

Universidad Internacional del Ecuador



Facultad de Ingeniería Mecánica Automotriz

**Estudio Aerodinámico de un Deflector de Aire para Camiones y su Influencia en
el Consumo de Combustible**

Aerodynamic Study of an Air Deflector for Trucks and its Influence on Fuel
Consumption

Autores

Esteban Andrés Heredia Pantoja

Patricio Danilo Martínez Rosas

Director

Ing. Denny Javier Guanuche Larco

DECLARATORIA

Por medio de la presente certificamos que el siguiente artículo es de autoría de **Esteban Andrés Heredia Pantoja y Patricio Danilo Martínez Rosas** declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra propiedad intelectual, este documento no ha sido presentado anteriormente en ningún grado o certificado profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada. Cedemos el presente trabajo para su divulgación y distribución en el repositorio de la Universidad Internacional del Ecuador



Heredia Pantoja Esteban Andrés



Martínez Rosas Patricio Danilo

Yo, **Denny Javier Guanuche Larco**, certifico que el presente artículo tema:

Estudio Aerodinámico de un Deflector de Aire para Camiones y su Influencia en el Consumo de Combustible fue realizado por los estudiantes **Heredia Pantoja Esteban Andrés y Martínez Rosas Patricio Danilo** y son responsables exclusivo tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.



Msc. Denny Guanuche
DOCENTE

Estudio Aerodinámico de un deflector de Aire para Camiones y su Influencia en el Consumo de Combustible

Denny Guanuche, ¹*Esteban Heredia* ², *Patricio Martínez* ³

RESUMEN

El consumo de diesel que se utiliza para el transporte terrestre de carga es de 32,942 millones de barriles en el año 2019, razón por la cual se requiere estudios orientados a disminuir este consumo, para ello se tomará en cuenta los estudios realizados por países de la región y países desarrollados que han destinado mayor énfasis con este objetivo, emitiendo una normativa que permita evaluar el impacto de la utilización de dispositivos aerodinámicos en camiones o tracto-camiones y procedimientos de simulación. Los primeros estudios realizados en Ecuador utilizando un deflector de aire indican un ahorro de combustible en carretera del 4.63 % bajo una norma Alemana (DIN 70 030-2) la cual requiere varios parámetros para su ejecución, de manera recorrer una distancia de 10 km con una velocidad constante de 90 km/h y un proceso de medición por gravimetría para estimar el consumo de diesel, teniendo este punto de partida se analiza la aerodinámica del dispositivo antes y después de ser incorporado al camión, para lo cual se requiere de una geometría simplificada o básica, conformación del túnel de viento, un mallado, las condiciones de frontera y las iteraciones del procesamiento de las variables en el software CFX, dando como resultado una estimación en la reducción del coeficiente de arrastre del 5.607 % y disminución de la fuerza de arrastre en 244.66 [N].

Palabras clave: Fuerza de arrastre, coeficiente de arrastre, gravimetría, dinámica de fluidos computacional

ABSTRACT

The consumption of diesel used for land freight transport is 32,942 million barrels in 2019, which is why studies aimed at reducing this consumption are required, for this the studies carried out by countries of the region and developed countries that have devoted greater emphasis to this objective, issuing regulations that allow evaluating the impact of the use of aerodynamic devices in trucks or tractor-trailers and simulation procedures. The first studies carried out in Ecuador using an air deflector indicate a road fuel saving of 4.63% under a German standard (DIN 70 030-2) which requires several parameters for its execution, in order to travel a distance of 10 km with a constant speed of 90 km / h and a gravimetric measurement process to estimate diesel consumption, having this starting point the aerodynamics of the device is analyzed before and after being incorporated into the truck, for which a simplified geometry is required or basic, conformation of the wind tunnel, a meshing, the boundary conditions and the iterations of the processing of the variables in the CFX software, resulting in an estimate of the reduction of the drag coefficient of 5.607% and a decrease in the force of drag at 244.66 N.

Keywords: Drag force, drag coefficient, gravimetry, computational fluid dynamics

1. Introducción

El consumo interno de derivados en el Ecuador para el año 2019 fue de 91 millones de barriles, de los cuales el diesel 2 y el Diesel premium representan un 36,20 % que se utiliza el sector de transporte de carga, y las gasolinas con un 33,14 % razón por la cual varias instituciones han emprendido estudios para optimizar el consumo de combustible (Petroecuador, 2019)

El parque automotor del Ecuador lo componen los vehículos livianos con 2'259.104 unidades y vehículos comerciales con 333.328 unidades, de este último los camiones tienen una representación con 237.336 unidades (AEADE, 2020)

Estudios realizados en USA de un tracto-camión con la utilización de un carenado superior y lateral, consiguen una reducción del 15 % en el coeficiente de arrastre y un 6,5 % en el consumo de combustible (Hirz & Stadler, 2013)

Al evaluar el coeficiente de arrastre en un software computacional de dinámica de fluidos (CFD), de un semirremolque cisterna bajo diferentes condiciones atmosféricas en la provincia de Chimborazo se obtuvo 1,18 y en la provincia del Guayas el valor fue de 0,86 estos resultados son adimensionales (Remache, Tipanluisa, Salvador, & Erazo, 2015).

Estudios realizados en Chile bajo la norma SAE J-1321 demuestra que al comparar las cabinas de un tracto-camión Freightliner (Argosy y Columbia) se obtiene un 3,96 % en el ahorro de combustible por el diseño aerodinámico que posee la cabina Columbia del tracto-camión (Villalobos, Gavilan, Salazar, & Rojas, 2012)

Otro estudio realizado en Chile bajo la norma SAE J-1321 indica que al utilizar varios dispositivos aerodinámicos (carenado superior, frontal y lateral, generador de vórtices y cubre tanque) se logra una reducción del 15.4 % del consumo de diesel de un tracto-camión (Villalobos, Arancibia, Retamal, Olivo, & Vásquez, 2011).

