

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

Trabajo de Fin de Carrera Titulado:

“ANÁLISIS AERODINÁMICO REGIONAL MEDIANTE TÉCNICAS DE CFD DE UN SEMIRREMOLQUE TIPO PLATAFORMA Y SU INCIDENCIA CON EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE.”

Realizado por:

JUAN CARLOS SALVADOR JIMENEZ

Director del proyecto:

Ing. Mg. Jefferson Rubio

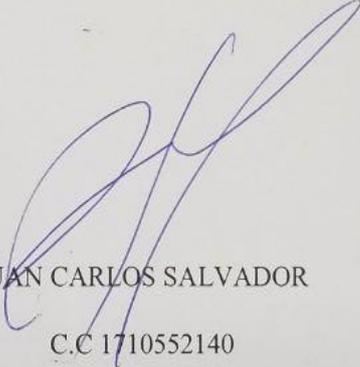
Como requisito para la obtención del título de:

MAGISTER EN GESTIÓN AMBIENTAL

Quito, 09 de marzo de 2018

DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, JUAN CARLOS SALVADOR JIMENEZ, con cédula de ciudadanía # 171055214-0, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento. A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.



JUAN CARLOS SALVADOR

C.C 1710552140

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

“ANÁLISIS AERODINÁMICO REGIONAL MEDIANTE TÉCNICAS DE
CFD DE UN SEMIRREMOLQUE TIPO PLATAFORMA Y SU INCIDENCIA CON
EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE.”

Realizado por:

JUAN CARLOS SALVADOR JIMENEZ

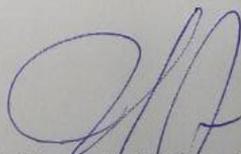
como Requisito para la Obtención del Título de:

MAGISTER EN GESTIÓN AMBIENTAL

ha sido dirigido por el profesor

JEFFERSON RUBIO AGUIAR

quien considera que constituye un trabajo original de su autor



Jefferson Rubio Aguiar
DIRECTOR

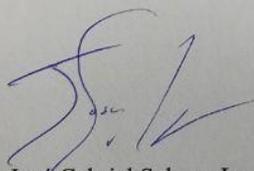
LOS PROFESORES INFORMANTES

Los Profesores Informantes:

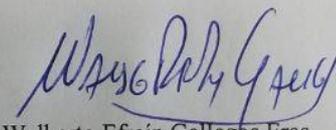
José Gabriel Salazar Loor

Walberto Efraín Gallegos Eras

Después de revisar el trabajo presentado,
lo han calificado como apto para su defensa oral ante
el tribunal examinador



José Gabriel Salazar Loor



Walberto Efraín Gallegos Eras

Quito, 08 de marzo de 2018

AGRADECIMIENTO

...a usted, que está leyendo este trabajo

ANÁLISIS AERODINÁMICO REGIONAL MEDIANTE TÉCNICAS DE CFD DE UN SEMIRREMOLQUE TIPO PLATAFORMA Y SU INCIDENCIA CON EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE.

Regional aerodynamic analysis through CFD techniques of a platform type semirremolque and its incidence with fuel consumption

Juan C. Salvador, Jefferson Rubio Aguiar

Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales. Universidad Internacional SEK Ecuador

RESUMEN

Actualmente la combustión de combustibles fósiles contribuye en gran cantidad a la generación de gases de efecto invernadero, ya que la mayoría de emisiones generadas en el proceso son contaminantes, en este sentido y teniendo en cuenta que la optimización aerodinámica en vehículos provoca un desempeño eficiente en cuanto a la movilidad generando una reducción en la emisión de gases, se presenta el siguiente análisis el cual está enfocado en el cálculo del coeficiente de arrastre (Drag), sustentación (Lift), resistencia aerodinámica y potencia para vencer la resistencia del aire; estos datos junto con las características mecánicas del tractocamión permite establecer parámetros en relación al consumo de combustible y potencia requerida para el movimiento.

Se realizó el análisis aerodinámico bajo diferentes condiciones climáticas para lo cual se efectuó el levantamiento 3D de la geometría tanto del semirremolque como del tractocamión (con la capacidad de remolcarlo), con el modelo elaborado y con ayuda de software destinado al diseño asistido por computador, se analizó la reacción al someterlo a características medioambientales propias del Ecuador.

PALABRAS CLAVE:

Aerodinámica de camiones; CFD; resistencia del aire; combustible; coeficiente de arrastre; sustentación

ABSTRACT

Currently the combustion of fossil fuels contributes greatly to the generation of greenhouse gases, since most of the emissions generated in the process are contaminants, in this sense and taking into account that automatic optimization in vehicles is effective as to the mobility generating a reduction in the emission of gases, the following analysis is presented, which is focused on the calculation of drag coefficient, lift, aerodynamic resistance and power for air resistance; These data together with the mechanical characteristics of the tractor are in the parameter of the relation with the fuel consumption and the power required for the movement.

The objective is to perform the aerodynamic analysis under different climatic conditions to a semi-trailer intended for heavy transport using CFD techniques and relate its geometric shape with the incidence in fuel consumption, for which the 3D survey of the geometry of both the semi-trailer was carried out Like the tractor, with the model and with the help of software designed for computer-aided design, the reaction will be analyzed by subjecting it to the environmental characteristics of Ecuador.

When performing the analysis of the air flow and its interaction with the vehicle, it can be reduced over time by analyzing the effectiveness of the geometry of the semi-trailer, which will influence fuel consumption.

KEY WORDS:

Aerodynamics of trucks; CFD; air resistance; gas; drag coefficient; lift

INTRODUCCIÓN

OPORTUNIDADES DE MERCADO

El subsidio destinado a los combustibles por parte del gobierno ecuatoriano asciende aproximadamente a 294.2 millones de dólares en lo relacionado al diésel durante el año 2016 (Banco Central del Ecuador, 2017), adicionalmente, la fabricación de semirremolques en Ecuador se realiza tomando como base modelos diseñados en otros países; en los talleres el diseño se enfoca en la resistencia estructural, quedando la optimización aerodinámica relegada a la estética.

En Ecuador no existen empresas dedicadas al análisis aerodinámico de vehículos, sin embargo, se encontró sitios donde se elabora de manera artesanal alerones en fibra de vidrio para ciertas marcas de camiones, construcción que la realizan imitando componentes extranjeros que vienen como accesorios en camiones nuevos.

A nivel internacional, entre las instituciones públicas que han intervenido en el desarrollo de estas tecnologías encontramos al “National Research Council Canada - Centre for Surface Transportation Technology”, el cual tiene programas de investigación que promueven activamente la reducción de la resistencia aerodinámica en camiones y autobuses.

Existen además empresas a nivel internacional, que de manera comercial realizan los estudios de eficiencia aerodinámica tales como “Freightwing” en Estados Unidos de Norteamérica o “SystemDragReduction” en España.

ESTIMACIÓN DE LOS VEHÍCULOS DE ESTE TIPO EN EL PAÍS Y LAS PRINCIPALES RUTAS.

En relación a la cantidad de semirremolques construidos en el país, la Encuesta de Manufactura y Minería (INEC), indica que para el 2010, la actividad económica denominada como “Fabricación de Vehículos Automotores, Remolques y Semirremolques” aporta alrededor de un 3% de la producción nacional de bienes.

Tabla 1. Producción total, valor agregado, divisiones de actividad - 2010

DIVISIONES CIU	ACTIVIDAD ECONÓMICA	PRODUCCIÓN TOTAL	VALOR AGREGADO A PRECIOS PRODUCTOR
	TOTAL	27.121.503.820	10.877.992.702
	MINERÍA	3.884.868.033	3.234.074.432
06	EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO CRUDO Y GAS NATURAL	3.814.643.934	3.196.684.808
07	EXTRACCIÓN DE MINERALES METALÍFEROS	49.142.372	29.502.817
08	EXPLOTACIÓN DE OTRAS MINAS Y CANTERAS		
	MANUFACTURA	23.236.635.787	7.643.918.270
10	ELABORACIÓN DE PRODUCTOS ALIMENTICIOS	7.958.683.879	2.857.351.693
11	ELABORACIÓN DE BEBIDAS	931.989.048	322.750.997
12	ELABORACIÓN DE PRODUCTOS DE TABACO	34.743.872	7.415.418
13	FABRICACIÓN DE PRODUCTOS TEXTILES	379.292.790	128.320.679
14	FABRICACIÓN DE PRENDAS DE VESTIR	240.738.188	102.216.713
15	FABRICACIÓN DE CUEROS Y PRODUCTOS CONEXOS	168.701.351	62.570.705
16	PRODUCCIÓN DE MADERA Y FABRICACIÓN DE PRODUCTOS DE MADERA Y CORCHO, EXCEPTO MUEBLES; FABRICACIÓN DE ARTÍCULOS DE PAJA	321.144.924	126.476.168
17	FABRICACIÓN DE PAPEL Y DE PRODUCTOS DE PAPEL	986.831.045	299.663.580
18	IMPRESIÓN Y REPRODUCCIÓN DE GRABACIONES	314.387.579	123.749.053
19	FABRICACIÓN DE COQUE Y DE PRODUCTOS DE LA REFINACIÓN DEL PETRÓLEO	5.065.923.806	1.345.879.384
20	FABRICACIÓN DE SUSTANCIAS Y PRODUCTOS QUÍMICOS	1.220.331.767	533.251.432
21	FABRICACIÓN DE PRODUCTOS FARMACÉUTICOS, SUSTANCIAS QUÍMICAS MEDICINALES Y PRODUCTOS BOTÁNICOS DE USO FARMACÉUTICO	279.731.922	117.300.323
22	FABRICACIÓN DE PRODUCTOS DE CAUCHO Y PLÁSTICO	1.244.137.975	467.129.382
23	FABRICACIÓN DE OTROS PRODUCTOS MINERALES NO METÁLICOS	1.116.884.087	474.399.965
24	FABRICACIÓN DE METALES COMUNES	893.824.441	291.278.479
25	FABRICACIÓN DE PRODUCTOS ELABORADOS DE METAL, EXCEPTO MAQUINARIA Y EQUIPO	480.024.722	150.481.653
26	FABRICACIÓN DE PRODUCTOS DE INFORMÁTICA, ELECTRÓNICA Y ÓPTICA	24.826.576	4.561.067
27	FABRICACIÓN DE EQUIPO ELÉCTRICO	427.355.220	95.183.573
28	FABRICACIÓN DE MAQUINARIA Y EQUIPO NCP	76.180.965	22.746.034
29	FABRICACIÓN DE VEHÍCULOS AUTOMOTORES, REMOLQUES Y SEMIRREMOLQUES	818.444.017	16.201.910
30	FABRICACIÓN DE OTROS TIPOS DE EQUIPOS DE TRANSPORTE	16.657.952	9.234.740
31	FABRICACIÓN DE MUEBLES	182.994.073	61.538.266
32	OTRAS INDUSTRIAS MANUFACTURERAS	52.805.589	24.217.057

Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), Encuesta de Manufactura y Minería 2010. Quito - Ecuador.

Se decidió tomar la ruta entre Guayaquil y Riobamba debido a que una gran parte de la producción de cemento al granel y la producción agrícola se la realiza en esta zona de la sierra centro del país y es transportada a las diferentes provincias para ser comercializada; por otra parte, la localización del puerto de Guayaquil (Costa) el cual recepta un gran porcentaje de mercancía importada por vía marítima para luego ser distribuido a las diferentes provincias de nuestro país; estos lugares representan microclimas con características bastante diferenciadas en los cuales el semirremolque va a transitar.

CONSUMO PROMEDIO

En relación al consumo promedio de combustibles de acuerdo al balance energético presentado por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) en el anuario de 2017 de estadísticas energéticas, se tiene que el consumo final en el sector transporte es de 6.15 Mtep en Ecuador, siendo el sector de mayor requerimiento energético, cabe señalar que el balance presentado en la Ilustración 1 referente al sector transporte incluye todos los tipos de combustible.

