar los resultados según los criterios de mallado establecidos, obteniendo valores de 0.03 y 0.2 para Skewness y Orthogonal Quality respectivamente. Esto con la finalidad de garantizar la calidad de los resultados obtenidos.
- La selección del prototipo se realizó a partir de los resultados obtenidos de acuerdo a los valores de fuerza y coeficiente de arrastre. De acuerdo con estos valores se evidenció que el Modelo 1 fue el que mejores condiciones aerodinámicas presentó con respecto al Modelo base, en donde se obtuvo valores de 0.63 y 0.84 respectivamente, teniendo una mejora del 25%. Cabe aclarar que estos resultados se obtuvieron con el

acoplamiento de carga, debido a que sin el acoplamiento no se mejoró la aerodinámica del modelo base, ya que aumentó la fuerza y el coeficiente de arrastre.

6.2 RECOMENDACIONES

- Proponer un formato de normativa acerca del diseño e implementación de deflectores en vehículos de carga pesada. Esto con el fin de estandarizar las dimensiones tanto de alto, largo y ancho; además, plantear ideas acerca del anclaje y sujeción para una correcta fijación y mayor seguridad.
- El proceso de diseño CAD se lo debe realizar con la mayor similitud posible al modelo original del vehículo, esto debido a que se puede tener resultados con mayor exactitud y cercanos a la realidad. Hay que tener en cuenta que se puede evitar los mínimos detalles de diseño, ya que ocasionan problemas en el mallado y los resultados no serán correctos. Además, generan mayor gasto computacional y el tiempo de solución es más largo.
- Realizar el estudio CFD con la implementación de más modelos de deflectores en otras zonas del vehículo, por ejemplo: deflectores laterales y en la parte frontal, para analizar posibles mejoras aerodinámicas. Además, analizar el consumo de combustible antes y después de haber implementado los diferentes deflectores con el fin de encontrar las ventajas o desventajas que esto implica.
- Para la selección y fabricación de un prototipo de deflector se debe proponer modelos estéticos y con mejores detalles previamente analizados aerodinámicamente, esto con el fin de garantizar la aceptación por parte de los consumidores. Además, considerar otros materiales y métodos de fabricación para disminuir los precios de venta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alba, R., & Guangasi, D. (2018). *Análisis aerodinámico de un prototipo de auto eléctrico biplaza*. [http://repo.uta.edu.ec/bitstream/123456789/27927/1/Tesis I. M. 459 - Alba Tarabata Reinaldo Paúl y Guangasi Núñez Diego Fabián.pdf](http://repo.uta.edu.ec/bitstream/123456789/27927/1/Tesis%20I.%20M.%20459%20-%20Alba%20Tarabata%20Reinaldo%20Paúl%20y%20Guangasi%20Núñez%20Diego%20Fabián.pdf)
- Alegre Ituarte, J. (2022). *Análisis CFD de la influencia de la aerodinámica en el consumo energético de vehículos en formación*. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALENCIA.
- Anbarci, K., Acikgoz, B., Aslan, R. A., Arslan, O., & Icke, R. O. (2013). Development of an aerodynamic analysis methodology for tractor-trailer class heavy commercial vehicles. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, 6(2), 441–452. <https://doi.org/10.4271/2013-01-2413>
- ANSYS. (2018). *White paper ANSYS Fluent Mosaic technology automatically combines disparate meshes with polyhedral elements for fast*.
- ANSYS. (2015). *Mesh Quality and advanced topics Ansys Workbench 16.0*. Ansys. https://www.academia.edu/16970000/MESH_QUALITY_AND_ADVANCED_TOPICS_ANSYS_WORKBENCH_16_0
- British Automobile Racing Club. (2018). *2018 British truck racing championship sporting & technical regulations organized by the British automobile racing club published copy*. <https://barc.blob.core.windows.net/barcnet/2018-championship-reg-cd33t.pdf>
- Carenzo, S., Peralta, I., & Storti, B. (2013). *Diseño y optimización aerodinámica de un vehículo solar*. XXXII, 19–22.
- Cengel, Y. (2012). *Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones*. McGraw HILL.
- Chowdhury, H., Loganathan, B., Mustary, I., Moria, H., & Alam, F. (2017). *Effect of various deflectors on drag reduction for trucks*. *Energy Procedia*, 110, 561–566. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.185>
- Company, P. (2012). *Kenworth heavy duty body builder manual*.