En Ecuador el consumo de combustible al utilizar un deflector de aire (carenado superior) bajo la norma DIN 70 030-2 se indica un ahorro de 4.63 % para un camión de carga mediana (Pachacama & Simbaña, 2017) .

El presente estudio, estima el valor del coeficiente y fuerza de arrastre de un camión y su deflector de aire, para ello se requiere varios datos del estudio realizado en Ecuador del

consumo de combustible, de manera que estén relacionados entre sí.

2. Fundamentación Teórica

La aerodinámica es una ciencia con varias aplicaciones prácticas en ingeniería. No importa cuán elegante pueda ser una teoría aerodinámica, o matemáticamente compleja puede ser una solución numérica, o cuán sofisticado es un experimento aerodinámico, todos estos esfuerzos suelen estar dirigidos a (Jhon D., 1991):

- La predicción de fuerzas - momentos y la transferencia de calor a los cuerpos que se mueven a través de un fluido (generalmente aire)
- Determinación de flujos que se mueven internamente a través de conductos

2.1. Fuerzas y momentos

A primera vista, la generación de la fuerza aerodinámica en un Boeing 747 gigante puede parecer compleja, especialmente del complicado campo de flujo tridimensional sobre las alas, el fuselaje, las góndolas del motor, la cola, etc. Del mismo modo, la resistencia aerodinámica en los automóviles que viajan a 55 millas por hora en la carretera implica una interacción compleja del cuerpo, el aire y el suelo. Sin embargo, en estos y en todos los demás casos, las fuerzas aerodinámicas y los momentos en el cuerpo se deben solo a dos fuentes básicas:

- Distribución de presión sobre la superficie del cuerpo p
- Distribución del esfuerzo cortante sobre la superficie del cuerpo τ

Analizamos, p actúa de manera normal a la superficie y τ actúa de forma tangencial a la superficie. El esfuerzo cortante se debe a la acción del arrastre en la superficie, causada por la fricción entre el cuerpo y el aire. La fuerza aerodinámica R (resultante o neta entre p y τ) y momento sobre el cuerpo, ocasionado por el viento relativo v_∞ definido como velocidad flujo libre al que sometido el cuerpo.

La resultante R se proyecta a lo largo de v_∞ obteniendo 2 componentes L (fuerza de sustentación perpendicular a v_∞) y D (fuerza de arrastre paralela a v_∞) como se indica en la figura 3, además se tiene la cuerda c (distancia lineal desde el borde delantero hasta el borde posterior del cuerpo) si se proyecta R a lo largo de la cuerda se obtiene otras 2 componentes N (fuerza

normal perpendicular a c) y A (fuerza axial paralela a c).

El ángulo de ataque α definido entre la velocidad de flujo libre y la cuerda, Los coeficientes de fuerzas y momentos aerodinámicos está relacionados con la presión dinámica q_∞ (es la energía cinética del fluido debida a la velocidad del fluido en su movimiento), un área S y longitud l de referencia.

Coef. sustentación $C_L = \frac{L}{q_\infty S}$ Ec. 2.1

Coef. arrastre $C_D = \frac{D}{q_\infty S}$ Ec. 2.2

Coef. fuerza normal $C_N = \frac{N}{q_\infty S}$ Ec. 2.3

Coef. fuerza axial $C_A = \frac{A}{q_\infty S}$ Ec. 2.4

Coef. momento $C_M = \frac{M}{q_\infty S l}$ Ec. 2.5

El coeficiente de arrastre toma mayor notoriedad en el campo automotriz, es un número adimensional que depende principalmente de la forma del cuerpo y su orientación con respecto a la corriente de flujo, además se debe considerar otros factores que influyen en este valor tales como: (Mott, 2006)

- Forma del extremo delantero o nariz del vehículo.
- Lo liso de las superficies del cuerpo
- Accesorios como espejos, manijas de las puertas, antenas y otros
- Forma de la cola del vehículo
- Efecto de las superficies cercanas, como el piso bajo del automóvil
- Discontinuidades, como ruedas y los rines
- Efecto de los vehículos cercanos
- Dirección del vehículo respecto a los vientos dominantes
- Entradas de aire para enfriamiento del motor o ventilación
- Propósito específico del vehículo
- Acomodo de los pasajeros
- Visibilidad que se concede a los operadores y pasajeros
- Estabilidad y control del vehículo
- Estética

2.2. Fuerza de arrastre

El arrastre es una fuerza sobre un cuerpo ocasionado por el fluido que opone resistencia en la dirección del movimiento del cuerpo.

La importancia de realizar este estudio radica justamente en el incremento de la fuerza de arrastre cuando aumenta la velocidad, de manera que se identifica las variables que están involucradas en esta fuerza, se determina las restricciones y se establece los parámetros que se desean medir, para mediante un modelo matemático visualizar como se incrementa o decrece esta resistencia, además indicar como se reduce mediante la implementación de dispositivos aerodinámicos esta resistencia. Para lo cual se tiene la ecuación unidimensional (Cascajosa, 2005)

$$L = C_D \cdot q_\infty \cdot S \quad \text{Ec. 2.6}$$

En donde:

- L: Fuerza de arrastre (N)
- C_D : Coeficiente de arrastre (adimensional)
- q_∞ : Presión dinámica (kg/m)
- S: Área frontal (m²)

El coeficiente de arrastre depende de varios factores de diseño enfocados a la disminución de este valor, en la tabla 1 se indican varios valores correspondientes a los diferentes tipos de transporte.