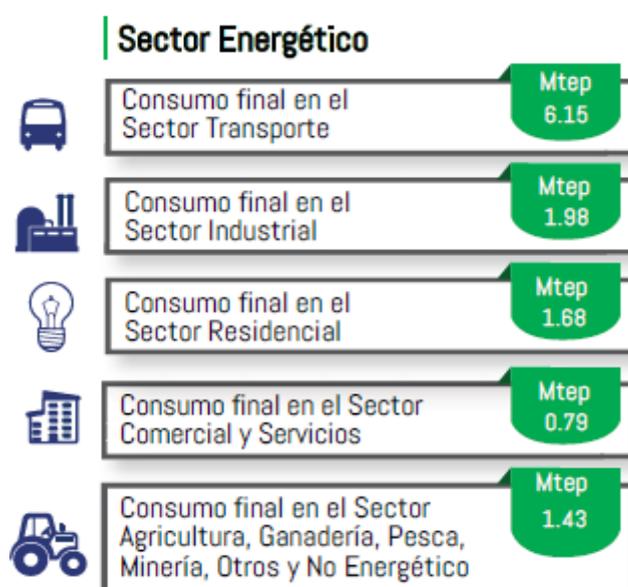


Ilustración 1 Distribución del consumo energético - Ecuador
Fuente: Anuario de 2017 de estadísticas energéticas (OLADE)

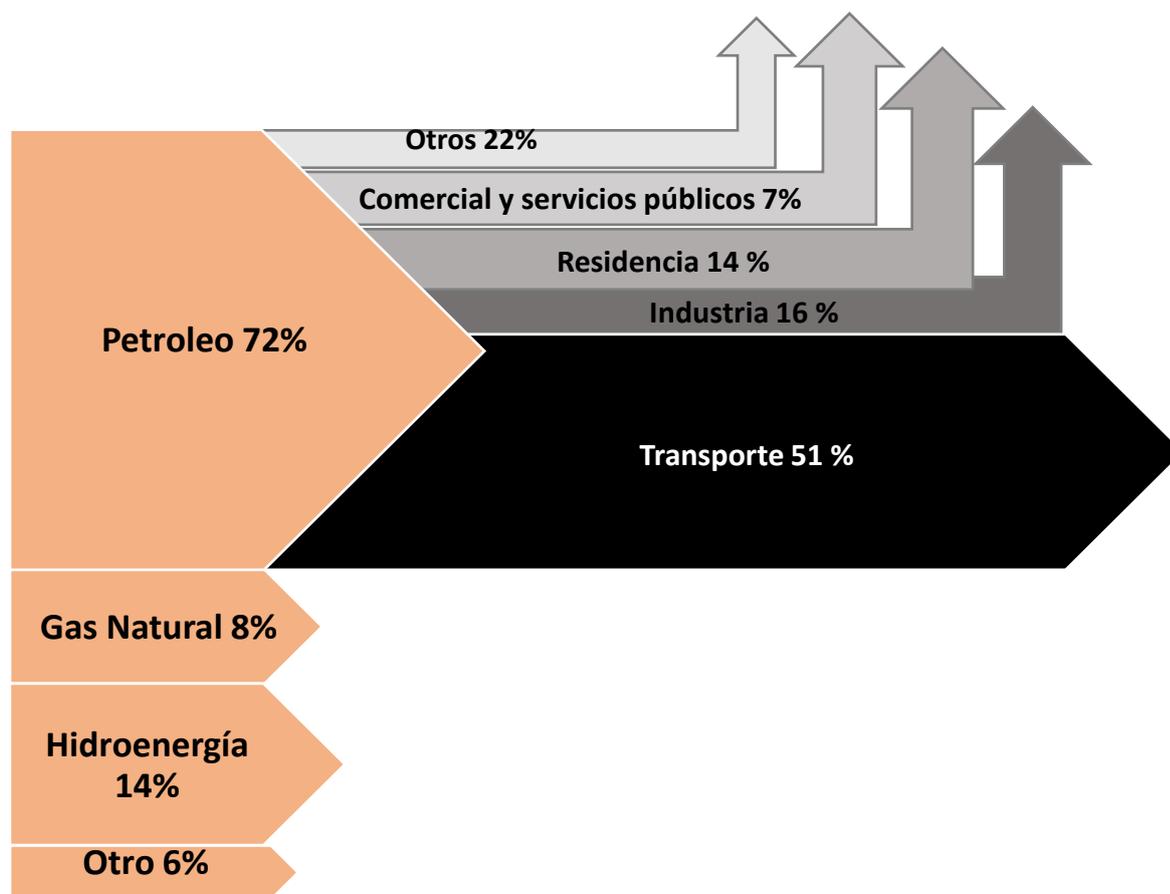


Ilustración 2 Distribución del consumo del petróleo - Ecuador
Fuente: Anuario de 2017 de estadísticas energéticas (OLADE)

En Ecuador el 51 % del uso de petróleo refinado es destinado al transporte, esto sumado al subsidio que el estado destina a la comercialización de los derivados de hidrocarburos indica que la optimización en el consumo de combustibles debe realizarse de manera urgente.

Dado que el consumo de combustible usado en el transporte de mercancías depende de diferentes factores como: peso de la carga, tipo de pendientes, estado del camino, presión en los neumáticos, forma de manejo (frenado, cambios de velocidad, Rpm, etc.), la manera de obtener un valor real es mediante la instalación de sensores en el vehículo que permitan relacionar potencia, peso, cantidad de combustible utilizado y otros factores; el presente estudio se enfoca en el análisis de las cargas parasitas que se generan por la aerodinámica del semirremolque, adicionalmente se pretende determinar mediante la mecánica de fluidos

computacional, puntos de control donde se puedan realizar modificaciones para la reducción de fuerzas parasitas que desemboquen en la reducción en el consumo de combustible.

TIPO DE CARGA QUE SE VA A SIMULAR

Debido a la variedad de elementos a transportar en este tipo de semirremolques, sumado a la subutilización de los mismos, se ha tomado para el presente análisis un semirremolque apto para el transporte de cemento y contenedores sin carga.

Del estudio “Análisis aerodinámico regional mediante CFD de un semirremolque cisterna para el transporte de cemento” (Remache, Tipanluisa, Salvador, & Erazo, 2015), en el cual se analiza la aerodinámica de un semirremolque de geometría no convencional, se tomará los lineamientos de simulación como línea base, tomando similares condiciones ambientales y aplicándolas en un semirremolque con geometría estándar (comercialmente denominado como “plataforma cama alta”).

SOFTWARE UTILIZADO

El presente análisis fue realizado con software especializado en diseño asistido por computador y dinámica de fluidos computacional, entre las principales ventajas que se obtienen al desarrollar el prototipado digital es evaluar la vida útil y la integridad mecánica de componentes críticos en diseño, abaratando costos de fabricación debidos a pruebas en prototipos físicos además de permitir la verificación de las características aerodinámicas sin necesidad de recurrir a un túnel de viento o equipo físico especializado.

En relación a los programas con los que se realizan los análisis de simulación CFD los más utilizados tanto por su facilidad de uso, como por su fiabilidad en los resultados son: ANSYS, COMSOL, el módulo FlowSimulation de SolidWorks, Simulation CFD de Autodesk, CATIA, entre otros.

Para efectuar la simulación, se desarrolló un modelo 3D con las dimensiones y rasgos más sobresalientes del semirremolque denominado comercialmente como “plataforma cama alta” de fabricación nacional.

Se realizó un despiece completo del equipo para obtener un ensamble con medidas reales.

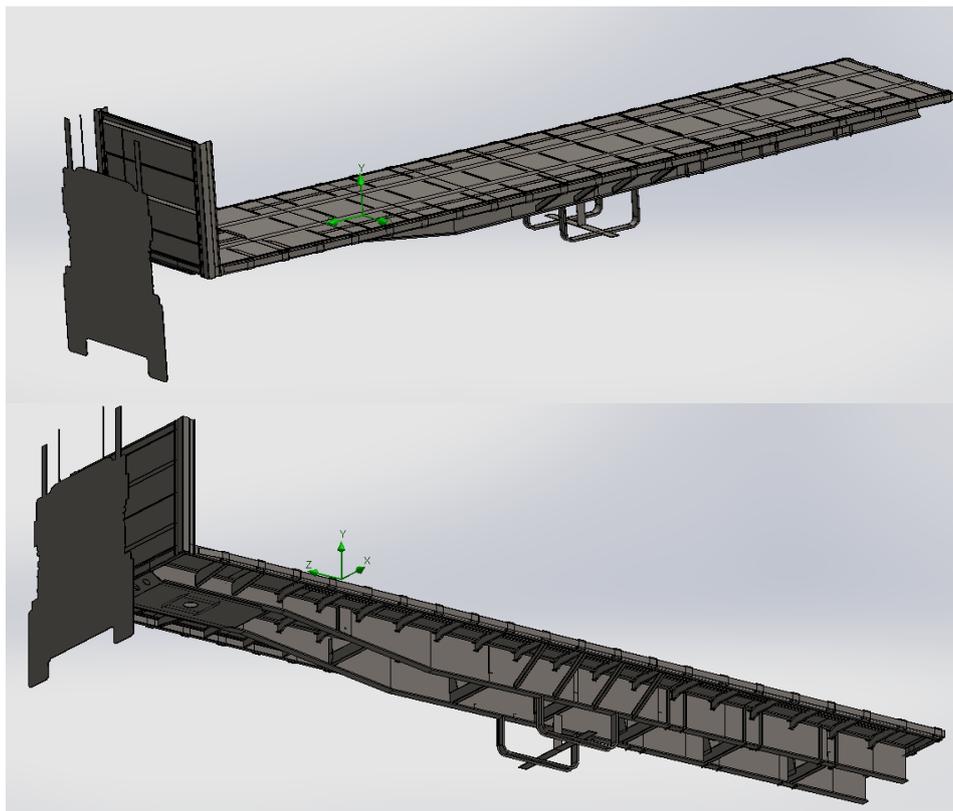


Ilustración 3 Ensamble del Semirremolque
Fuente: Salvador J. 2017

MATERIALES Y MÉTODOS

Se estableció parámetros que permiten obtener un criterio apropiado acerca de la reacción aerodinámica que tiene la carrocería cuando se la expone al viento; la simulación se realizó procurando emular situaciones reales en las que opera el semirremolque.

Factores como la velocidad y características medioambientales, se obtuvieron de reglamentos e instituciones estatales a cargo de recopilar la información; entre la

Tabla 3. Características del viento Guayaquil – anuario meteorológico

MA2V																GUAYAQUIL U.ESTATAL (RADIO SONDA)										INAMHI	
MES	HELIOFANIA (Horas)	TEMPERATURA DEL AIRE A LA SOMBRA (°C)						HUMEDAD RELATIVA (%)				PUNTO DE ROCÍO (°C)	TENSION DE VAPOR (hPa)	PRECIPITACION(mm)		Número de días con precipitación											
		ABSOLUTAS			M E D I A S			Máxima día	Mínima día	Media	Máxima día			Mínima día	Media		Mensual	Máxima en 24hrs	Mensual								
		Máxima	Mínima	Media	Máxima	Mínima	Mensual																				
ENERO	57.8	35.8	6	22.1	11	31.6	23.8	27.4	95	29	43	6	76	22.5	27.3	171.8	108.0	10	17								
FEBRERO	53.7	34.6	22			31.7	23.9	27.5	98	13	54	1	80	23.6	29.1	364.4	66.2	5	24								
MARZO	81.5	34.5	7	23.3	4	32.4	24.3	27.9	97	20	55	4	78	23.4	28.8	160.2	51.8	30	24								
ABRIL	107.8	35.1	16	23.1	5	32.6	24.7	28.2	94	6	51	16	76	23.4	28.8	192.1	63.8	9	17								
MAYO	63.7	33.6	7	21.7	19	31.5	23.8	27.4	93	3	58	16	75	22.4	27.1	17.3	17.1	2	2								
JUNIO	64.6	33.8	15	20.6	28	30.2	22.3	25.7	91	6	53	15	75	20.8	24.6	11.9	10.5	20	6								
JULIO	104.4	34.0	28	20.5	9	30.1	21.6	25.5					75	20.4	24.0	3.1	1.2	13	7								
AGOSTO	114.3	34.4	29	19.2	27	30.0	20.5	24.7	93	20	50	18	75	19.9	23.2	0.2	0.2	12	1								
SEPTIEMBRE	110.3	33.2	26	19.7	17	30.6	20.7	25.0	94	29	50	3	75	20.0	23.4	0.0	0.0	1	0								
OCTUBRE	146.0					30.8	20.5	25.5					71	19.6	22.9	0.0											
NOVIEMBRE	68.0																										
DICIEMBRE	58.8	33.6	7	20.0	4	29.9	22.0	25.8	96	15	48	6	75	20.8	24.6	106.1	28.4	18	15								
VALOR ANUAL	1030.9																										

MES	EVAPORACION (mm)		NUBOSIDAD MEDIA (Octas)	VELOCIDAD MEDIA Y FRECUENCIAS DE VIENTO																Vel.Mayor Observada (m/s)	VELOCIDAD MEDIA (Km/h)				
	Suma	Máxima en 24hrs		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	CALMA	No	Obs	Dir										
	Mensual	Mensual		(m/s)	%	(m/s)	%	(m/s)	%	(m/s)	%	(m/s)	%	(m/s)	%	(m/s)	%	(m/s)	%			(m/s)	%	(m/s)	%
ENERO	116.7		7	1.0	7	1.0	25	1.0	5	1.2	7	1.1	19	1.3	17	2.3	3	1.0	1	16	93	4.0	W	12.4	
FEBRERO	81.5	4.5	22	7	1.0	11	1.0	39	1.0	2	1.0	5	1.0	10	1.3	14	1.0	1	0.0	0	18	84	3.0	SW	4.3
MARZO	121.2	7.0	10	7	1.1	10	1.2	22	1.6	10	1.3	9	1.2	10	1.4	24	1.0	3	0.0	0	14	93	3.0	SW	9.1
ABRIL	122.6	7.1	10	7	1.0	9	1.4	22	0.0	0	1.0	1	1.1	16	1.2	37	1.5	2	0.0	0	13	90	3.0	SW	19.8
MAYO	121.5	6.1	16	7	1.0	5	1.0	5	1.7	3	1.4	8	1.1	26	1.2	40	1.0	3	0.0	0	10	93	3.0	SW	29.0
JUNIO	109.7	5.4	30	7	1.2	7	1.0	6	1.3	4	2.0	3	1.1	30	1.5	42	2.3	3	1.0	1	3	90	4.0	SW	30.1
JULIO	128.0		6																						34.6
AGOSTO	137.8	6.6	1	6	0.0	0	1.0	2	1.5	2	1.8	7	1.6	33	1.4	53	2.0	1	0.0	0	2	93	3.0	SW	39.9
SEPTIEMBRE	155.8	6.9	24	7	0.0	0	0.0	0	0.0	0	2.7	3	1.5	38	1.8	54	1.5	2	0.0	0	2	90	4.0	SE	39.5
OCTUBRE	-179.0		6																						40.5
NOVIEMBRE																									
DICIEMBRE	112.7	7.0	7	7	0.0	0	1.3	4	2.0	3	1.5	4	1.2	39	1.5	36	1.0	2	1.0	1	11	93	3.0	S	33.8
VALOR ANUAL																									

Fuente: Anuario Meteorológico - Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología

Los límites permisibles de velocidad tomados del Registro Oficial No 731 publicado el lunes 25 de junio del 2012 – Segundo suplemento, en el Capítulo VI Artículo 191 indica:

“Los límites máximos y rangos moderados de velocidad vehicular permitidos en las vías públicas, con excepción de trenes y autocarriles, son los siguientes:

"3. Para vehículos de transporte de carga:

Tipo de vía

Límite máximo

Rango moderado

Fuera de rango moderado

Urbana

40 Km/h

>40 – 50 Km/h

>50 Km/h

Perimetral

70 Km/h

>70 Km/h – 95 Km/h

> 95 Km/h

Rectas en carreteras

70 Km/h

>70 Km/h – 100 Km/h

> 100 Km/h

Curvas en carreteras

40 Km/h

>40 Km/h – 60 Km/h

>60 Km/h”

Con la ayuda de un scanner 3D se procedió a obtener la nube de puntos de un tractocamión estándar con la capacidad de realizar el arrastre de la estructura, con el objetivo de obtener datos respecto a las líneas de flujo que serán afectadas por el semirremolque; dado que el movimiento del semirremolque no es autónomo, siempre se obtendrán turbulencias que afecten el diseño aerodinámico



Ilustración 4 Nube de Puntos del Camión
Fuente: Salvador J. 2017

Con la nube de puntos obtenida se procedió a unir los más sobresalientes para con esto tener la sombra que definirá las líneas de flujo entrantes.