- Crahmaliuc, R. (2021). *Improving truck aerodynamics*. 3 CFD Simulations for improving truck aerodynamics. <https://www.simscale.com/blog/2017/08/truck-design-cfd-simulation/>
- Das, P., Tsubokura, M., Matsuuki, T., Oshima, N., & Kitoh, K. (2013). Large eddy simulation of the flow-field around a full-scale heavy-duty truck. *Procedia Engineering*, 56, 521–530. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.155>
- DELVAC, C. M. (2022). *Reglamento particular gran premio Móvil DELVAC 2022*. 8.5.2017, 2003–2005.
- DELVAC, M. (2019). *Copa de cabezales Móvil DELVAC*. https://issuu.com/edisonusina/docs/cabezales_portada
- Diario Oficial de la Unión Europea, C. (2012). *Reglamento (UE) N° 1230/2012 de la Comisión*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex%3A32012R1230>
- Fraga, B. E. (2017). “Análisis aerodinámico de un camión Hino serie 500 mediante la inclusión de un alerón en el techo de la cabina.” In *Panorama*.
- Fraija, B. (2006). Estudio de la aerodinámica en los vehículos. *Prospective*, 4(2), 66–70.
- Gao, W., Deng, Z., & He, Y. (2022). A comparative study of tail air-deflector designs on aerodynamic drag reduction of medium-duty trucks. *International Journal of Vehicle Performance*, 8(2–3), 316–333. <https://doi.org/10.1504/IJVP.2022.122138>
- Hariram, A., Koch, T., Mårdberg, B., & Kyncl, J. (2019). A study in options to improve aerodynamic profile of heavy-duty vehicles in Europe. *Sustainability (Switzerland)*, 11(19). <https://doi.org/10.3390/su11195519>
- Hjelm, L., & Bergqvist, B. (2009). European truck aerodynamics - A comparison between conventional and coe truck aerodynamics and a look into future trends and possibilities. *Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics*, 41, 469–477. https://doi.org/10.1007/978-3-540-85070-0_45
- Hosravi, M., Osaddeghi, F., Veisi, M., & Hodayari-b, A. (2015). Aerodynamic drag reduction of heavy vehicles using append devices by CFD analysis. *Journal of Central South University*, 22(12), 4645–4652. <https://doi.org/10.1007/s11771-015-3015-7>