Tabla1. Coeficiente de arrastre

Descripción	C_D
Avión subsónico	0.012
Dirigible	0.020 – 0.025
Helicóptero	0.4 – 1.2
Vehículo deportivo	0.3 – 0.4
Vehículo económico	0.4 – 0.5
Camioneta	0.5
Tracto-camión (con carenados)	0.6 – 0.7
Tracto-camión (sin carenados)	0.7 – 0.9
Tracto-camión (cabezal)	0.9

Fuente: (Filippone, 2020)

Presión dinámica de corriente libre de aire (q_∞) es la energía cinética del fluido debida a la velocidad del fluido en su movimiento. La presión dinámica no se manifiesta ejerciendo una fuerza sobre una superficie, como ocurre con la presión estática, sino que es la energía por unidad de volumen que posee el fluido en movimiento y se puede calcular mediante la ecuación (Mehrdad Y Otros, 2014)

$$q_{\infty} = \frac{1}{2} \rho_{\infty} (v + v_{\infty})^2 \quad \text{Ec. 2.7}$$

En donde:

ρ_{∞} : Densidad del aire (kg/m³)
 v : Velocidad del vehículo (m/s)
 v_{∞} : Velocidad del aire (m/s)

Área frontal proyectada (S) es la superficie del vehículo que primero interactúan con el flujo de aire, que se proyectan en un plano.

2.3. Dinámica de fluidos computacional

Al utilizar el método de dinámica de fluidos computacional (CFD) para estimar el fenómeno físico que está ocurriendo con el aire al momento de circular por la superficie del camión, se requieren varias etapas de análisis.

El software ANSYS es uno de los simuladores que emplea el método de elementos finitos (FEM) y volúmenes finitos (FVM) aplicada a una malla, uno de los módulos para el estudio de flujos es el CFX en el cual se puede modelar: flujos estacionarios y transitorios; flujo laminar y turbulento; flujos subsónicos, transíticos y supersónicos; transferencia de calor y radiación térmica, etc.

Las ecuaciones de continuidad que ocupa el módulo CFX son las siguientes:

- Ecuación de continuidad de la masa

$$\frac{\partial}{\partial t} (\gamma \alpha_q \rho_q) + \nabla * (\gamma \alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \gamma \sum_{p=1, p \neq q}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + \gamma S_q \quad \text{Ec. 2.8}$$

Dónde:

γ : Porosidad
 ρ_q : Densidad de fluido
 α_q : Volumen fraccional del fluido
 \vec{v}_q : Vector velocidad del fluido
 S_q : Término fuente
 \dot{m}_{pq} ; \dot{m}_{qp} : Transferencia de masa entre los puntos o fases p-q y q-p

- Ecuación de continuidad de la energía

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q (\gamma \rho_q h_q + (1 - \gamma) \rho_s h_s)) + \nabla * (\gamma \alpha_q \rho_q \vec{v}_q h_q) = -\gamma \alpha_q \frac{\partial p_q}{\partial t} + \quad \text{Ec. 2.9}$$

$$\gamma \bar{\tau}_q: \nabla \vec{v}_q - \nabla * (\alpha_q (\gamma k_q + (1 - \gamma) k)) + \gamma S_q + \gamma \sum_{p=1}^n (Q_{pq} + \dot{m}_{pq} h_{pq} - \dot{m}_{qp} h_{qp})$$

Dónde:

p ; q : Punto o fase
 s : Material sólido
 h : Entalpia
 k : Conductividad térmica
 Q_{pq} : Transferencia de calor entre la fase p-q
 ρ : Densidad del fluido
 S : Fuente de calor
 α : Fase de fracción de volumen
 \vec{v} : Vector velocidad
 h_{pq} ; h_{qp} : Diferencia de la entalpia total entre la fase p-q y q-p

- Ecuación de la cantidad de movimiento (Navier Stokes)

$$H(v - \vec{v}) + (1 - H)(-\nabla p + \nabla * T + \rho g - \rho a) = 0 \quad \text{Ec. 2.10}$$

Dónde:

H : Función de paso
 v : Velocidad
 \vec{v} : Velocidad local de la parte móvil
 p : Presión del fluido
 T : Tensor de corte
 ρg : Fuerza de volumen
 ρa : Término de la aceleración

2.4. Consumo de combustible en carretera

El camión al avanzar hacia adelante con una alta velocidad desplaza gran cantidad de aire hacia el interior y exterior, que servirá para refrigerar los elementos de fricción y calefacción del vehículo, este fenómeno es complicado de recrearlo en los bancos dinamométricos, por ende, se recurre a pruebas en carretera de manera de evaluar el impacto que tiene un dispositivo aerodinámico en el consumo de combustible mediante normas y equipos para este fin.

La norma SAE J1321: Procedimiento para pruebas de consumo de combustible tipo II, establece varios criterios que se indican en la tabla 2.

Tabla 2. Requisitos norma SAE J1321

Criterios	Requisitos en Pista y carretera
Vehículos:	Idéntico (vehículo de prueba y control) salvo que esta característica sea el objeto de estudio
Configuración de los vehículos:	Idéntica salvo que esta característica sea el objeto de estudio
Carga de los vehículos:	Idéntica, salvo que esta característica sea el objeto de estudio
Condición mecánica de los vehículos:	Similar (idealmente idéntica)
Velocidad del viento durante un trayecto:	≤ 20 km/h
Rango permitido de temperatura:	(4 a 35) °C
Cambio de temperatura durante la prueba:	$\leq 16^{\circ}\text{C}$
Lluvia:	No permitida
Muestras de mediciones meteorológicas:	1 al inicio de cada trayecto
Tiempo máximo entre trayectos:	30 min
Control de velocidad:	GPS
Longitud del trayecto	> 64 km
Lugares de medición meteorológica	Un lugar de medición en el punto de inicio de la prueba
Control de espaciamiento:	Cronómetro