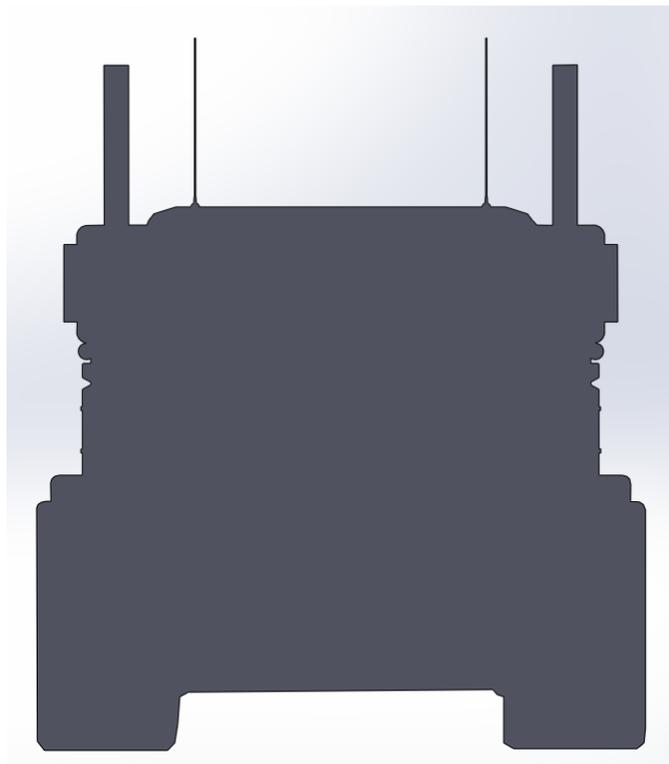


Ilustración 5 Sombra del Camión
Fuente: Salvador J. 2017

Una vez definido la entrada del flujo de aire que tendrá el semirremolque, se procedió a realizar el ensamble, definir parámetros tanto de viento, presión, temperatura, dirección, velocidad en el software como características de simulación.

Los parámetros a analizar con la simulación CFD son: Drag (Arrastre), Lift (Sustentación), Número de Reynolds, Resistencia Aerodinámica, Velocidad de Flujo, Presión, Capa Límite, Estela, Turbulencia, Potencia para vencer la resistencia del aire (Pa), Resistencia del aire (R).

La información como fórmulas de cálculo y constantes se obtuvo de bibliografía especializada (Streeter & Wylie, 1980).

Se realizó el despiece completo del equipo, para obtener un ensamble con medidas reales y disminuir el porcentaje de error; se pretende que los datos obtenidos puedan ser usados para futuras optimizaciones aerodinámicas.

Con los datos investigados y el modelo 3D, tanto del tractocamión como del semirremolque se realizó la simulación aplicando diferentes escenarios climatológicos tanto en la costa – Guayaquil como en la sierra - Riobamba, y así determinar la potencia necesaria para vencer la resistencia del aire; se calculó los coeficientes de arrastre y sustentación, las velocidades de flujo que se dan a lo largo del modelo, la presión que se genera en diferentes puntos del semirremolque, por último, se realizó la simulación de las turbulencias generadas en el prototipo.

CONCEPTOS GENERALES AERODINÁMICOS

RESISTENCIA AERODINÁMICA

Según el “Estudio aerodinámico aplicado en el campo de la automoción” presentado por José Olivares de Jodar, "se denomina resistencia aerodinámica, o simplemente resistencia, al componente de la fuerza que sufre un cuerpo al moverse a través del aire en la dirección de la velocidad relativa entre el aire y el cuerpo. La resistencia es siempre de sentido opuesto a dicha velocidad, por lo que habitualmente se dice de ella que es la fuerza que se opone al avance de un cuerpo a través del aire."

La resistencia aerodinámica del vehículo viene determinada por:

$$Pa = \frac{\rho}{2} C_x A_F v_r^2 \quad (1)$$

Dónde:

ρ = densidad del aire

C_x = coeficiente de resistencia aerodinámica¹

A_F = área frontal del vehículo proyectada en la dirección del movimiento

V_r = velocidad

¹El coeficiente C_x se obtiene en el túnel de viento con prototipos a escala o vehículos a escala real. En Europa son comunes las escalas 1/4 o 1/5 para vehículos convencionales, mientras que para vehículos comerciales se recomienda la escala 1 /2,5.

COEFICIENTE DE ARRASTRE

"Es la fuerza sobre un cuerpo ocasionada por el fluido que opone resistencia en la dirección del movimiento del cuerpo... La resistencia al viento es el término que se emplea con frecuencia para describir los efectos del arrastre sobre las aeronaves, automóviles camiones y trenes. La fuerza de arrastre debe contrarrestarse por medio de una fuerza de propulsión en la dirección opuesta, con el fin de mantener o incrementar la velocidad del vehículo"

Esta fuerza queda representada por:

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

Dónde:

F_D : Arrastre (N)

ρ : Densidad del Fluido (kg/m^3)

v : Velocidad del Fluido (m/s)

A : Superficie frontal del Cuerpo perpendicular al movimiento del fluido (m^2)

C_D : Coeficiente de Arrastre (adimensional)

(Mott, 2006)

COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN

Dado que la sustentación es el componente aerodinámico de la fuerza aerodinámica que es perpendicular a la dirección en la que se mueve un cuerpo, dirigido verticalmente hacia arriba o hacia abajo, se tiene que el coeficiente de Sustentación es un valor que permite la comparación de la sustentación en cuerpos con diferentes formas y tamaños. Un coeficiente de sustentación positivo representa sustentación, mientras que uno negativo representa carga aerodinámica.

Esta fuerza queda representada por:

$$F_L = C_L \times \frac{1}{2} \rho v^2 A \quad (3)$$

Dónde:

F_L : Sustentación (N)

ρ : Densidad del Fluido (kg/m^3)

v : Velocidad del Fluido (m/s)

A : Superficie frontal del Cuerpo perpendicular al movimiento del fluido (m^2)

C_L : Coeficiente de Sustentación (adimensional) (Mc. Beath, 2005)

VELOCIDAD DE FLUJO

La cantidad de flujo que fluye en un sistema por unidad de tiempo, se puede expresar mediante los tres términos que definimos a continuación: (Mott, 2006)

- Q La rapidez de flujo de volumen es el volumen de flujo de fluido que pasa por una sección por unidad de tiempo
- W La rapidez de flujo de peso es el peso que fluye por una sección por unidad de tiempo
- M La rapidez de flujo de masa es la masa de un fluido que fluye por una sección por unidad de tiempo

El más importante de estos tres términos es la rapidez de flujo de volumen Q, que se calcula con la ecuación:

$$Q = A \times v \quad (4)$$

Dónde:

A Área de la sección

v Velocidad promedio del flujo.

PRESIÓN

Se define presión como el cociente entre la componente normal de la fuerza sobre una superficie y el área de dicha superficie, la unidad de medida recibe el nombre de pascal (Pa).

“La fuerza que ejerce un fluido en equilibrio sobre un cuerpo sumergido en cualquier punto es perpendicular a la superficie del cuerpo. La presión es una magnitud escalar y es una característica del punto del fluido en equilibrio, que dependerá únicamente de sus coordenadas...” (García Á. F., s.f.)

NUMERO DE REYNOLDS

Osborne Reynolds, estudio la transición entre regímenes de fluido laminar y turbulento en un tubo, El descubrió que el parámetro:

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\nu} \quad (5)$$

Dónde:

ρ	Densidad del fluido
V	Velocidad característica del fluido
D	Diámetro de la tubería a través de la cual circula el fluido o longitud característica del sistema
μ	Viscosidad dinámica del fluido
ν	Viscosidad dinámica del fluido (m ² /s)

Es un criterio mediante el cual el régimen de flujo puede determinarse

El número de Reynolds es la razón entre las fuerzas de inercia y las viscosas, Los flujos de números de Reynolds "grandes" por lo general son turbulentos. Los flujos en los que

las fuerzas de inercia son "pequeñas" comparadas con las fuerzas viscosas son característicamente fluidos laminares. (Fox & Mc Donald, 1995)

CAPA LÍMITE

Cuando se inicia el movimiento de un fluido de muy baja viscosidad, durante los primeros instantes el flujo es esencialmente irrotacional. Dado que el fluido en las fronteras solidas tiene velocidad igual a cero con respecto a dichas fronteras, ahí se presenta un cambio brusco en el gradiente de velocidad. Este gradiente de velocidad en un fluidos real, originan fuerzas de corte cerca de las fronteras, que reducen la velocidad del flujo cerca de ellas; a esto se le conoce como capa límite. (Streeter & Wylie, 1980)

LEYES DE LA AERODINÁMICA APLICADAS EN ESTE ESTUDIO

EFECTO COANDA

El efecto Coanda es la tendencia de una corriente de fluido para que se adhieran a la pared, el conocimiento de este efecto permitió tener un criterio técnico que ayudara de manera significativa al desarrollo de soluciones en el análisis a realizar. (Aeronautics Learning Laboratory for Science Technology and Research, 2004)

ESTELA

La línea de corriente que coincide con la pared se aleja de la superficie a partir del punto de separación, y delante de este punto, el gradiente de presión adverso ocasiona un flujo de sentido contrario cerca de la pared. La región debajo de la línea de corriente que parte del punto de separación se llama estela. (Streeter & Wylie, 1980)

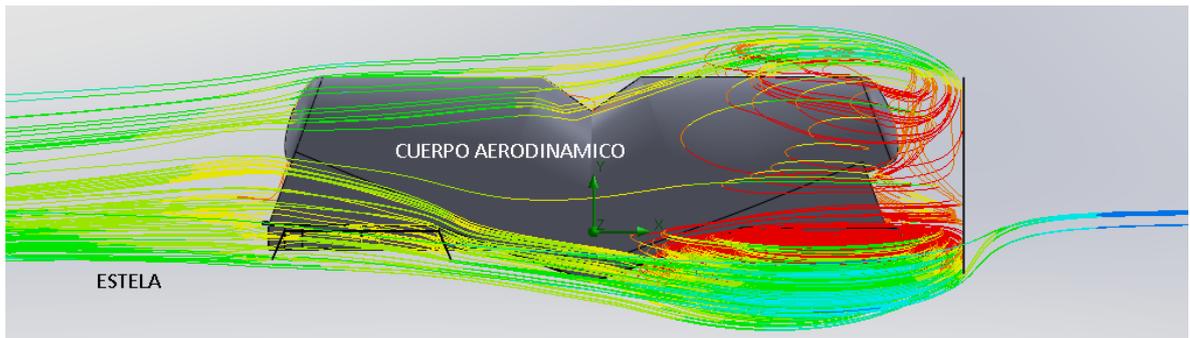


Ilustración 6 Estela
Fuente: Salvador J. 2017

SEPARACIÓN

El fenómeno denominado separación de la capa límite se da cuando el gradiente de presión adverso, es decir cuando la presión aumenta en el sentido de la corriente, y la fuerza cortante en la pared hacen que disminuya la cantidad de movimiento dentro de la capa límite, y si ambos actúan a lo largo de una distancia suficiente, el fluido de la capa límite se frenará hasta alcanzar el reposo.