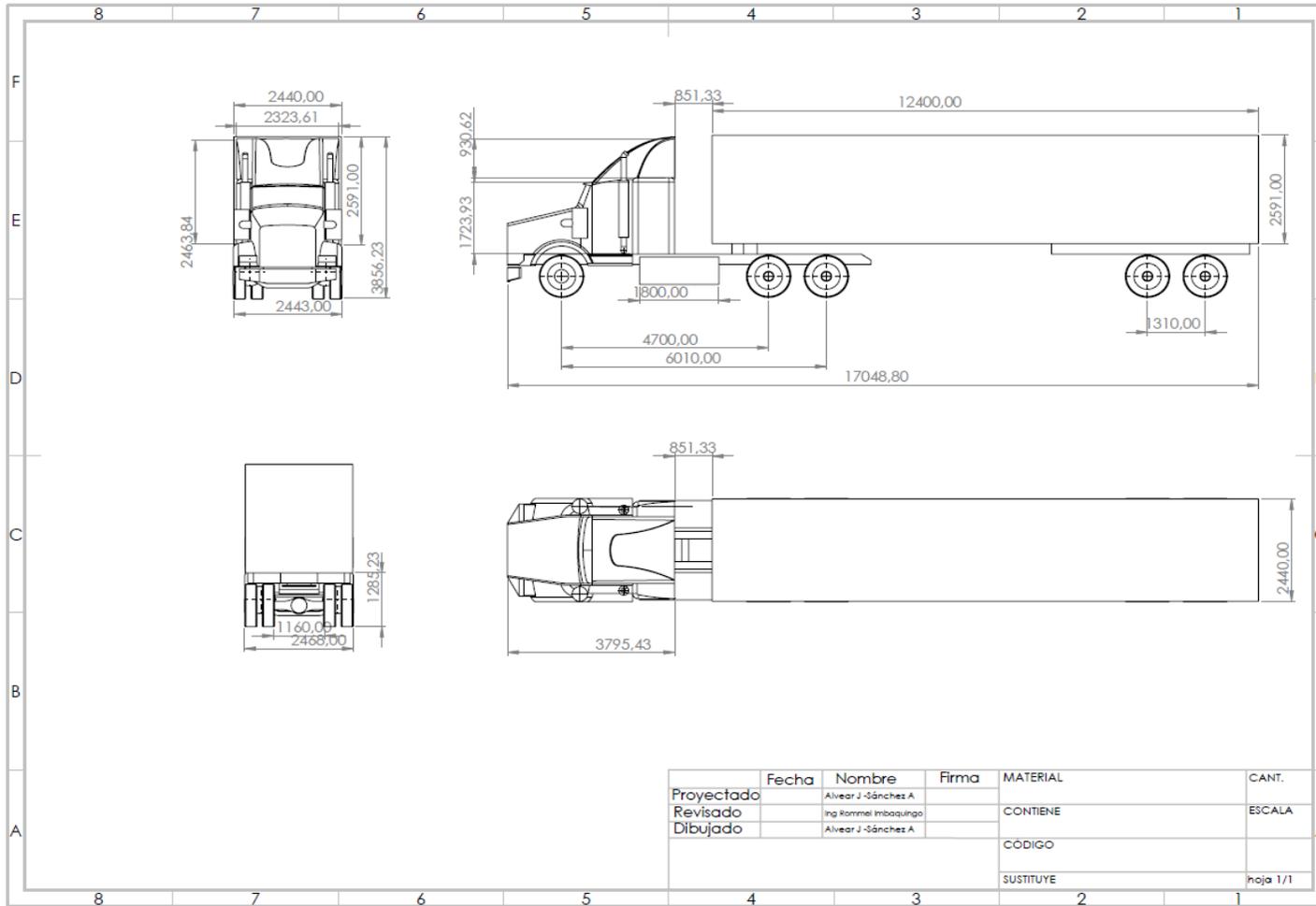
- Hucho, W.-H. (1987). Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering. *In Butterworth -Heinemann Ltd.* (Issue 1).
<http://fluid.annualreviews.org/cgi/doi/10.1146/annurev.fluid.25.1.485>
- INDUSUR. (2020). *Kenworth INDUSUR*. <https://www.indusur.com/kenworth-modelos.php>
- ISO. (1978). *Road vehicles - Dimensions of motor vehicles and towed vehicles - Terms and definitions*.
<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/4729/98970c4607e74d369a7d7781d6c0111f/ISO-612-1978.pdf>
- Kenworth. (2018). *Ficha Técnica*. <https://www.kenworth.com.mx/media/53061/ficha-t800-2019-curvas.pdf>
- Krishna, Z., Gandhar, P., Balasubramanyam, Varghese, A., ANSYS Inc, Zore, K., Sasanapuri, B., Parkhi, G., & Varghese, A. (2019). Ansys mosaic poly-hexcore mesh for high-lift aircraft configuration. *21st Annual CFD Symposium*, September, 1–11.
- Ley Orgánica de Transporte Terrestre Tránsito y Seguridad Vial. (2012). Reglamento a ley de transporte terrestre tránsito y seguridad vial. *Ley*, 1–91.
<https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/03/Decreto-Ejecutivo-No.-1196-de-11-06-2012-REGLAMENTO-A-LA-LEY-DE-TRANSPORTE-TERRESTRE-TRANSITO-Y-SEGURIDAD-VIA.pdf>
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2016). *Licencia de importación - pesos y dimensiones*. <https://www.obraspublicas.gob.ec/consulta-de-citaciones-pesos-y-dimensiones/>
- Molina, I., & Vilaña, D. (2018). *Simulación numérica de contacto entre superficies con movimiento relativo para predicción de desgastes en cojinetes de fricción de aleación de aluminio*. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19315/1/CD-8684.pdf>
- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos*. PEARSON Educación.
- Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2016). *Clasificación vehicular*. 3–9.
- Olivares de Jodar, J. (2011). Estudio aerodinámico aplicado en el campo de la automoción. *Upc*, 1(Estudio aerodinámico), 1–29.
https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/14663/PFC_I.pdf?sequence=2