Tiempo máximo entre los vehículos del trayecto:	9 min
Método de medición de combustible:	Gravimétrico

Fuente: (SAE J1321, 2012)

La norma DIN 70 030-2: Método de medición del consumo de combustible: Camiones y buses, establece los siguientes requerimientos (DIN 70 030-2, 1986):

- Distancia de prueba de 10 [km]
- Pendiente de la carretera menor a 1,5 [%]
- La diferencia de altitud entre el punto de partida y llegada sea de ± 150 [m] (+ ascendente, - descendente)
- La velocidad del viento menor a 3 [m/s]
- Presión atmosférica de 991 a 1017 [hPa]
- Temperatura del aire de 10 a 30 [°C]
- La velocidad de prueba sea 3/4 de la velocidad máxima (≈ 90 [km/h])
- Método gravimétrico para medir el consumo de combustible
- Porcentaje de repetibilidad menor al 5 [%]
- Carretera sin presencia de lluvia
- Repetir la prueba un mínimo de 4 veces y un máximo de 10

Las dos normas establecen un método de medición del consumo de diesel por gravimetría el cual consiste colocar un depósito de combustible portátil con conexiones rápidas, el cual será pesado tanto al inicio y al final de cada una de las pruebas, el valor de la diferencia de los datos registrados, da el consumo de diesel en kilogramos.

3. Materiales y Métodos

3.1. Vehículo seleccionado

Se utiliza un camión de marca HINO que registra 4210 unidades vendidas en el 2019, de los cuales el 28.7 [%] corresponden a chasis de buses y 71.3 [%] a camiones. Un estudio previo de consumo de combustible en carretera realizado por la Escuela Politécnica Nacional, utiliza un camión de carga mediana modelo GD8JLSA, razón por la cual se considera para nuestro estudio (AEADE, 2019).

El deflector de aire es un modelo realizado bajo especificaciones de la cabina y zona de carga en fibra de vidrio su costo es de \$600 dólares, el camión y el deflector de aire.

3.2. Metodología

Se utiliza una metodología experimental en la cual se analiza la geometría de un camión y su deflector de aire, mediante la ecuación unidimensional de la fuerza de arrastre, variando los parámetros de la cual está constituida, acorde a las normas y reglamentos establecidos por las instituciones de control. Con un software de dinámica de fluidos computacional (CFD), se establece el coeficiente de arrastre y la fuerza de arrastre del camión con y sin el uso del deflector de aire, de manera de obtener un porcentaje de reducción que se validará este modelo con estudios realizados en este campo, además se visualizará el comportamiento del flujo de aire.

4. Discusión y Resultados

Utilizando un túnel de viento se determinó el coeficiente de arrastre de 0,706 para un modelo a escala 1:32 de un camión y su remolque (Bayindirli, Akansu, & Salman, 2016). El coeficiente de arrastre para un camión sin ayudas aerodinámicas es de 0,78 (SAE-J2188, 2018)

Los registros de las mediciones meteorológicas por parte del INAMHI son variantes a cada momento, por lo tanto, para el 22/01/2020 a las 13:00 del día se tiene la tabla 3, en donde se indican los valores para distintos lugares que frecuenta el transporte de carga entre la ruta Guayaquil - Quito.

Tabla 3. Pronóstico del tiempo

Localidad	Tem p. (°C)	Precipitación (mm)	Humedad relativa (%)	Vel. viento (m/s)
Durán	31,0	0,0	63,4	1,0
Babahoyo	30,4	0,1	68,0	1,2
Ventanas	26,8	0,1	74,2	1,5
Santo Domingo de los Colorados	27,0	0,0	74,5	1,4

Fuente: (INAMHI, 2020)

Para el punto de monitoreo Santo Domingo de los Colorados con una presión atmosférica de

985,7 hPa y los datos antes mencionados se puede estimar la densidad del aire con un valor de 1,1330 kg/m³ (CENAM, 2020).

La geometría utilizada es la de un camión Hino 500 cuya área frontal medida es de 7,743 m², la velocidad máxima que puede alcanzar es de 120 km/h según datos del catálogo de la marca (HINO, 2015).

Los datos que serán utilizados para los cálculos se indican en la tabla 4.

Tabla 4. Datos del estudio

Variable	Valor
Velocidad del aire (m/s)	1.4
Velocidad del vehículo (m/s)	0 – 33.333
Densidad del aire (kg/m ³)	1.333
Área frontal del camión (m ²)	7.743
Coefficiente de arrastre	0.78

Fuente: Los autores

La potencia de arrastre es directamente proporcional a la fuerza de arrastre por la velocidad del camión, estos valores se indican la tabla 5.

Tabla 5. Fuerza de arrastre y potencia

Velocidad del camión (km/h)	Fuerza de arrastre (kN)	Potencia de arrastre (kW)
0	0,01	0,00
10	0,07	0,19
20	0,19	1,08
30	0,38	3,17
40	0,63	6,99
50	0,94	13,05
60	1,31	21,87
70	1,75	33,97
80	2,24	49,87
90	2,80	70,08
100	3,42	95,12
110	4,11	125,51
120	4,85	161,77

Fuente: Los autores

En la figura 1, se indica el comportamiento de estos valores de fuerza y potencia, conforme se incremente la velocidad del camión.