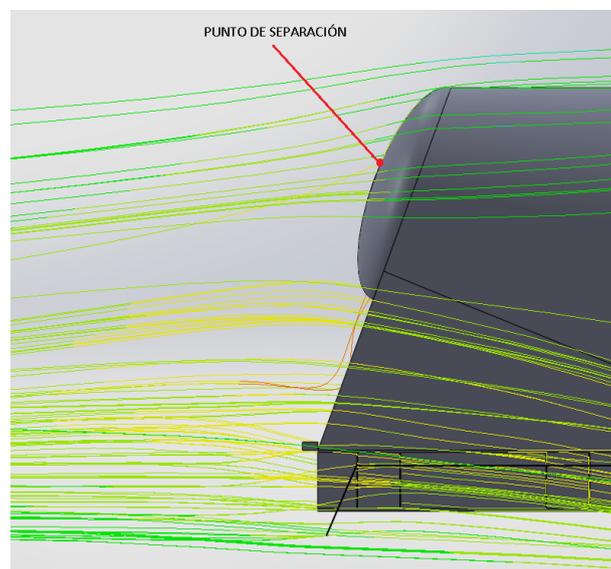


Ilustración 7 Punto de Separación
Fuente: Salvador J. 2017

EFECTO SUELO

Se denomina efecto suelo al fenómeno aerodinámico que sucede cuando un cuerpo, con una diferencia de presiones entre la zona que hay por encima de él y la que hay por debajo, está muy cerca de la superficie terrestre, lo que provoca unas alteraciones en el flujo de aire que pueden aprovecharse en diversos campos.

En el automovilismo se busca, al contrario que en aeronáutica, crear una zona de alta presión por encima del vehículo y una de baja presión por debajo. La diferencia de presiones provoca una succión que "aplasta" al vehículo contra el suelo, mejorando el agarre, lo que se traduce en la posibilidad de trazar curvas a mayor velocidad. (CEMBRANOS NISTAL, 2013)

TURBULENCIA

Cuando las distintas capas de aire se desplazan paralela y ordenadamente, nos encontramos ante un flujo en régimen laminar. Las fuerzas de carácter viscoso (rozamiento entre una capa de aire y la siguiente) son predominantes.

Cuando las distintas capas de aire se desplazan de una manera caótica y desordenada, nos encontramos ante un flujo en régimen turbulento. En este caso predominan las fuerzas de carácter inercial (la inercia de las moléculas de aire a alta velocidad no puede ser contrarrestada por el rozamiento entre capas).

El número de Reynolds (Re) es un coeficiente adimensional que indica si el flujo es de uno u otro tipo. Depende directamente de la velocidad, de la longitud del cuerpo e inversamente de la viscosidad del fluido).

Para el mismo cuerpo, a bajas velocidades el Re es reducido por lo que el flujo es mayoritariamente laminar. Cuando incrementamos la velocidad, el flujo se encuentra en un

régimen de transición y va alcanzando el régimen turbulento, en el que aumenta considerablemente la resistencia aerodinámica. (García C. , 2005)

DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO

DIMENSIONES GENERALES

Se indican las medidas tomadas del modelo ya construido, estas influirán en el caso de que los datos obtenidos en este análisis en un futuro quieran ser optimizados.

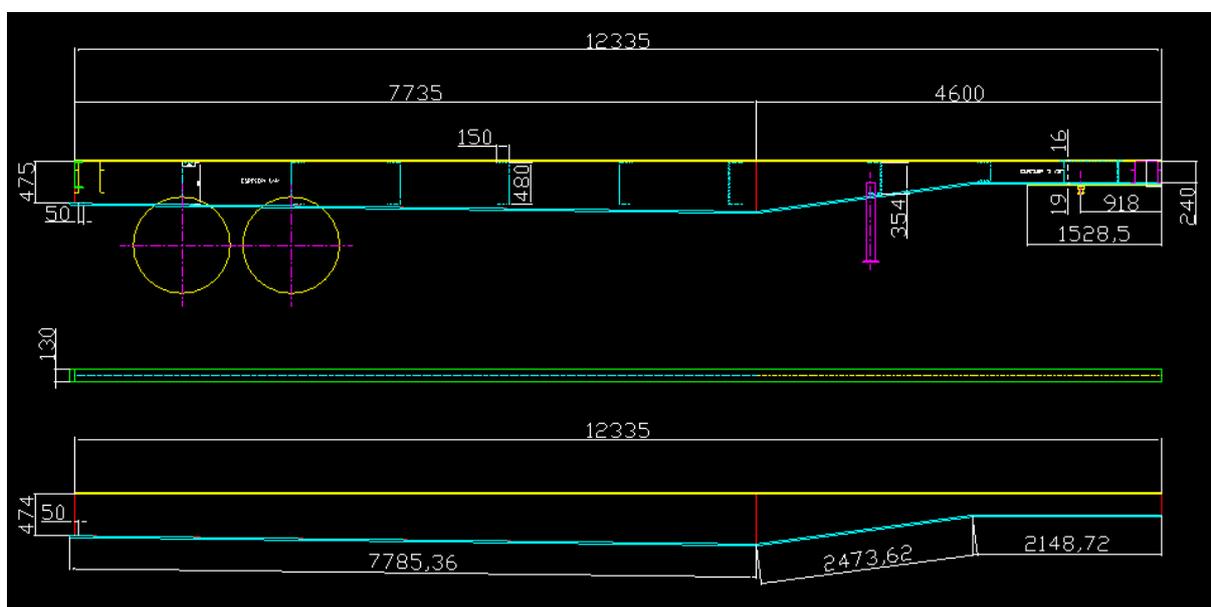


Ilustración 8 Dimensiones del Modelado

Fuente: Salvador J. 2017

Cabe indicar que los datos obtenidos son de un modelo construido de manera artesanal, y puesto que la producción no es en serie el proceso de construcción no maneja márgenes de error conocido.

ÁREA

Con la ayuda del Software se determina el área de sección transversal frontal del modelo

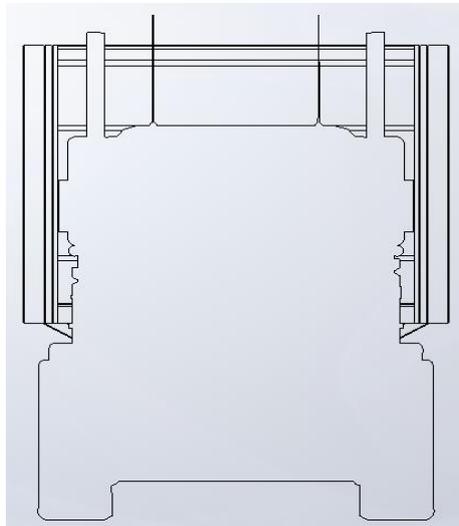


Ilustración 9 Sección Transversal Frontal

Área de superficie = 8320671.8milímetros cuadrados

Perímetro = 14409.69mm

Centro de masa: (milímetros)

X = 14448.93

Y = 7868.34

DELIMITACIÓN DEL ANÁLISIS

En el desarrollo del análisis se va a realizar la cuantificación de los siguientes parámetros, mediante los cuales se podrá obtener un criterio apropiado acerca de la reacción aerodinámica que tienen la carrocería cuando se la expone al viento tratando de emular las situaciones reales en las cuales este semirremolque operara

Los parámetros a analizar con la simulación CFD son:

- Drag
- Lift

- Numero de Reynolds
- Resistencia Aerodinámica
- Velocidad de Flujo
- Presión
- Capa Límite
- Estela
- Turbulencia
- La Potencia para vencer la resistencia del aire (Pa)
- La resistencia del aire (R)

CONFIGURACIÓN GENERAL DE LAS CARACTERÍSTICAS

Como se explicó anteriormente las velocidades máximas a tomar en cuenta son las permitidas por el marco legal vigente en Ecuador del año 2015, el cual define una velocidad máxima de 100 km/h para vehículos pesados, este parámetro se tomará como límite superior.

La humedad, velocidad media y temperatura del aire tomadas se detallan en las tablas 4 y 5:

Tabla 4. Características promedio del aire en Riobamba

Temperatura	Humedad Relativa %	Velocidad media del Viento
22.7 °C	76 %	19.3 km/h

Fuente: Anuario meteorológico - INAMHI

Tabla 5. Características promedio del aire en Guayaquil

Temperatura	Humedad Relativa %	Velocidad media del Viento
32.6 °C	80 %	40.5 km/h

Fuente: Anuario meteorológico - INAMHI

Además, es importante tener en cuenta los siguientes datos que serán constantes en el desarrollo de los diferentes estudios a realizar:

Presión Atmosférica Riobamba: 0,704 atm.

Presión Atmosférica Guayaquil: 0,998 atm.

- Densidad del Aire

Para determinar la densidad del aire en las diferentes ciudades en las que se realiza el estudio se lo calculo mediante la ley de los gases ideales:

$$PV = nRT$$

Dónde:

p: es la presión atmosférica.

n: es el número de moles.

R: es la constante individual del aire $R = 287 \left[\frac{m^2}{s^2K} \right]$

T: es la temperatura del aire.

En la cual sustituimos el volumen cuya fórmula es:

$$V = \frac{n}{\rho}$$

Simplificando y reemplazando tenemos:

$$PV = \rho RT$$

Dónde:

ρ : es la densidad del aire.

Despejando la densidad:

$$\rho = \frac{P}{RT}$$

Con la formula expuesta anteriormente tenemos las densidades para los microclimas seleccionados

Tabla 6. Densidad del Aire

	Densidad (Kg/m ³)
Riobamba	0.84
Guayaquil	1.15

Rugosidad en la superficie del semirremolque:

Tabla 7. Rugosidad media de materiales comerciales

RUGOSIDAD MEDIA DE MATERIALES COMERCIALES*		
Material (nuevo)	k	
	ft	mm
Acero remachado	0,003-0,03	0,9-9,0
Hormigón	0,001-0,01	0,3-3,0
Madera	0,0006-0,003	0,18-0,9
Hierro fundido	0,00085	0,26
Hierro galvanizado	0,0005	0,15
Hierro fundido asfáltico	0,0004	0,12
Acero comercial o hierro estirado	0,00015	0,046
Latón o cobre estirado	0,000005	0,0015
Vidrio	<i>Lisos</i>	<i>Lisos</i>

*Mecánica de Fluidos -FRANK M. WHITE

Para esta simulación se establece 0.04 mm (acero laminado nuevo), como rugosidad del material.

Por la naturaleza de los equipos estos están expuestos a actividades que producen la erosión del material, esto sumado a la corrosión produce el aumento de la rugosidad del equipo.

Cuanto mayor es la velocidad del fluido, mayor es la influencia de la erosión del material en la aerodinámica del equipo.

En la Figura 7 se puede apreciar la evolución de las micro-turbulencias a causa de la erosión del material; se asume que la suma de estas turbulencias puede generar una carga poco considerable por lo que el presente estudio no analiza a este tipo de turbulencias.

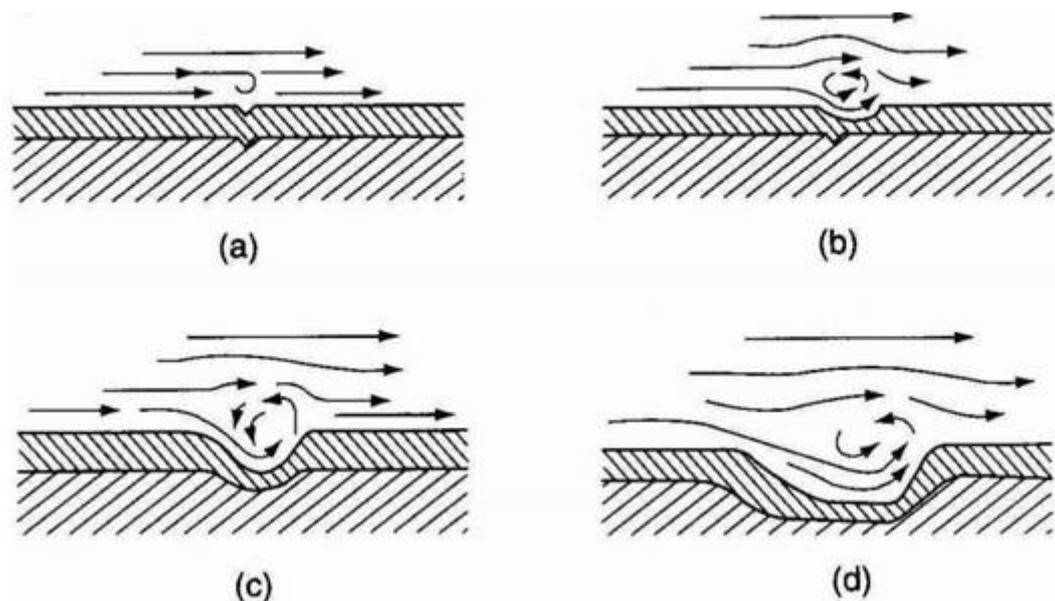


Ilustración 10 Evolución en la erosión del material

Fuente: Corrosion Testing Laboratories

- Viscosidad dinámica del fluido

La viscosidad absoluta del aire es determinada en la Figura 8. En la cual se determina como viscosidad dinámica o absoluta el valor de 1.85×10^{-5} Pa.s, y debido a que las temperaturas a las cuales se realiza este análisis son cercanas, este valor se lo tomara para las dos configuraciones.