- Oro, J. M. F. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*. Reverté.
- Paredes Chicaiza, J. A. (2013). El diseño asistido por computadora (CAD) y su incidencia en el proceso de interaprendizaje de la asignatura de dibujo técnico en los estudiantes de décimo año de educación básica del instituto superior tecnológico Docente Guayaquil de la ciudad de Ambato. In *Repositorio Institucional de la Universidad Técnica de Ambato* (Vol. 593, Issue 03).
<https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/7149/1/Mg.DCEv.Ed.1639.pdf>
- Prada, I. (2008). *El papel de la aerodinámica en el diseño de los automóviles convencionales*. 86(1).
- Rojas, O., & Salas, J. (1999). *Producción Automatizada sistemas CAD/CAE/CAM*.
https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/indata/v02_n1/produccion.htm
- Romero, C. (2014). *Análisis de diferentes configuraciones aerodinámicas de un audi r8 mediante técnicas CFD*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Salvador, J. (2018). *Análisis aerodinámico regional mediante técnicas de cfd de un semirremolque tipo plataforma y su incidencia con el consumo de combustible* (Vol. 372, Issue 2). Universidad Internacional SEK.
- Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2016). *Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2656*. 39.
- Sosnowski, M., Krzywanski, J., Grabowska, K., & Gnatowska, R. (2018). Polyhedral meshing in numerical analysis of conjugate heat transfer. *EPJ Web of Conferences*, 180, 4–9. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201817002096>
- Tobar, C., & Torres, L. (2017). *Determinación del consumo de combustible de vehículos en base a los ciclos de conducción epa ftp75 y epa hwfet, en dinamómetro de chasis. Caso de estudio: vehículos Toyota Hilux 2016 4x2 CD 2.7 y Hyundai Getz 2011 1.4 BS*. 11, 5–12.
- Tomás Tatay, Á. (2017). *Análisis de la influencia aerodinámica de la forma estructural de los camiones mediante técnicas CFD*.
https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/87960/44886823T_TFG_14993810576235276058929495328876.pdf?sequence=2