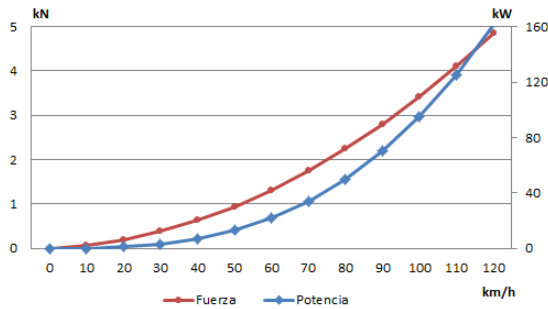


Figura 1. Fuerza y potencia de arrastre
Fuente: Los autores

La potencia del motor según catálogo es de 194 kW, por tanto, en una vía urbana la velocidad máxima permitida para un vehículo de carga es de 40 km/h y se requiere 6,99 kW para mantener dicha velocidad, a diferencia de una recta en carretera que se puede alcanzar los 70 km/h como límite máximo y se requiere de 33,97 kW, considerando solo la fuerza de arrastre que tiene que vencer el vehículo.

Al cambiar las dimensiones de la zona de carga, por las máximas permitidas, se incrementa el área frontal a 10,4 m² con ello hay un aumento de potencia de arrastre como se indica en la tabla 6.

Tabla 6. Fuerza y potencia de arrastre para un área frontal mayor

Velocidad del camión (km/h)	Fuerza de arrastre (kN)	Potencia de arrastre (kW)
0	0,01	0,00
10	0,09	0,26
20	0,26	1,45
30	0,51	4,26
40	0,84	9,39
50	1,26	17,53
60	1,76	29,38
70	2,35	45,63
80	3,01	66,98
90	3,77	94,13
100	4,60	127,76
110	5,52	168,58
120	6,52	217,28

Fuente: Los autores

Cuando el vehículo circula a 40 km/h se requiere 9,39 kW y a 70 km/h se requiere 45,63 kW, este aumento se visualiza en la figura 2.

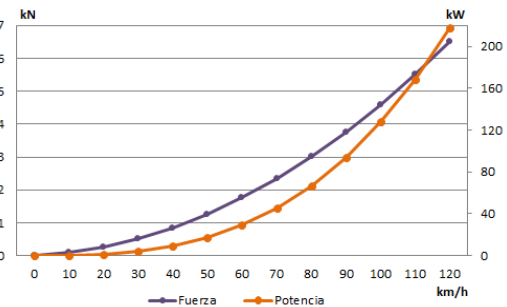


Figura 2. Fuerza y potencia de arrastre para un área frontal mayor
Fuente: Los autores

A mediados de enero del 2019 se ha emitido un boletín de advertencia por parte del INAMHI debido a la existencia de ráfagas de viento que podrían superar los 50 km/h (13,89 m/s).

Al variar la velocidad del viento a 13,89 m/s conlleva un incremento de la potencia de arrastre que se indica en la tabla 7

Tabla 7. Fuerza y potencia de arrastre con vel. Aire de 50 km/h

Velocidad del camión (km/h)	Fuerza de arrastre (kN)	Potencia de arrastre (kW)
0	0,78	0,39
10	1,12	3,11
20	1,52	8,46
30	1,99	16,57
40	2,52	27,95
50	3,11	43,14
60	3,76	62,64
70	4,47	86,97
80	5,25	116,65
90	6,09	152,19
100	6,99	194,12
110	7,95	242,96
120	8,98	299,21

Fuente: Los autores

Cuando el vehículo circula a 40 km/h se requiere 27,95 kW y a 70 km/h se requiere 86,97 kW, este aumento se visualiza en la figura 3.

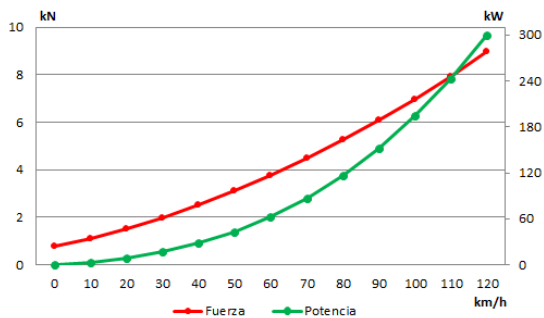


Figura 3. Fuerza y potencia de arrastre para un área frontal mayor
Fuente: Los autores

Los camiones transportan carga (alimentos, maquinaria, ropa, medicinas, accesorios, etc.) a distintos lugares del Ecuador (Litoral, Sierra y Amazonia) por lo que se considera que la densidad del aire varía según el lugar donde se encuentre, para ello se dispone de tres puntos de análisis en donde se encuentran instaladas estaciones de monitoreo, como se indica en la tabla 8.

Tabla 8. Pronóstico del tiempo

Provincia	Estación	Código	Altitud (m)
Guayas	Camaronera-Songa	M5131	3
Cotopaxi	Rumipamba Salcedo	M0004	2685
Pastaza	Puyo	M0008	956

Fuente: (INAMHI, 2020)

Los valores de los parámetros atmosféricos de las estaciones en el 24/06/2020 a las 10:00 de la mañana se indican en la tabla 9.

Tabla 9. Parámetros atmosféricos

Estación	Temp. (°C)	Pres. Atmosférica (hPa)	Humedad relativa (%)	Vel. viento (m/s)
Camaronera-Songa	25,3	1011,8	74	3,2
Rumipamba Salcedo	14,4	740,6	69	2,6
Puyo	24,5	908,3	66	1,3

Fuente: (INAMHI, 2020)

Los valores de densidad del aire para las estaciones de monitoreo seleccionadas se indica en la tabla 10.

Tabla 10. Densidad del aire

Estación	Densidad del aire (kg/m ³)
Camaronera-Songa	1,170909
Rumipamba Salcedo	0,890286
Puyo	1,056427

Fuente: (INAMHI, 2020)

Utilizando esta variable se tiene las curvas correspondiente a la fuerza de arrastre para diferentes alturas, como se indica en la tabla 11.