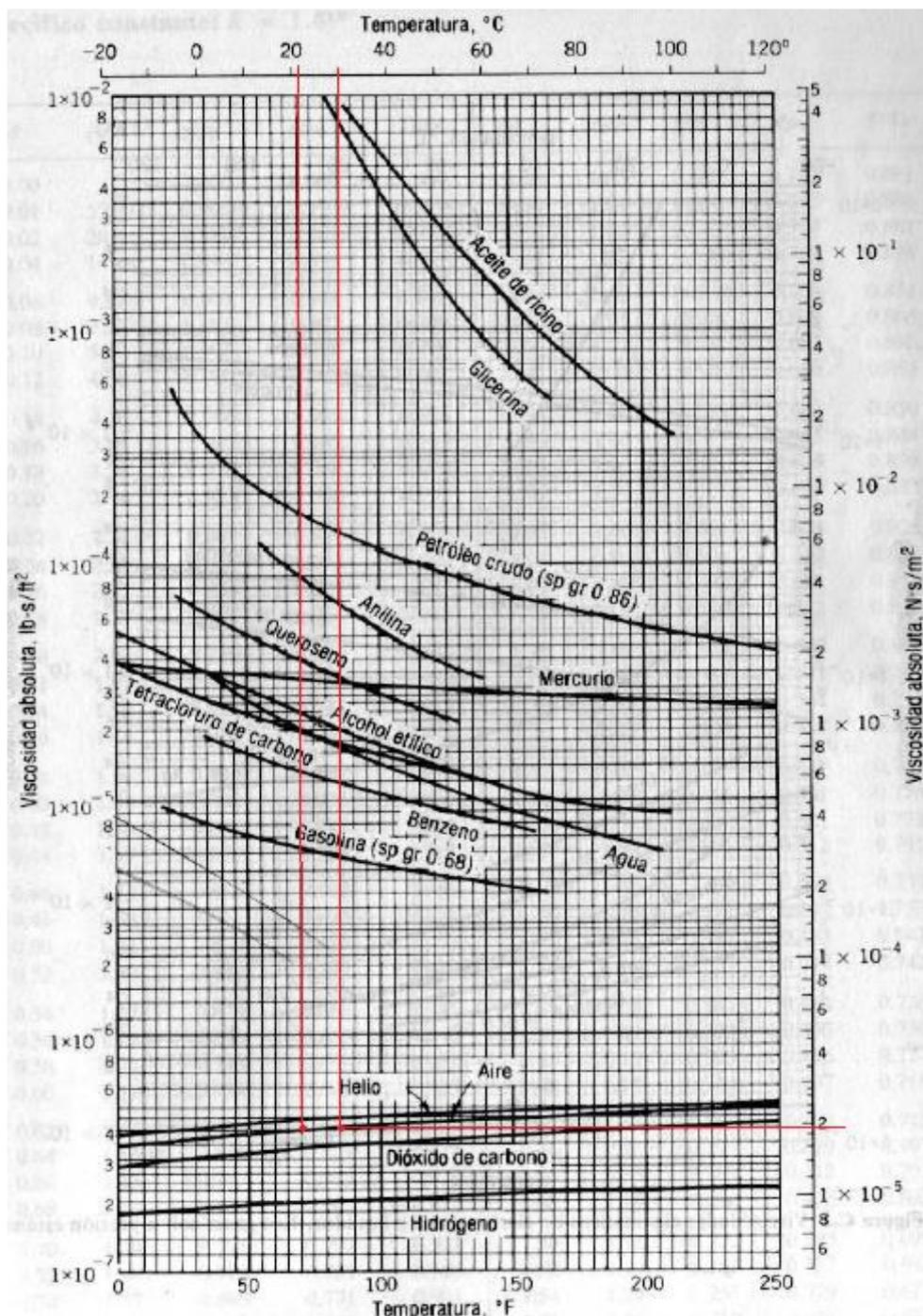


Ilustración 11 Viscosidades absolutas de ciertos gases y líquidos

- Coeficiente de Penetración

Los fabricantes hacen hincapié en la superficie frontal, pero sobre todo se empeñan en mejorar la forma para reducir el coeficiente C_x , que se mide de modo experimental mediante un meticuloso proceso en los túneles de viento, en este caso para el análisis que realizamos se estableció mediante la Ilustración 12, con un valor del coeficiente de arrastre $C_x=0.8$.

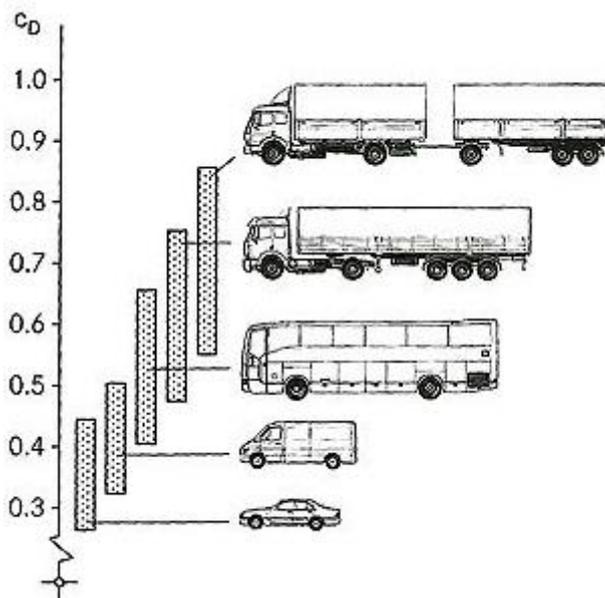


Ilustración 12 Coeficiente de penetración de diferentes tipos de vehículos²

RESULTADOS

Una vez trazado el modelo a Analizar, planteado las ecuaciones que lo gobiernan, establecido las condiciones de contorno y configurados los resultados que se desea obtener se procede a la generación de una malla y posterior simulación

- NUMERO DE REYNOLDS

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

Debido a que el perfil que se va a analizar no es circular, el diámetro será establecido mediante la fórmula del diámetro equivalente el cual indica que:

$$D_{eq} = \frac{4A}{P}$$

² Cuadro obtenido de <http://www.part20.eu/en/background/aerodynamics/>

Reemplazando los datos obtenidos tenemos:

<p>Riobamba</p> $\rho = 0.84 \frac{Kg}{m^3}$ $V = 27.7 \frac{m}{s}$ $\mu = 1.85 \times 10^{-5} Pa.s$ $A = 8.32m^2$ $P = 14.41 m$

<p>Guayaquil</p> $\rho = 1.15 \frac{Kg}{m^3}$ $V = 27.7 \frac{m}{s}$ $\mu = 1.85 \times 10^{-5} Pa.s$ $A = 8.32m^2$ $P = 14.41 m$
--

DIÁMETRO EQUIVALENTE PARA LOS DOS CASOS

$$D_{eq} = \frac{4 \times 8.32 m^2}{14.41 m}$$

$$D_{eq} = 2.31 m$$

Reynolds Riobamba:

$$Re = \frac{0.84 \frac{Kg}{m^3} * 27.7 \frac{m}{s} * 2.31m}{1.85 \times 10^{-5} Pa.s}$$

$$Re = 2.9054 \times 10^6$$

Reynolds Guayas:

$$Re = \frac{1.15 \frac{Kg}{m^3} * 27.7 \frac{m}{s} * 2.31m}{1.85 \times 10^{-5} Pa.s}$$

$$Re = 3.9775 \times 10^6$$

- RESISTENCIA AERODINÁMICA

Para determinar el coeficiente de resistencia aerodinámica nos basamos en los datos obtenidos de la Figura 12, con un valor de $C_x = 0.8$.

Ejemplo de cálculo con características ambientales de Riobamba

$$Pa = \frac{\rho}{2} C_x A_F v_r^2$$

$$Pa = \frac{0.84 \frac{Kg}{m^3}}{2} 0.8 * 8.32 m^2 * \left(27.7 \frac{m}{s}\right)^2$$

$$Pa = 2144.97 N$$

En el caso del estudio con el clima de Guayaquil se obtuvo una resistencia aerodinámica máxima de $Pa = 2936.57 N$

- DRAG

Ejemplo de cálculo realizado con el clima de Riobamba con la Fuerza de Arrastre $F_D = 4551.746$ para Riobamba y $F_D = 3297.589$ para Guayas, valores obtenidos en la simulación del modelo

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

$$C_D = \frac{4551.746}{\frac{1}{2} * 0.84 \frac{Kg}{m^3} * \left(27.7 \frac{m}{s}\right)^2 * 8.32 m^2}$$

$$C_D = 1.69$$

En el caso del estudio con el clima de Guayaquil se obtuvo un coeficiente de resistencia aerodinámica de 1.22

- LIFT

Ejemplo de cálculo realizado con el clima de Riobamba con la Fuerza de Sustentación $F_L = 146.647$ para Riobamba y $F_L = 4.827$ para Guayas, valores obtenidos en la simulación del modelo

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

$$C_L = \frac{146.647}{\frac{1}{2} * 0.84 \frac{Kg}{m^3} * \left(27.7 \frac{m}{s}\right)^2 * 8.32m^2}$$

$$C_L = 0.069$$

En el caso del estudio con el clima de Guayaquil se obtuvo un coeficiente de Sustentación bajo 1.8×10^{-3} .

RESISTENCIA QUE OFRECE EL AIRE AL MOVIMIENTO

Ejemplo de cálculo realizado con el clima de Riobamba

$$R = \frac{1}{2} \rho v^3 A$$

$$R = \frac{1}{2} 0.84 \frac{Kg}{m^3} \left(27.7 \frac{m}{s}\right)^3 8.32m^2$$

$$R = 74269.74 W$$

En el caso del estudio con el clima de Guayaquil se obtuvo una Resistencia $R = 101678.81 W$

CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS SIERRA CENTRO - RIOBAMBA

A continuación, se detallan las condiciones con las que fue realizada la simulación con las características ambientales promedio que se tienen en la Sierra-Centro del Ecuador.

Tabla 8. Condiciones Ambientales – Sierra Centro

Parámetros Termodinámicos	Presión Estática: 71332.80 Pa Temperatura: 295.85 K
Parámetros de Velocidad	Vector Velocidad Velocidad en dirección X: 0 m/s Velocidad en dirección Y: 0 m/s Velocidad en dirección Z: -25.000 m/s

Tabla 9. Descripción de mínimos y máximos obtenidos – Sierra Centro

Name	Minimum	Maximum
Pressure [Pa]	70823.81	72280.90
Temperature [K]	295.29	296.23
Velocity [m/s]	0	38.101
Velocity (X) [m/s]	-32.563	34.234
Velocity (Y) [m/s]	-26.422	31.002
Velocity (Z) [m/s]	-33.507	15.899
Relative Pressure [Pa]	-508.99	948.10
Turbulence Intensity [%]	0.08	1000.00

CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS COSTA – GUAYAS

A continuación, se detallan las condiciones con las que fue realizada la simulación con las características ambientales promedio que se tienen en la Costa del Ecuador.

Tabla 10. Condiciones Ambientales – Costa Guayas

Parámetros Termodinámicos	Presión Estática: 101122.35 Pa Temperatura: 305.75 K
Parámetros de Velocidad	Vector Velocidad Velocidad en dirección X: 0 m/s Velocidad en dirección Y: 0 m/s Velocidad en dirección Z: -27.700 m/s

Fuente: Salvador J.

Tabla 11. Descripción de mínimos y máximos obtenidos – Costa Guayas

Name	Minimum	Maximum
Pressure [Pa]	100321.10	109154.79
Temperature [K]	305.55	306.15
Velocity [m/s]	0	33.974
Velocity (X) [m/s]	-28.169	29.647
Velocity (Y) [m/s]	-28.162	27.996
Velocity (Z) [m/s]	-32.965	16.342

Relative Pressure [Pa]	-801.25	8032.44
Turbulence Intensity [%]	3.68e-003	1000.00

Fuente: Salvador J.

RELACIÓN CON EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE

Con la finalidad de establecer el consumo de combustible necesario para transportar las masas de aire que se forman a lo largo del vehículo, se procede a relacionar la potencia obtenida en la simulación con las características propias del motor.

POTENCIA NECESARIA

El presente estudio se enfocará en la aerodinámica, sin embargo, es importante tener en cuenta que existen varios factores que aumentan la potencia que el motor debe ejercer para movilizar el vehículo como: la resistencia debida a los rozamientos mecánicos de la transmisión, resistencia a la rodadura, rigidez o dureza de la rueda, radio de la rueda, carga, velocidad relativa, etc. La suma de estos factores genera un mayor consumo de combustible.

Con los datos obtenidos referentes a la resistencia opuesta por el aire:

Sierra: 2144.97 N

Costa: 2936.57 N

Esta potencia debe ser provista por el motor del tractocamión; la información obtenida debe ser relacionada con el consumo de combustible del tractocamión, para lo cual se tomó como referencia el método que se expone en el artículo Fuel and energy consumption in transportation (Marchese & Golato) el cual indica:

Consumo específico:

$$B_d = \left[\frac{N_e \cdot b_e}{(\eta_{tr} \cdot \rho_B)} \right]$$

Donde:

N_e : potencia debida a las cargas exteriores

Resistencia aerodinámica

$$Pa = \frac{\rho}{2} C_x A_F v_r^2$$

b_e : Consumo específico

η_{tr} : Rendimiento de la transmisión

ρ_B : Densidad del combustible empleado.