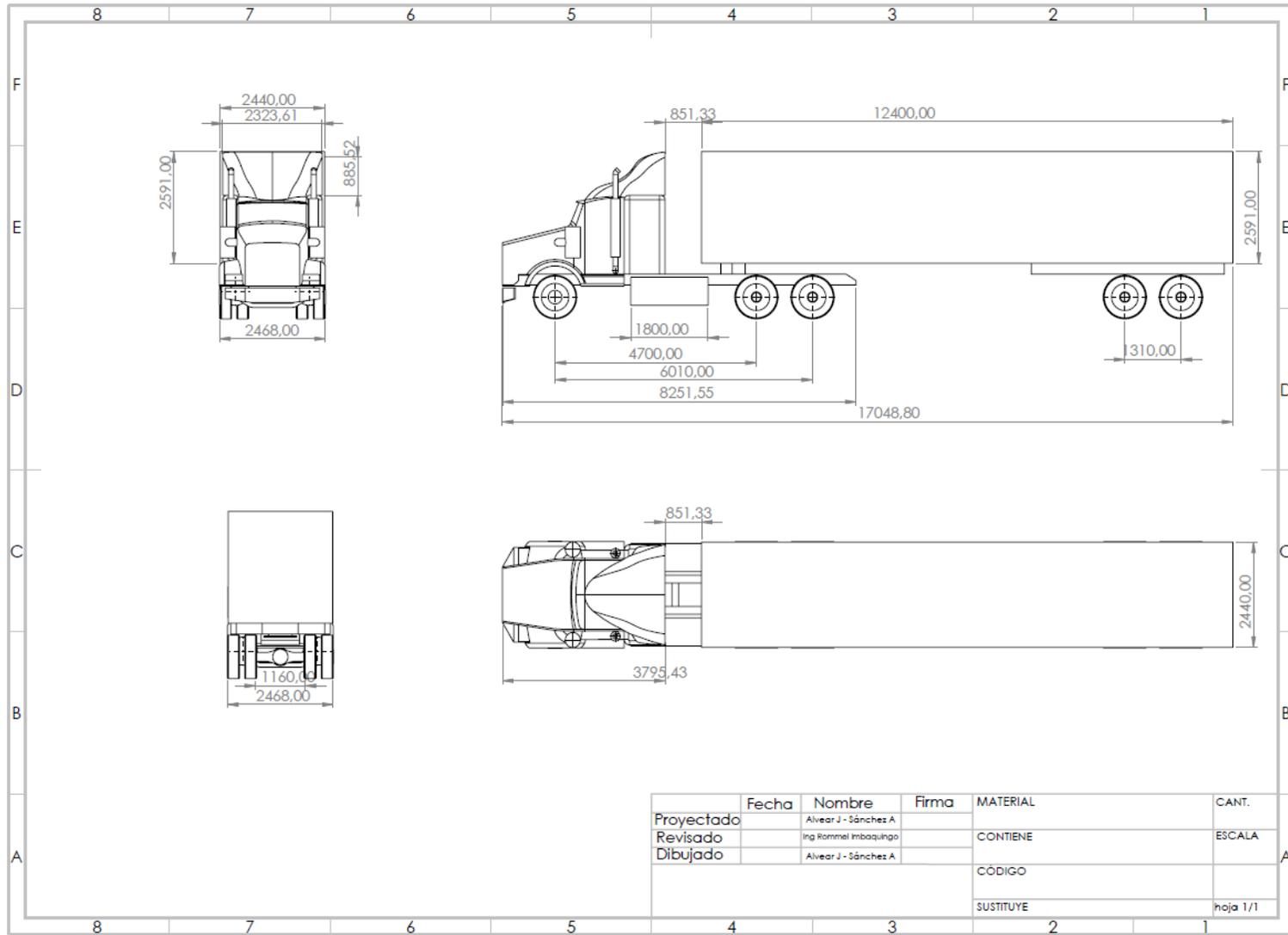
- Um, D. (2015). Solid modeling and applications: rapid prototyping, CAD and CAE theory. *Solid Modeling and Applications: Rapid Prototyping, CAD and CAE Theory*, 1–298. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-21822-9>
- Valencia Chávez, C. J. (2017). *Diseño por elementos finitos de una roto bomba accionada con una turbina pelton para riego de cultivos en los sectores vulnerables [design by finite elements of a pelton turbine-driven roto-pump for crops irrigation in vulnerable sectors]*. <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/26801>
- Xamán, J. (2016). *Dinámica de fluidos computacional para ingenieros*. Palibrio.
- Yanus, Ç., & Yunus Cengel, J. C. (2006). Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones. In *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952.
- Young, W. J. (2001). *Theory of ground vehicles (Tercera Ed)*. John Wiley & Sons.
- Zhang, C., Uddin, M., Robinson, A. C., & Foster, L. (2018). Full vehicle CFD investigations on the influence of front-end configuration on radiator performance and cooling drag. *Applied Thermal Engineering*, 130, 1328–1340. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.086>