Tabla 11. Fuerza de arrastre a diferentes alturas

Velocidad camión (km/h)	Estación de monitoreo Fuerza de arrastre (kN)		
	M5131	M0008	M0004
0	0.01	0.01	0.01
10	0.06	0.06	0.05
20	0.17	0.15	0.13
30	0.33	0.30	0.25
40	0.55	0.50	0.42
50	0.83	0.74	0.63
60	1.15	1.04	0.88
70	1.53	1.38	1.17
80	1.97	1.78	1.50
90	2.46	2.22	1.87
100	3.01	2.71	2.29
110	3.61	3.26	2.74
120	4.26	3.85	3.24

Fuente: (INAMHI, 2020)

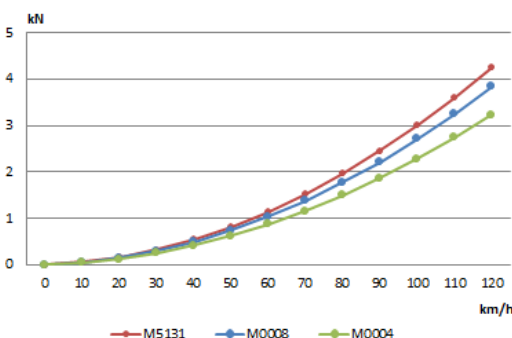


Figura 4. Fuerza de arrastre a diferentes alturas
Fuente: Los autores

La fuerza de arrastre es mayor en la región litoral debido a los parámetros atmosféricos de la zona, en especial a la presión atmosférica que dificulta que el aire se desplazarse por el interior y exterior del camión, además este parámetro también influye directamente en la densidad del aire.

Al utilizar un software CFD en primer lugar se debe obtener la geometría para la simulación, de preferencia un modelo simplificado a escala real por el gasto computacional del equipo (horas de simulación), el dominio tiene las siguientes dimensiones 8x18x6 [m].

Las características del mallado se indican en la tabla 12,

Tabla12. Características de la malla

Descripción	Valor
Orden de elementos	Lineal
Función del tamaño	Curvatura
Nodos	269369
Elementos	1447623
Suavizado	Medio
Angulo normal de curvatura	18°

Fuente: Los autores

Las partes curvas del modelo tienen un refinamiento de malla fino.

Las condiciones de frontera se indican en la tabla 13.

Tabla13. Características de la malla

Descripción	Valor
Tipo de análisis	Estado estable
Tipo de dominio	Dominio fluido
Material	Aire a 25 °C
Presión de referencia	1 atm
Inlet	120 km/h
Outlet	1 atm
Wall	Free slip wall

Fuente: Los autores

Tanto las paredes del dominio como la superficie del camión tienen la condición de pared deslizante libre, el flujo de aire no experimenta ningún tipo de restricción al momento de acerca a esas superficies.

El valor de la velocidad del aire que se ingresa a la simulación es de 120 km/h (33.33 m/s), esta velocidad se incrementa hasta los 300 km/h

(83.33 m/s) en las superficies con aristas vivas, se observa que el flujo de aire choca contra la parte superior de la estructura de carga y se desplace al interior, disminuyendo la velocidad del aire.

La fuerza de arrastre que se determina mediante la simulación tiene un valor de 4361.67 [N] utilizando los datos anteriores se estima un coeficiente de arrastre de 0.7010

Al utilizar el deflector, el flujo de aire choca y de desplaza a lo largo de la estructura de carga, de manera que la fuerza de arrastre disminuye a 4117.01 [N], el coeficiente de arrastre baja a un valor de 0.6617, en cuanto a la velocidad se mantiene alto en las aristas vivas de la cabina, como se indica en la figura 5.

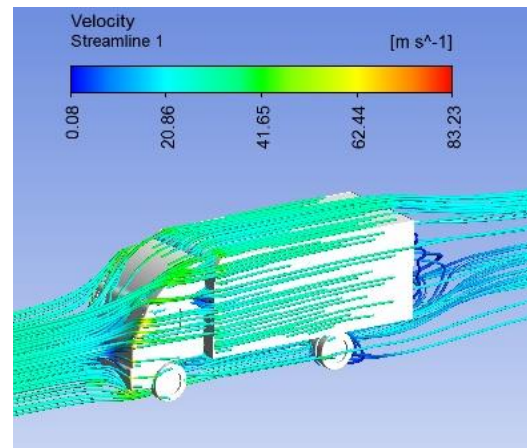


Figura 5. Flujo de aire con deflector de aire

Al incorporar un dispositivo aerodinámico (deflector de aire) en la cabina del camión de este estudio complementario se consigue disminuir la fuerza de arrastre y coeficiente de arrastre en 5.607 [%], un estudio previo de consumo de combustible en carretera realizado en la Escuela Politécnica Nacional, con los mismos materiales (camión y deflector) obtienen un 4.63 [%] en el ahorro de consumo de diesel (Pachacama & Simbaña, 2017).

5. Conclusiones

Los parámetros atmosféricos de los distintos lugares por donde circula el camión afectan a la fuerza de arrastre, debido en mayor medida a la influencia de la presión atmosférica que restringe el movimiento del flujo de airea través del camión.

Con una geometría básica del camión se obtuvo un coeficiente de arrastre de 0.7010 sin la ayuda

de dispositivos aerodinámicos, valor similar al que se establece en la norma SAE J2188.

Los datos experimentales obtenidos del estudio reflejan una disminución del coeficiente de arrastre en 0.0393, con ello reduce la fuerza de arrastre en 244.66 [N], estos valores se relacionan con el 4.63 [%] del ahorro de consumo de combustible en carretera, realizado con los mismos materiales.