El consumo específico “se encuentran en el orden de 0,230 a 0,260 [kg/kWh] para motores actuales de grandes camiones y potencias promedio de 300 [kW]”. En relación al rendimiento de la transmisión indica “Para buenas transmisiones este valor se encuentra entre 0,85 y 0,90”. (Marchese & Golato)

Reemplazando los datos obtenidos se tiene:

Tabla 12. Consumo específico de combustible

Coefficiente de rodadura	Masa (Kg)	Cx	Densidad del aire (Kg/m ³)	Área Proy. (m ²)	Velocidad (m/s)	Resistencia Aerodinámica	Consumo específico (kg/kWh)	Rendimiento de la transmisión	Densidad combustible (Kg/l)	Consumo específico (lt/100km)
0.006	40000	0.8	0.84	8.32	27.7	2144.97	0.23	0.85	0.85	48.26
0.006	40000	0.8	0.84	8.32	22.16	1372.78	0.23	0.85	0.85	38.31
0.006	40000	0.8	0.84	8.32	16.62	772.19	0.23	0.85	0.85	30.57

Fuente: Marchese & Golato.

Elaboración: Salvador J.

Relacionando el consumo específico de combustible con la distancia existente entre el puerto de Guayaquil y el centro de la ciudad de Riobamba se puede definir un valor aproximado sobre el consumo de combustible necesario para movilizar cargas parasitas representadas en masas de aire.

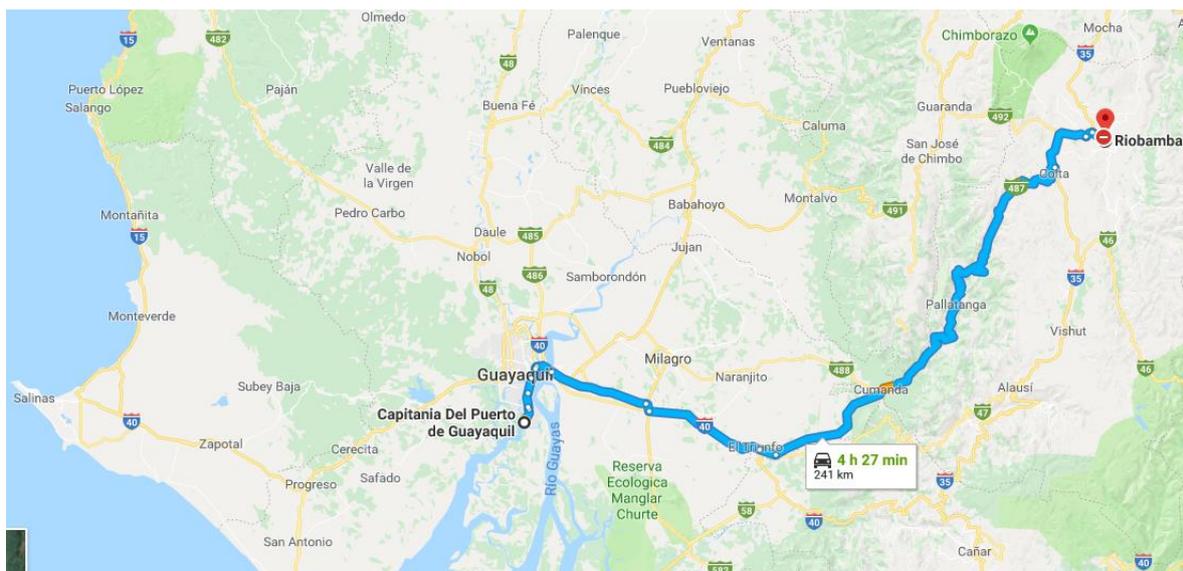


Ilustración 13 Distancia Guayaquil - Riobamba

Fuente: Google Earth

Tabla 13. Relación Distancia - Consumo de combustible

Velocidad (m/s)	Consumo específico (litros/100km)	Equivalencia (km/gal)	Distancia Guayaquil - Riobamba (Km)	Viajes al mes	Consumo de combustible por viaje (lt)	Consumo mensual de Combustible	Toneladas de dióxido de carbono equivalente (t CO ₂ e)
27.7	48.27	7.84	241	8	116.32	930.58	2.55
22.16	38.32	9.87	241	8	92.34	738.75	2.02
16.62	30.58	12.38	241	8	73.69	589.55	1.61

Fuente: Marchese & Golato.

Elaboración: Salvador J.

La información referente al rendimiento promedio de camiones publicado por el Ministerio de Obras Públicas de Ecuador (22.5 Km/gal), comparado con el rendimiento obtenido (12.38 km/gal), indica que existe alrededor de un 50% neto que hipotéticamente podría ser reducido con una adecuada optimización aerodinámica, cabe indicar que por el diseño estructural propio del remolque existirán cargas parasitas que no podrán ser intervenidas.

Tabla 14. Rendimiento en el consumo de combustible

	Motor Otto	Motor Diesel	Motor total	Motor Otto	Motor Diesel
	Rendimientos		Recorrido medio anual	Consumo específico	
	km/galón		km/día	kbep/vehículo	
Automóviles y jeeps	39.0	43.0	25.0	4.96	5.01
Taxis	38.0	40.0	250.0	41.60	53.81
Camionetas	43.0	45.0	320.0	49.34	61.23
Camiones	18.0	22.5	480.0	35.36	183.68
Buses	16.0	40.0	350.0	26.52	75.34
Otros	45.0	45.0	20.0	3.44	3.83
Total Combustibles				16.53	130.21

Fuente: Perez 2012

Nota: El rendimiento de 22.5 km/galón para camiones es basado en datos estadísticos.

PUNTOS A SER TOMADOS EN CUENTA PARA OPTIMIZACIONES FUTURAS

De acuerdo a los valores obtenidos en la simulación, el área de mayor impacto aerodinámico, en caso de generar modificaciones a la geometría del vehículo, es la comprendida a una distancia de 2 metros del espaldar del semirremolque debido a la mayor acumulación de turbulencia, presión, vorticidad; como se muestra a continuación.

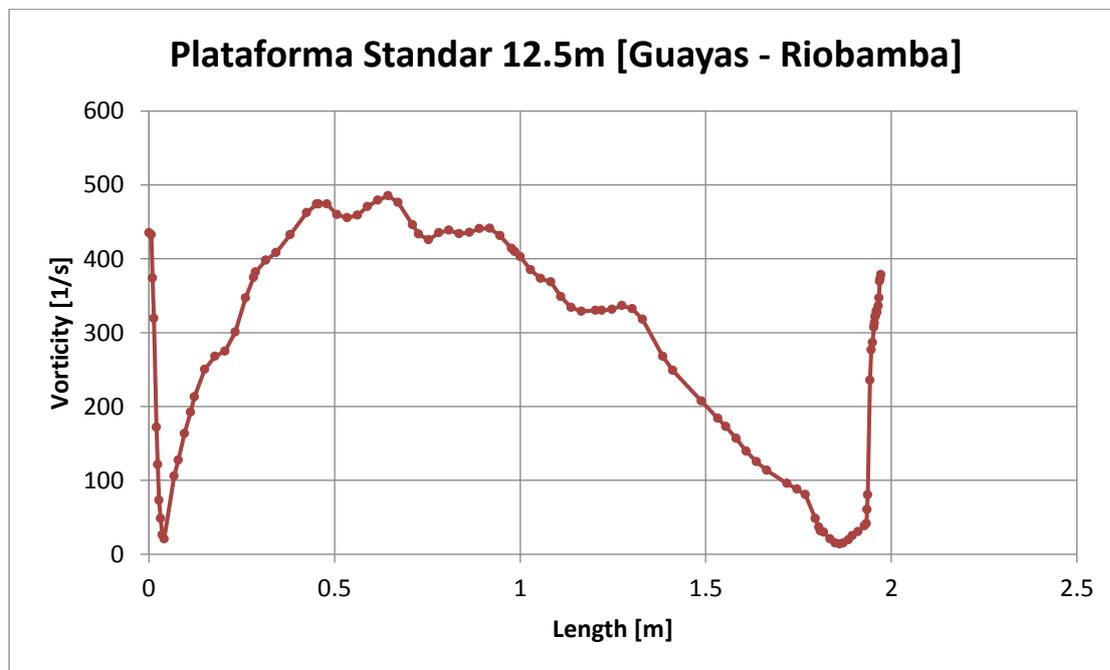


Ilustración 14 Vorticidad vs. Distancia
Elaboración: Salvador J.

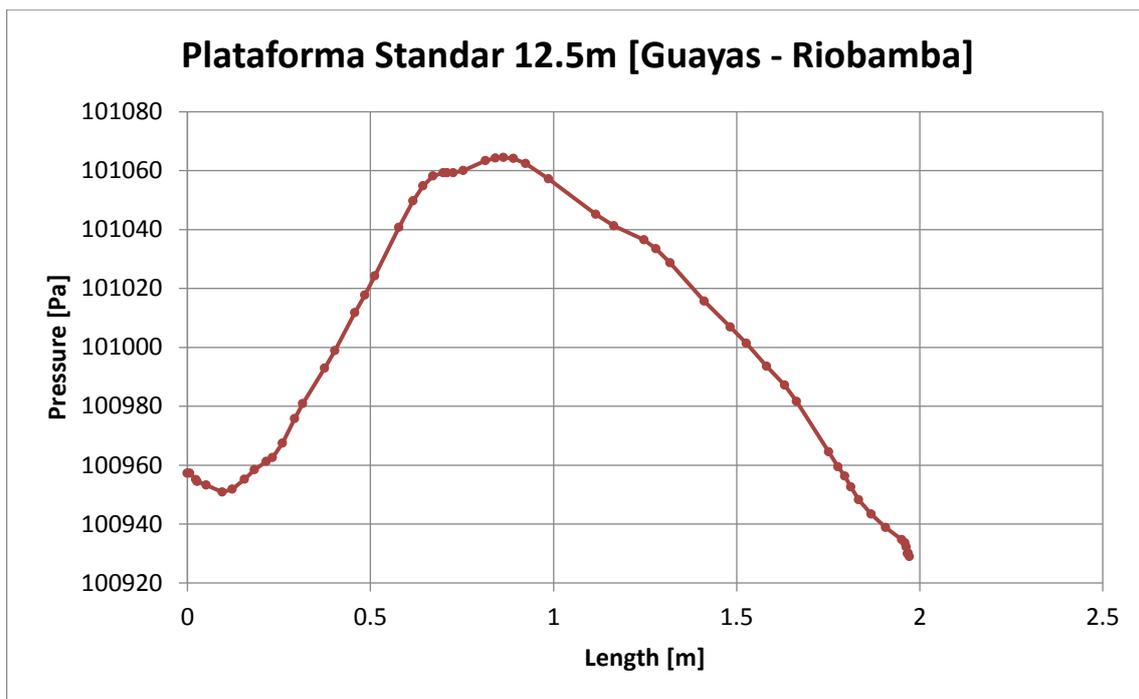


Ilustración 15 Presión vs. Distancia

Elaboración: Salvador J.

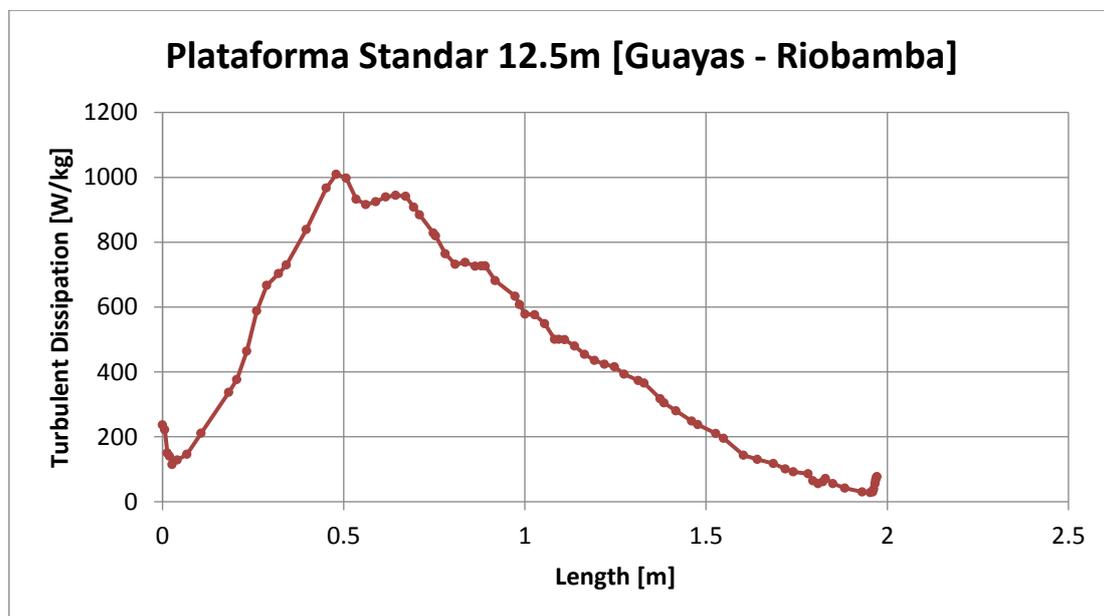


Ilustración 16 Disipación de la turbulencia vs. Distancia

Elaboración: Salvador J.