ANEXOS

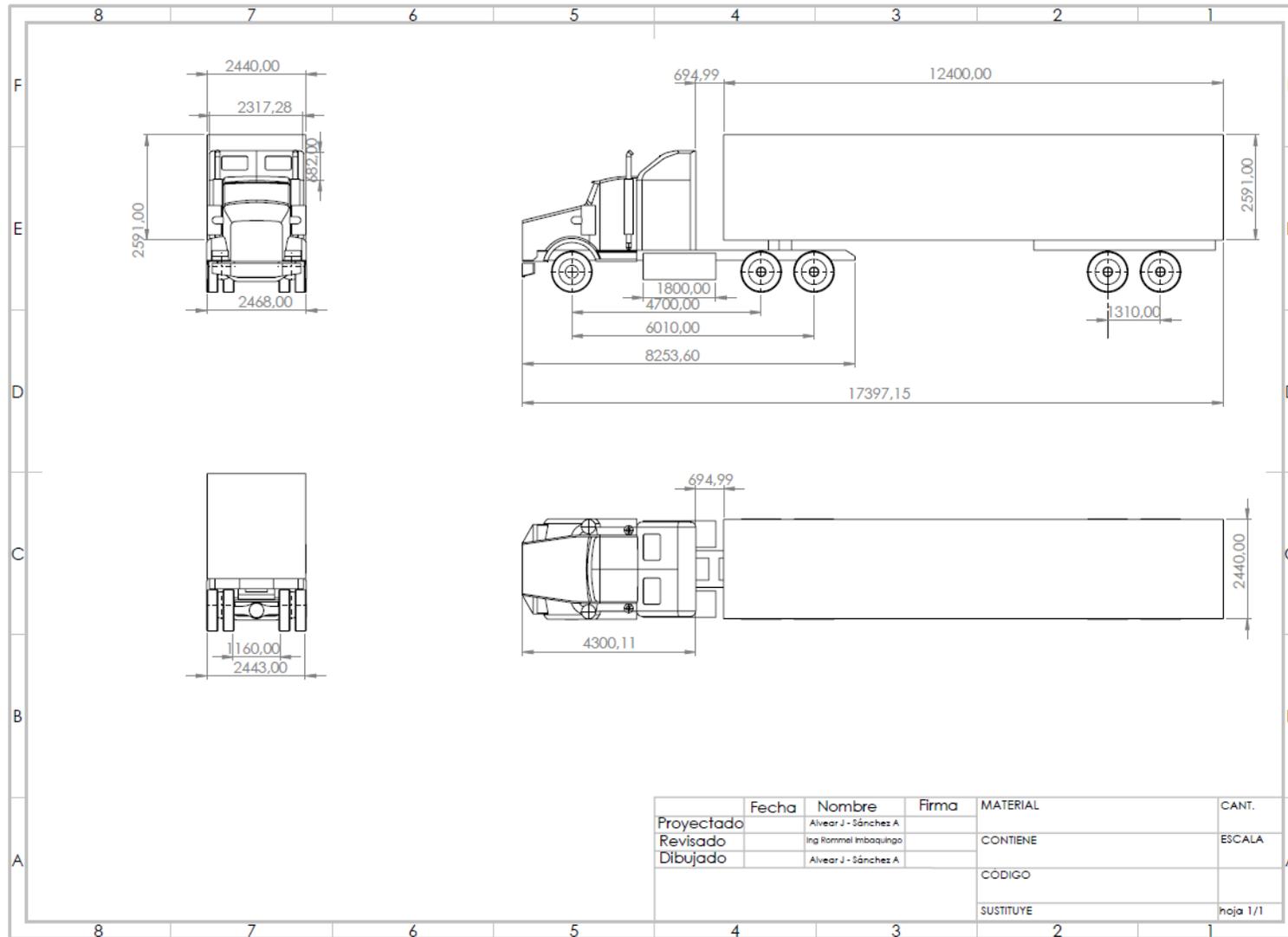
ANEXO I. Planos del tráiler con contenedor y el primer modelo de deflector