Al existir una gran cantidad de dispositivos aerodinámicos que ayudan a reducir la fuerza de arrastre y por consiguiente el consumo de combustible en el transporte de carga terrestre, se deja planteado una alternativa de estudio que se puede ampliar a dichos dispositivos.

6. Agradecimientos

7. Referencias

- AEADE. (2019). *Anuario*. Quito: AEADE.
- AEADE. (2020). *Sector automotor en cifras*. Quito: AEADE.
- Ansys. (2018). *CFX - Help support*. ANSYS, Inc.
- Bayindirli, C., Akansu, E., & Salman, S. (2016). *The determination of aerodynamic drag coefficient of truck and trailer model by wind tunnel tests*. Turkey: ACADEMICPAPER.
- Cascajosa, M. (2005). *Ingeniería de vehículos: Sistemas y Cálculos*. México: Alfaomega.
- CENAM. (22 de 01 de 2020). *Cálculo de la densidad del aire*. Obtenido de <http://www.cenam.mx/publicaciones/cdensidad.aspx>
- DIN 70 030-2. (1986). Método de medición del consumo de combustible: camiones y buses. 1.
- Filippone, A. (12 de 06 de 2020). *Aerodynamic Database*. Obtenido de <https://www.if.ufrj.br/~carlos/palestras/futebol/dragData/Aerodynamic%20Drag%20Data.htm>
- Gatehouse Media, I. (12 de 06 de 2020). *Best.Ride.com*. Obtenido de Trucks and SUVs Get Slippery – A New Focus On Aerodynamics Aims To Make Big Vehicles Less of a Drag: [http://bestride.com/news/trucks-and-suvs-get-slippery-a-new-focus-on-](http://bestride.com/news/trucks-and-suvs-get-slippery-a-new-focus-on-aerodynamics-aims-to-make-big-vehicles-less-of-a-drag)
- aerodynamics-aims-to-make-big-vehicles-less-of-a-drag
- HINO. (2015). *Especificaciones Hino serie 500*. Japón: HINO MOTORS, Ltd.
- Hirsch, C. (2007). *Fundamentos de dinámica computacional de fluidos*. India: JohnWiley & Sons.
- Hirz, M., & Stadler, S. (2013). *A new approach for the reduction of aerodynamic drag of long-distance transportation vehicles*. USA: SAE.
- Hucho, W.-H. (1990). *Aerodynamic of Road Vehicles*. Germany: Butterworth-Heinemann Ltd .
- INAMHI. (22 de Enero de 2020). *Pronóstico del tiempo*. Obtenido de <http://186.42.174.241/InamhiPronostico/>
- INAMHI. (2019). *Boletín Meteorológico Nro. 003*. Quito: Dirección de Pronósticos y Alertas Hidrometeorológicas.
- Jhon D., A. (1991). *Fundamentos de Aerodinámica*. USA: McGraw-Hill.
- Mehrdad Y Otros, E. (2014). *Vehículos Modernos Eléctricos, Híbridos Eléctricos y de Celdas de Combustible*. USA: CRC PRES.
- Mott, R. (2006). *Mecánica de Fluidos*. México: Pearson Educación.
- Pachacama, D., & Simbaña, J. (2017). *Evaluación del consumo de combustible de un camión con la implementación de un deflector de aire*. Quito: EPN.
- Petroecuador. (2019). *Informe estadístico anual 2019*. Quito: EP Petroecuador.
- Remache, A., Tipanluisa, L., Salvador, J., & Erazo, W. (2015). *Análisis aerodinámico regional mediante cfd de un semirremolque cisterna para transporte de cemento*. Perú: UNASAM.
- SAE J1321. (2012). Procedimiento de ensayo de consumo de combustible: Camiones y buses.
- SAE-J2188. (2018). *Commercial Truck and Bus SAE Recommended Procedure for Vehicle Performance Prediction and Charting*. USA: SAE.
- Villalobos, J., Arancibia, N., Retamal, S., Olivo, P., & Vásquez, J. (2011). *Impacto de la aerodinámica para el ahorro de combustible*. Chile: AChEE.
- Villalobos, J., Gavilan, C., Salazar, C., & Rojas, C. (2012). *Impacto del diseño de cabinas en el consumo de combustible*. Chile: AChEE.

ANEXOS

INFORME ESTADÍSTICO

**ENERO – DICIEMBRE
2019**



**SUBGERENCIA DE PLANIFICACIÓN
Y CONTROL DE GESTIÓN**

JEFATURA CORPORATIVA DE PLANIFICACIÓN

ENERO 2020

Información Provisional



CIFRAS OPERATIVAS EP PETROECUADOR

ENERO - DICIEMBRE 2019

Cifras en miles de barriles

TRANSPORTE DE CRUDO



192.892

SOTE 124.824
OCP 68.069

120.932

72.573 ORIENTE
48.360 NAPO

EXPORTACIÓN DE CRUDO



CARGAS DE CRUDO A REFINERÍAS



52.069

REE 31.796
RLL 13.563
RSH 6.710

IMPORTACIÓN DE DERIVADOS

58.217

24.650

NAO 93 11.242
NAO 97 9.142
Cutter S. 4.266

33.567

Diesel 2 6.306
D. Premium 15.093
GLP 12.125
Avgas 43

15.849

13.631 Fuel Oil # 6
693 Fuel Oil # 4
1.525 Gasoleo

EXPORTACIÓN DE DERIVADOS



PRODUCCIÓN NACIONAL DE DERIVADO:



75.625

Gasolinas 30.225
D. 2 y Premium 12.053
Fuel Oil # 4 8.330
Fuel Oil # 6 Exp. 13.641
Otros 11.378

91.383

TRANSPORTE DE DERIVADOS

91.000

30.156 Gasolinas
32.945 D. 2 y Premium
7.577 Fuel Oil # 4
13.966 GLP
6.356 Otros

DEMANDA DE DERIVADOS





Marzo 2020 - No. 42

SECTOR AUTOMOTOR

en cifras

¡Afíliate!