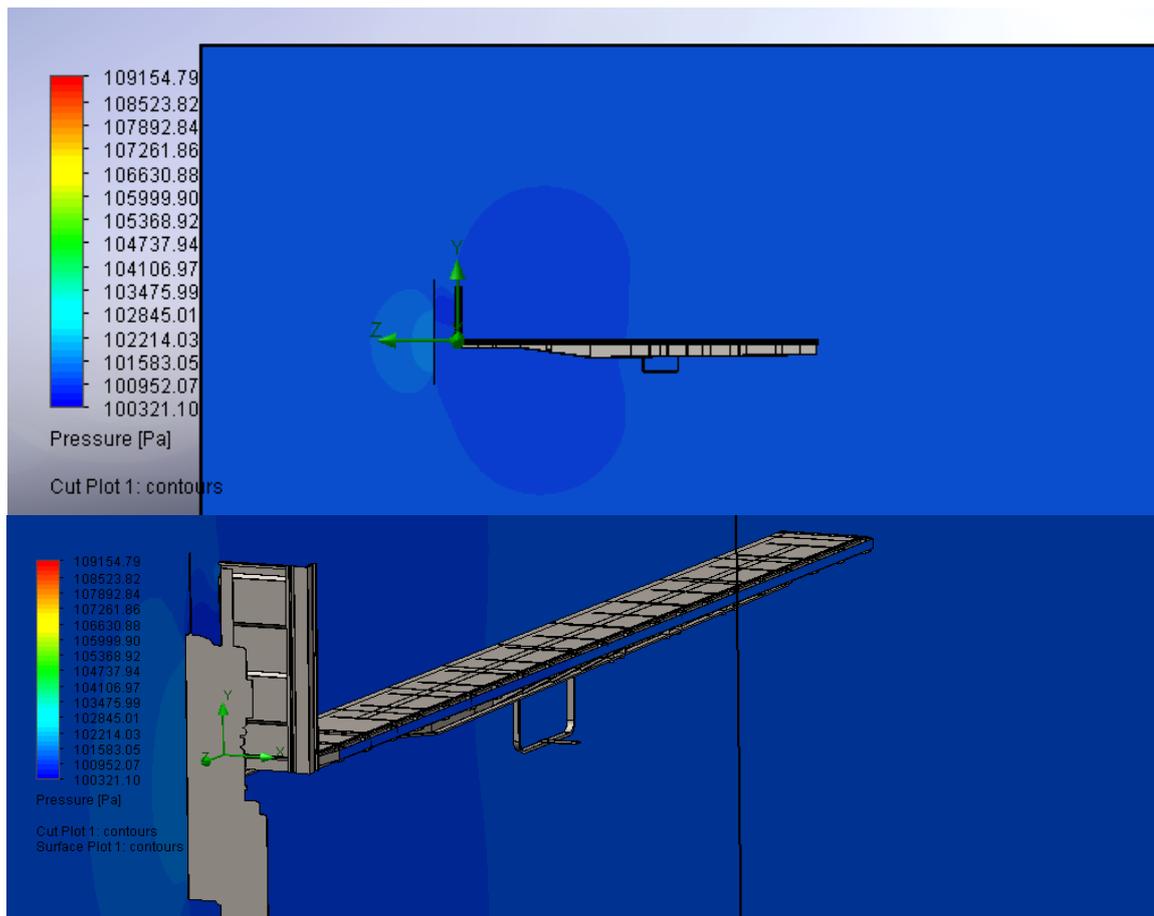


Ilustración 17 Perfil de Presión
Fuente: Software CFD

Con la información obtenida se puede plantear la optimización desde la construcción del equipo y complementarlo con las diferentes iniciativas que se desarrollan nivel comercial como los alerones.

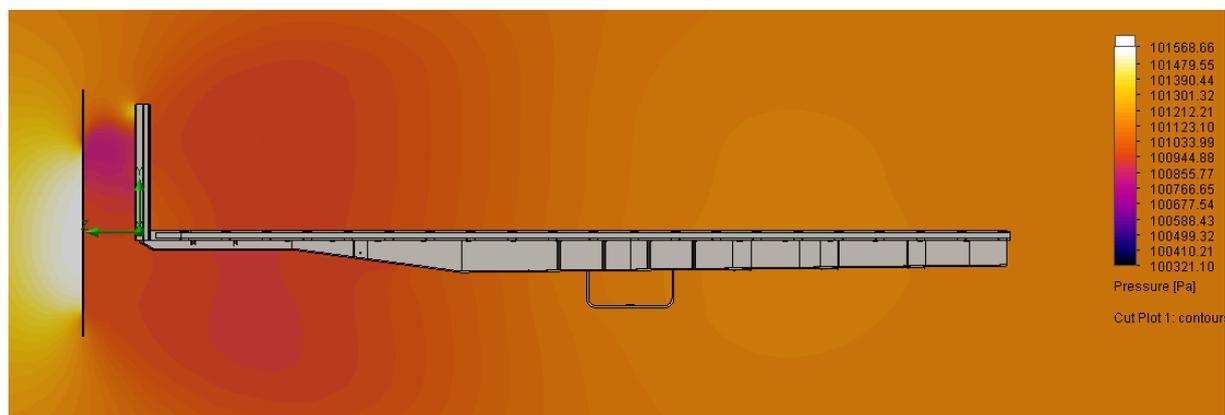


Ilustración 18 Distribución de la carga aerodinámica
Fuente: Software CFD

Teniendo en cuenta bibliografía relacionada a iniciativas destinadas a la reducción del consumo de combustible a través de la optimización aerodinámica, se tienen aprovechamientos que van desde el 8 al 12% con la intervención en la parte inferior del semirremolque (STEMCO Products Inc., 2018).

Por parte de Facultad de Ingeniería Aeroespacial de la Universidad Técnica de Delft se han desarrollado estudios a través de la “plataforma de conocimiento” denominada PART (Platform for Aerodynamic Road Transport) donde a través de un equipo multidisciplinario conformado por científicos, fabricantes de equipos de transporte y transportistas trabajan para obtener una reducción del 20% del consumo de combustible y las emisiones de CO₂ en el sector del transporte para el 2020, los estudios publicados indican que existe un potencial de reducción de emisiones de CO₂ hasta en un 15%. (PART, 2018)

En Latinoamérica se han desarrollado estudios referentes al diseño de alerones los cuales ofrecen un 2.5% en la reducción del consumo de combustible (VENTI, 2018)

METODOS PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DEL USO DE COMBUSTIBLE EN EL TRANSPORTE

Para determinar la efectividad de la eficiencia en el consumo de combustible existen diferentes métodos los cuales se basan en pruebas de campo debidamente normadas, las cuales se recomienda realizar como continuación del presente estudio.

- Norma SAE J1252 Procedimiento de ensayo en túnel de viento para camiones y buses

“Esta norma señala un procedimiento para realizar ensayos en túneles de viento, con el objetivo de medir directamente la fuerza de arrastre aerodinámico, y con ello su coeficiente de arrastre asociado (Cd).” (Ramirez et al., 2014)

- Test de desaceleración (Coast Down test)

Consiste en la puesta en marcha del vehículo bajo condiciones controladas de velocidad y viento, al registrar una velocidad determinada el motor es desconectado, simultáneamente se registra la velocidad y la distancia recorrida hasta que el vehículo se detiene, la adecuada aplicación de este procedimiento se detalla en la norma SAE J1263.

- On Board Diagnostic (OBD)

On Board Diagnostics (OBD), Es un sistema basado en el análisis por ordenador, fue originalmente diseñado para reducir emisiones mediante el monitoreo del rendimiento de los principales componentes del motor, incluyendo aquellos responsables de controlar las emisiones y el consumo de combustible. (OBD Solutions, 2018)

- Norma NCh 3331

A nivel latinoamericano se tiene la presente norma la cual corresponde a un método de prueba para la determinación del consumo de combustible para vehículos de transporte terrestre, se basa en la traducción y adaptación por parte del Gobierno de Chile de la Norma SAE J1321 (Agencia Chilena de Eficiencia Energética, n.d.)

CONCLUSIONES

- Debido a las diferencias de presión y temperatura, se puede observar que disminuir la presión, el aire se dilata y la densidad baja, esto conlleva un cambio de velocidad, producto de esto la resistencia que ofrece el aire al movimiento varía en la costa como en la altura, en este sentido es conveniente que las futuras mejoras al equipo se las realicen tomando en cuenta un promedio entre los dos tipos de climas.
- Con la geometría actual se tienen emisiones de hasta 2.55 Toneladas de dióxido de carbono equivalente (t CO₂e) mensual, por lo que se plantea la necesidad de analizar las curvas características de los semirremolques y modificarlas desde la construcción, estas modificaciones deben realizarse de manera armónica con la resistencia estructural del mismo, el estudio presenta una línea base que permite establecer la ubicación idónea donde las modificaciones generarían el mayor impacto posible.
- En referencia a la influencia de la rugosidad en el comportamiento aerodinámico del cuerpo, es necesario realizar análisis específicos en relación a las micro turbulencias que se generan; es recomendable fomentar el uso de recubrimientos que permitan disminuir la porosidad del material.

RECOMENDACIONES

- Es conveniente replicar el estudio realizado en prototipos físicos, con ayuda de un túnel de viento e instrumentos de medición debidamente calibrados, esto permitirá comprar los datos obtenidos en la simulación y reducir el margen de error.
- Existen diferentes tipos de factores como: la resistencia debida a los rozamientos mecánicos de la transmisión, resistencia a la rodadura, rigidez o dureza de la rueda, radio de la rueda, carga, velocidad relativa, etc. los cuales influyen en el consumo de combustible, los cuales requieren un análisis específico esto permitirá complementar el presente estudio con la suma de las cargas parasitas las cuales, por la naturaleza de la presente investigación, estas no fueron tomadas en cuenta.

BIBLIOGRAFÍA

Technical Courses. (2017). <http://www.technicalcourses.net>. Retrieved noviembre 1, 2017, from http://www.technicalcourses.net/portal/es/blog/blog_entrada.php?entrada_id=89

System Drag Reduction. (2016). [sdr-sys.com](http://www.sdr-sys.com). Retrieved enero 18, 2017, from <http://www.sdr-sys.com>

Aeronautics Learning Laboratory for Science Technology and Research. (12 de Marzo de 2004). [allstarnetwork](http://www.allstarnetwork.com). Recuperado el 18 de Febrero de 2017, de Henri Marie Coanda: <http://www.allstar.fiu.edu/aero/coanda.htm>

CEMBRANOS NISTAL, F. (2013). Planificación de la prueba y ajustes de los equipos y elementos de los sistemas de automatización industrial. España: Ediciones Paraninfo.

García, Á. F. (s.f.). Universidad del país Vasco. Recuperado el 26 de Febrero de 2017, de <http://www.sc.ehu.es>: http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica_/fluidos/estatica/introduccion/Introduccion.html

García, C. (2005). Zona gravedad. Recuperado el 26 de Febrero de 2017, de <http://www.zonagravedad.com/modules.php?name=News&file=article&sid=776>

National Research Council Canada. 2012. «Review of Aerodynamic Drag Reduction - Devices for Heavy Trucks and Buses». Ottawa: Centre for Surface Transportation Technology,

Technical Report CSTT-HVC-TR-205.

Streeter, Victor y Wylie, Benjamin. 1980. Mecánica de los Fluidos. México: McGraw-Hill. White, Frank. 2013. Mecánica de Fluidos. 5ta. ed. Madrid: McGraw-Hill. Yung, Jo. 2001.

Theory of Ground Vehicles. 3ra. ed. Ottawa: Jhon Wiley.

INEC. (2015). <http://www.ecuadorencifras.gob.ec>. Retrieved octubre 30, 2017, from <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/manufactura-y-mineria/>

Technical Courses. (2017). <http://www.technicalcourses.net>. Retrieved noviembre 1, 2017, from http://www.technicalcourses.net/portal/es/blog/blog_entrada.php?entrada_id=89

Remache , A., Tipanluisa, L., Salvador, J., &Erazo, W. (2015). Análisis aerodinámico regional mediantecfd de un semirremolque cisterna para transporte de cemento. AporteSantiguino, 193 - 206.

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (24 de enero de 2017). <http://www.serviciometeorologico.gob.ec>. Recuperado el 19 de noviembre de 2017, de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/meteorologia/bolhist/cli/2016/DECADAL/>

Asamblea Nacional Constituyente - Ecuador. Reglamento General para la Aplicación de la Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial, Registro Oficial Suplemento 731 de 25 junio 2012 § (2012). Recuperado de <http://www.ant.gob.ec/index.php/ant/base-legal/reglamento-general-para-la-aplicacion-de-la-lottsv>

Banco Central del Ecuador. (2017). REPORTE DEL SECTOR PETROLERO. IV trimestre 2016. Quito: BCE.

Marchese, R & Golato, Marcos. (2011). Fuel and energy consumption in transportation. *Revista de Ciencias Exactas e Ingeniería*, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán. 20. 35-42.

Pérez, A. (Agosto de 2012). *Eficiencia Energética en el Transporte Terrestre en el Ecuador*. Quito, Pichincha, Ecuador: Ministerio de Transporte y Obras Públicas.

García, R. (2016). <http://ingenieromarino.com>. Retrieved Febrero 10, 2016, from <http://ingenieromarino.com/corrosion-y-tratamiento-de-superficies-tratamiento-de-la-obra-viva-del-buque/>

Yujato, M., Segura, K., Rivadeneira, T., Mosquera, L., Guillén, J., & Castillo, T. (2017). *Anuario de estadísticas energéticas 2017 - OLADE*. Quito: OLADE.

STEMCO Products Inc. (01 de Marzo de 2018). <http://www.stemco.com>. Obtenido de <http://www.stemco.com/product/ecoskirt/>

VENTI. (marzo de 2018). <https://www.venti.cl>. Obtenido de <https://www.venti.cl/proyectos>.