ANEXO II. Planos del tráiler con contenedor y el segundo modelo de deflector



ANEXO III. Planos del tráiler con contenedor y el tercer modelo de deflector



ANEXO IV. Código para obtener el coeficiente de arrastre (CD)

```
f1=[3201.6363 6676.8707];% Fuerza del trailer
f2=[2487.1531 5130.3977]; %Fuerza del trailer con el primer modelo
f3=[2557.7313 5325.8878]; %Fuerza del trailer con el segundo modelo
f4=[3062.24 6365.8]; %Fuerza del trailer con el tercer modelo
```

```
a1=9.44; %Area del trailer
a2=9.44; %Area del trailer con el primer modelo
a3=9.44; %Area del trailer con el segundo modelo
a4=9.44; %Area del trailer con el tercer modelo
```

```
w=[90 130]; %velocidades
v=[w*(10/36)];
```

```
d=1.225; %densidad del aire
```

```
y=(f1)*(2/(d*a1)); %Inicio CD
u=v.^2;
t=u.^-1;
CDt=y.*t %Fin CD
```

```
yy=(f2)*(2/(d*a2)); %Inicio CD
uu=v.^2;
tt=uu.^-1;
CD1=yy.*tt %Fin CD
```

```
yyy=(f3)*(2/(d*a3)); %Inicio CD
uuu=v.^2;
ttt=uuu.^-1;
CD2=yyy.*ttt %Fin CD
```

```
yyyy=(f4)*(2/(d*a4)); %Inicio CD  
uuuu=v.^2;  
tttt=uuuu.^-1;  
CD3=yyyy.*tttt %Fin CD
```

ANEXO V. Código para obtener la presión

```
f1=[3201.6363 6676.8707];% Fuerza del trailer
```

```
f2=[2487.1531 5130.3977]; %Fuerza del trailer con el primer modelo
```

```
f3=[2557.7313 5325.8878]; %Fuerza del trailer con el segundo modelo
```

```
f4=[3062.24 6365.8]; %Fuerza del trailer con el tercer modelo
```

```
a1=9.44; %Area del trailer
```

```
a2=9.44; %Area del trailer con el primer modelo
```

```
a3=9.44; %Area del trailer con el segundo modelo
```

```
a4=9.44; %Area del trailer con el tercer modelo
```

```
%Presion 1
```

```
Pt=f1./a1
```

```
%Presion 2
```

```
P1=f2./a2
```