PART. (04 de marzo de 2018). <http://www.part20.eu>. Obtenido de <http://www.part20.eu/en/symposium/>

Ramirez D. (2014). *CUANTIFICACIÓN DE LA REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN PROYECTOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SECTOR TRANSPORTE BAJO UN PROTOCOLO ESTÁNDAR, Y EVALUACIÓN DE LA COSTO EFECTIVIDAD DE DOS HERRAMIENTAS DE ESTIMACIÓN DE AHORROS*. Retrieved from <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/131037/Cuantificación-de-la-reducción-del-consumo-de-combustible-en-proyectos-de-.pdf?sequence=1>

Agencia Chilena de Eficiencia Energética. (n.d.). Norma Chilena 3331. Retrieved March 4, 2018, from <https://www.acee.cl/asesoramiento/interesado-en-certificar/norma-chilena-3331/>

OBD Solutions. (04 de marzo de 2018). <http://www.obdsol.com>. Obtenido de <http://www.obdsol.com/knowledgebase/on-board-diagnostics/what-is-obd/>

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN JURAMENTADA	¡Error! Marcador no definido.
DECLARATORIA	ii
LOS PROFESORES INFORMANTES	¡Error! Marcador no definido.
AGRADECIMIENTO.....	iv
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
OPORTUNIDADES DE MERCADO	3
ESTIMACIÓN DE LOS VEHÍCULOS DE ESTE TIPO EN EL PAÍS Y LAS PRINCIPALES RUTAS.....	4
CONSUMO PROMEDIO	5
MATERIALES Y MÉTODOS	8
CONCEPTOS GENERALES AERODINÁMICOS	13
RESISTENCIA AERODINÁMICA	13
COEFICIENTE DE ARRASTRE.....	14
COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN.....	14
VELOCIDAD DE FLUJO	15
PRESIÓN	16
NUMERO DE REYNOLDS	16
CAPA LÍMITE.....	17
LEYES DE LA AERODINÁMICA APLICADAS EN ESTE ESTUDIO	17
EFFECTO COANDA.....	17
ESTELA.....	17
SEPARACIÓN.....	18
EFFECTO SUELO	19
DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO	20
DIMENSIONES GENERALES.....	20
ÁREA	21
DELIMITACIÓN DEL ANÁLISIS	21
CONFIGURACIÓN GENERAL DE LAS CARACTERÍSTICAS	22
RESULTADOS.....	27
CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS SIERRA CENTRO - RIOBAMBA	30
CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS COSTA – GUAYAS	31
RELACIÓN CON EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE	32
POTENCIA NECESARIA.....	32
PUNTOS A SER TOMADOS EN CUENTA PARA OPTIMIZACIONES FUTURAS.....	35
MÉTODOS PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DEL USO DE COMBUSTIBLE EN EL TRANSPORTE.....	38
CONCLUSIONES	40

RECOMENDACIONES	41
BIBLIOGRAFÍA.....	42
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	46
ÍNDICE DE TABLAS.....	47
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	47
ANEXOS.....	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Producción total, valor agregado, divisiones de actividad - 2010.....	4
Tabla 2. Características del viento Riobamba – anuario meteorológico	9
Tabla 3. Características del viento Guayaquil – anuario meteorológico.....	10
Tabla 4. Características promedio del aire en Riobamba	22
Tabla 5. Características promedio del aire en Guayaquil.....	22
Tabla 6. Densidad del Aire.....	24
Tabla 7. Rugosidad media de materiales comerciales.....	24
Tabla 8. Condiciones Ambientales – Sierra Centro	31
Tabla 9. Descripción de mínimos y máximos obtenidos – Sierra Centro	31
Tabla 10. Condiciones Ambientales – Costa Guayas.....	31
Tabla 11. Descripción de mínimos y máximos obtenidos – Costa Guayas.....	31
Tabla 12. Consumo específico de combustible	33
Tabla 13. Relación Distancia - Consumo de combustible.....	34
Tabla 14. Rendimiento en el consumo de combustible	35

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Distribución del consumo energético - Ecuador	5
Ilustración 2 Distribución del consumo del petróleo - Ecuador	6
Ilustración 3 Ensamble del Semirremolque.....	8
Ilustración 4 Nube de Puntos del Camión	11
Ilustración 5 Sombra del Camión	12
Ilustración 6 Estela	18
Ilustración 7 Punto de Separación.....	18
Ilustración 8 Dimensiones del Modelado	20
Ilustración 9 Sección Transversal Frontal	21
Ilustración 10 Evolución en la erosión del material	25
Ilustración 11 Viscosidades absolutas de ciertos gases y líquidos	26
Ilustración 12 Coeficiente de penetración de diferentes tipos de vehículos.....	27
Ilustración 13 Distancia Guayaquil - Riobamba	34
Ilustración 14 Vorticidad vs. Distancia	35
Ilustración 15 Presión vs. Distancia	36
Ilustración 16 Definición de la mayor carga aerodinámica.....	37
Ilustración 17 Disipación de la turbulencia vs. Distancia	36
Ilustración 18 Perfil de Presión	37

ANEXOS

Anexo A

Anexo A. Velocidad – Resistencia Riobamba Guayas

Densidad del Aire Guayaquil	1,15
Area de seccion	6,62
CD	0,8
Velocidad	Resistencia
0	0
5	380,65
10	3045,2
15	10277,55
20	24361,6
25	47581,25
30	82220,4
35	130562,95
40	194892,8
45	277493,85
50	380650
55	506645,15
60	657763,2
65	836288,05
70	1044503,6
75	1284693,75
80	1559142,4
85	1870133,45
90	2219950,8
95	2610878,35
100	3045200

Densidad del Aire Riobamba	0,84
Area de seccion	6,62
CD	0,8
Velocidad	Resistencia
0	0
5	347,55
10	2224,32
15	7507,08
20	17794,56
25	34755
30	60056,64
35	95367,72
40	142356,48
45	202691,16
50	278040
55	370071,24
60	480453,12
65	610853,88
70	762941,76
75	938385
80	1138851,84
85	1366010,52
90	1621529,28
95	1907076,36
100	2224320

ANEXO B

Analysis Environment

Software Product: Flow Simulation 2016 SP2.0. Build: 3350
 CPU Type: Intel(R) Core(TM) i7-4510U CPU @ 2.00GHz
 CPU Speed: 2601 (2000) MHz
 RAM: 12184 MB / 134217727 MB
 Operating System: (Build 9600)

Model Information

Model Name: 20170727 Plataforma Standar 12.5m
 completo.SLDPRT
 Project Name: Guayas

Project Comments:

Unit System: SI (m-kg-s)
 Analysis Type: External (not exclude internal spaces)

Size of Computational Domain

Size

X min	-9.922 m
X max	8.977 m
Y min	-9.617 m
Y max	10.164 m
Z min	-26.055 m
Z max	8.919 m

Simulation Parameters

Mesh Settings

Basic Mesh

Basic Mesh Dimensions

Number of cells in X	56
Number of cells in Y	58
Number of cells in Z	119

Analysis Mesh

Total Cell count: 1854544
 Fluid Cells: 1419665
 Solid Cells: 434879
 Partial Cells: 372892
 Trimmed Cells: 0

Additional Physical Calculation Options

Heat Transfer Analysis: Heat conduction in solids: Off
 Flow Type: Laminar and turbulent
 Time-Dependent Analysis: Off
 Radiation:
 Humidity: 50.00 %
 Default Wall Roughness: 40.0 micrometer

Anexo B

Density (Fluid) [kg/m³]		0.912594664	1.144944031
		0.94550119	1.144913617
Length [m]	Edge<1>	0.986	1.144868545
	0	1.143724017	1.027767502
	0.006294118	1.143720517	1.144818089
	0.013149644	1.143682804	1.093580553
	0.02000517	1.143664255	1.144747741
	0.026860696	1.143635632	1.126487078
	0.040571748	1.143641848	1.144713868
	0.095415957	1.143636391	1.164878024
	0.122838061	1.143653851	1.144679282
	0.161229007	1.143708707	1.214237812
	0.221557636	1.143795903	1.144649323
	0.232526478	1.143811379	1.247144337
	0.259948582	1.143873709	1.144622367
	0.292855108	1.143973179	1.285535283
	0.314792791	1.144034165	1.144574153
	0.369637	1.144165572	1.323926229
	0.402543525	1.144249552	1.362317175
	0.43545005	1.144340739	1.3952237
	0.457387733	1.144400431	1.144398632
	0.479325417	1.14445416	1.493943275
	0.517716363	1.144558551	1.144258206
	0.56707615	1.144687448	1.565240746
	0.605467096	1.144787899	1.631053797
	0.616435938	1.144814449	1.144063803
	0.643858042	1.144866475	1.685898005
	0.671280147	1.144901927	1.143973707
	0.704186672	1.144912427	1.772734669
	0.726124355	1.144914014	1.143815115
	0.786452985	1.144937713	1.795586422
	0.835812772	1.144962076	1.817524106
	0.846781614	1.144962764	1.847002868
	0.88517256	1.144958192	1.143689045
			1.869283328
			1.877852735
			1.886422143
			1.896705432
			1.908702603
			1.925841418
			1.942980233
			1.960119048
			1.963546811
			1.966974574
			1.968649716
			1.970324858
			1.972

Pressure [Pa]			
		0.813875089	101063.3535
		0.841297193	101064.2538
		0.863234877	101064.4855
		0.890656981	101064.1341
		0.923563506	101062.4725
		0.986	101057.2631
		1.115518236	101045.1748
		1.164878024	101041.3044
		1.247144337	101036.4904
		1.280050862	101033.4675
		1.318441808	101028.6587
		1.411676962	101015.7073
		1.482974434	101006.9136
		1.5268498	101001.4364
		1.581694009	100993.6213
		1.631053797	100987.1803
		1.663960322	100981.7048
		1.751711056	100964.5257
		1.77730502	100959.4188
		1.795586422	100956.2646
		1.812039685	100952.548
		1.833291816	100948.2667
		1.867569446	100943.3628
		1.906988721	100938.7987
		1.951549641	100934.7015
		1.960119048	100933.5761
		1.963546811	100932.2128
		1.966974574	100929.9492
		1.968649716	100930.176
		1.972	100928.9485
Length [m]	Edge<1>		
	0	100957.212	
0.006294118	100957.2873		
0.023432933	100955.0496		
0.026860696	100954.4867		
0.05154059	100953.2004		
0.095415957	100950.9096		
0.122838061	100951.7824		
0.155744586	100955.1967		
0.18316669	100958.4375		
0.216073216	100961.2977		
0.232526478	100962.5278		
0.259948582	100967.4005		
0.292855108	100975.7827		
0.314792791	100980.9058		
0.37512142	100992.8873		
0.402543525	100998.9147		
0.457387733	101011.7678		
0.484809838	101017.7321		
0.512231942	101024.2648		
0.578044992	101040.7862		
0.616435938	101049.778		
0.643858042	101054.8345		
0.671280147	101058.2516		
0.698702251	101059.2875		
0.709671093	101059.3339		
0.726124355	101059.2677		
0.75354646	101060.0374		

Vorticity [1/s]		0.589013834	470.560174	1.609116113	139.5961332
		0.616435938	479.2267979	1.636538218	125.2449522
Length [m]	Edge<1>	0.643858042	485.2419335	1.663960322	113.5739086
	0	0.671280147	476.0226075	1.71880453	95.68153054
	0.006294118	0.709671093	445.8770424	1.746226635	88.2242038
	0.009721881	0.726124355	433.4192191	1.768164318	80.86800427
	0.013149644	0.75354646	425.8128336	1.795586422	48.14862734
	0.02000517	0.780968564	435.268884	1.804727124	36.55635858
	0.023432933	0.808390668	438.5852449	1.809297475	31.6287036
	0.026860696	0.835812772	433.7838338	1.817524106	29.60044503
	0.031431047	0.863234877	435.5358914	1.835005697	20.75187464
	0.036001397	0.890656981	440.9463876	1.848716749	15.16466788
	0.040571748	0.918079085	441.4381001	1.86071392	13.69685911
	0.067993852	0.94550119	431.1073641	1.870997209	15.24470958
	0.078962694	0.977282196	413.8504923	1.884708261	19.51481491
	0.095415957	0.986	409.752985	1.89499155	24.87432593
	0.111869219	1.000345398	402.8433949	1.910416484	30.81667088
	0.122838061	1.027767502	384.9449726	1.927555299	38.28539811
	0.150260165	1.055189607	373.490707	1.932696944	41.62922744
	0.17768227	1.082611711	368.7453605	1.934410825	60.28959973
	0.205104374	1.110033815	348.8363519	1.936124707	80.34626262
	0.232526478	1.13745592	334.2074255	1.942980233	235.4681508
	0.259948582	1.164878024	329.0053914	1.946407996	276.7045667
	0.281886266	1.20326897	330.2074893	1.949835759	286.3911449
	0.287370687	1.219722232	330.1142559	1.953263522	307.3358748
	0.314792791	1.247144337	331.2339503	1.954977404	312.8808098
	0.342214895	1.274566441	336.6317668	1.956691285	321.037902
	0.380605841	1.301988545	332.1891738	1.958405167	323.1238943
	0.424481208	1.32941065	318.1153411	1.960119048	329.2541418
	0.451903312	1.384254858	268.0403625	1.96183293	327.5633875
	0.457387733	1.411676962	248.9623031	1.965260693	336.195653
	0.479325417	1.488458854	207.5321177	1.966974574	347.1022038
	0.506747521	1.532334221	183.9185471	1.968649716	369.4919813
	0.534169625	1.554271905	172.8348166	1.970324858	373.398962
	0.56159173	1.581694009	156.8024153	1.972	378.4974