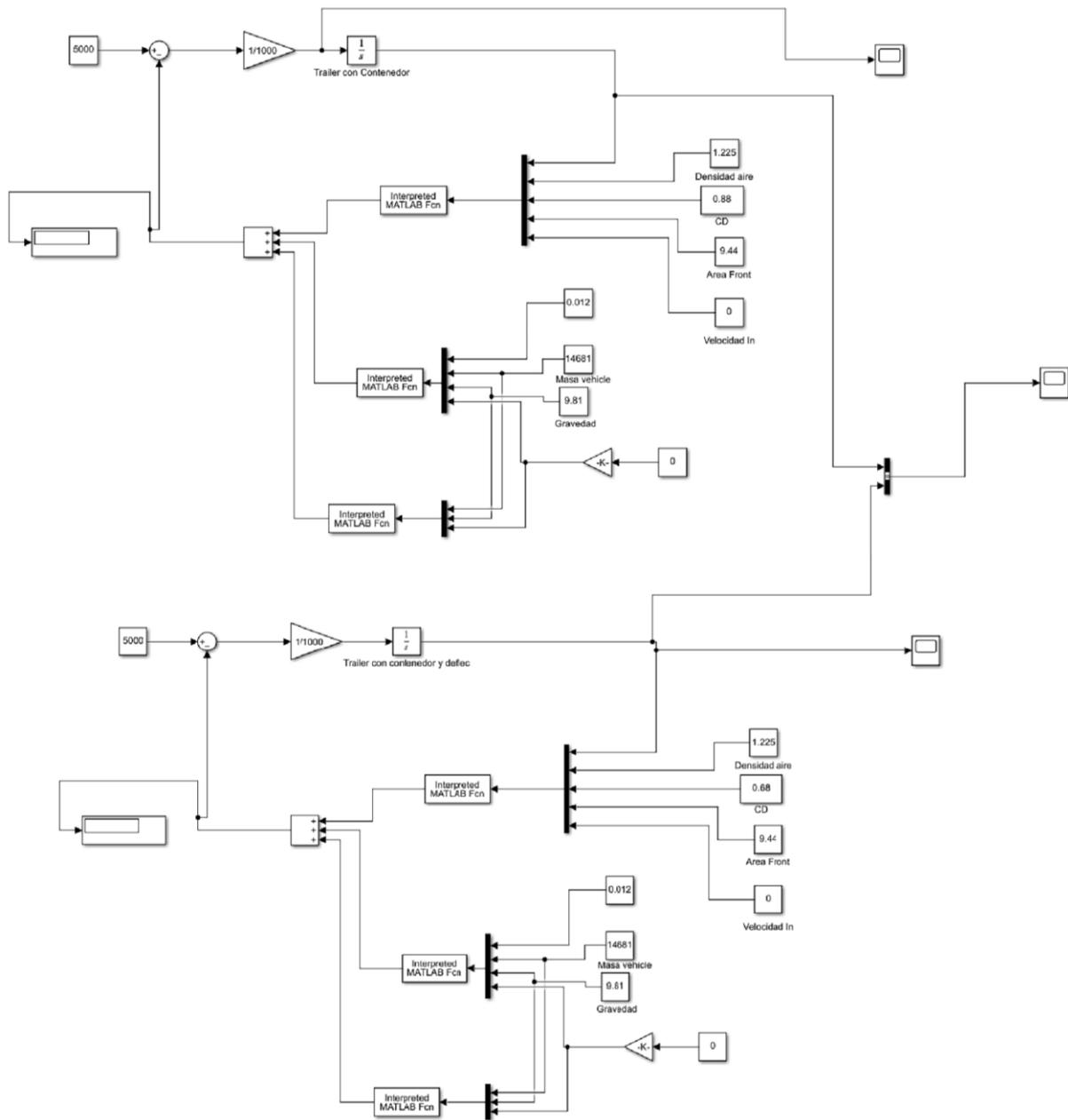
```
%Presion 3
```

```
P2=f3./a3
```

```
%Presion 4
```

```
P3=f4./a4
```

ANEXO VI. Diagrama de bloques para obtener la velocidad



ANEXO VII. Tabla de las propiedades del aire

Tabla 1.1 Propiedades del Aire

Temperatura (°C)	Densidad (kg/m³)	Viscosidad dinámica (kg/m*s)	Viscosidad cinemática (m²/s)
-20	1.394	1.630x10 ⁻⁵	1.169 x10 ⁻⁵
-10	1.341	1.680x10 ⁻⁵	1.252 x10 ⁻⁵
0	1.292	1.729x10 ⁻⁵	1.338 x10 ⁻⁵
5	1.269	1.754x10 ⁻⁵	1.382 x10 ⁻⁵
10	1.246	1.778x10 ⁻⁵	1.426 x10 ⁻⁵
15	1.225	1.802x10 ⁻⁵	1.470 x10 ⁻⁵
20	1.204	1.825x10 ⁻⁵	1.516 x10 ⁻⁵
25	1.184	1.849x10 ⁻⁵	1.562x10 ⁻⁵
30	1.164	1.872x10 ⁻⁵	1.608 x10 ⁻⁵
35	1.145	1.895x10 ⁻⁵	1.655 x10 ⁻⁵
40	1.127	1.918x10 ⁻⁵	1.702 x10 ⁻⁵
45	1.109	1.941x10 ⁻⁵	1.750 x10 ⁻⁵
50	1.092	1.963x10 ⁻⁵	1.798 x10 ⁻⁵

Fuente: (CENGEL, 2012, p. 954)

ANEXO VIII. Proceso de diseño del tráiler

<https://youtu.be/VRvdECUcVIE>

ANEXO IX. Proceso de simulación del tráiler

Parte 1: <https://youtu.be/sC9mRMrlb7g>

Parte 2: <https://youtu.be/gOMVTFo0pto>