Mercado Automotor en Cifras
es una publicación exclusiva para los
afiliados de AEADE.

Si deseas recibir las estadísticas completas, contáctanos
a aeade@aeade.net o al teléfono 02-2269052

www.aeade.net

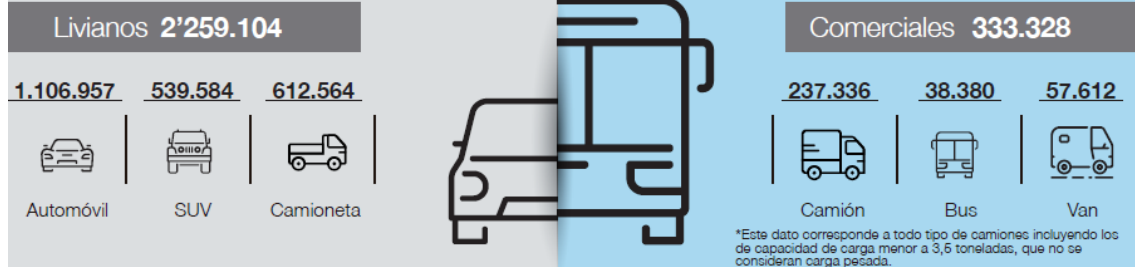
Publicado el **21 de marzo de 2020**

Núñez De Vela E 3-13 y Atahualpa
Edificio Torre del Puente, Piso 10.

Teléfono: 02 226 9052 / 226 9056 / 226 4925 / 226 4927

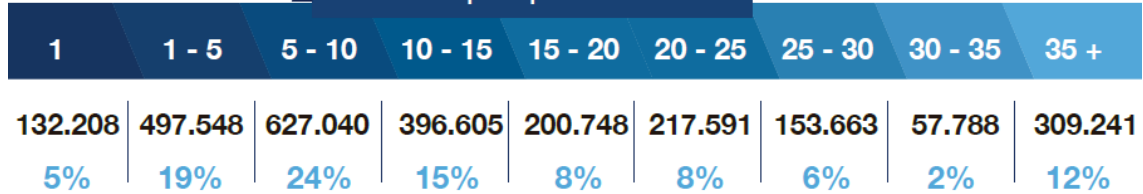
Quito - Ecuador

Número de vehículos



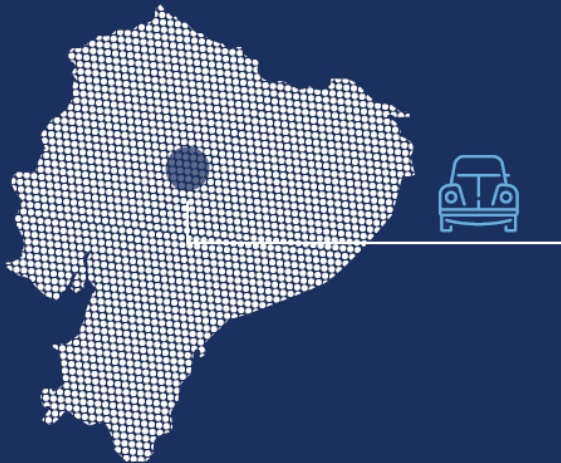
Edad del parque automotor

Edad promedio: 16,1 años



TOTAL: 2'592.432

Ubicación geográfica



PICHINCHA	881.375
GUAYAS	670.523
AZUAY	183.301
TUNGURAHUA	151.952
MANABÍ	120.165
IMBABURA	78.292
EL ORO	69.365
CHIMBORAZO	68.194
LOJA	60.443
LOS RÍOS	56.960
COTOPAXI	56.522
SANTO DOMINGO	49.528
CAÑAR	36.214
ESMERALDAS	26.336
CARCHI	22.085
BOLIVAR	14.167
ORELLANA	9.613
SUCUMBIÓS	8.954
PASTAZA	9.008
MORONA SANTIAGO	5.099
NAPO	4.869
SANTA ELENA	4.925
ZAMORA CHINCHIPE	3.892
GALÁPAGOS	652

Fuentes: Base de matriculación del Servicio de Rentas Internas (SRI), 2015
Estimaciones de la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE), 2018
AUTÓPLUS, 2018

*No incluye motos

ANEXO 3. Impacto del diseño de cabinas en el consumo de combustible

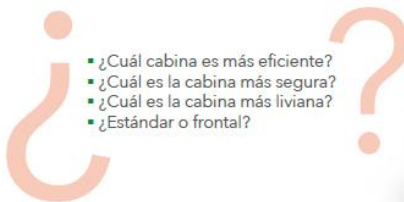


Eficiencia Energética en el TRANSPORTE DE CARGA

Impacto del Diseño de Cabinas en el Consumo de Combustible

La Importancia del Diseño

El diseño de la cabina debe cumplir con los requerimientos de la operación y conjugar de manera eficaz factores como seguridad, comodidad, radio de giro, distribución de carga, peso bruto vehicular y aerodinámica, factores decisivos a la hora de cuantificar el consumo de combustible



- ¿Cuál cabina es más eficiente?
- ¿Cuál es la cabina más segura?
- ¿Cuál es la cabina más liviana?
- ¿Estándar o frontal?



Comprobar que el diseño de las cabinas impacta en el consumo de combustible, y evaluar el impacto del diseño de los camiones y tracto camiones en la eficiencia energética de las operaciones de transporte de carga, es fundamental para la toma de decisiones de la industria, para las políticas públicas y finalmente para la competitividad país. **Por esta razón que surge la medida N°25 del Impulso Competitivo, que permite utilizar tractores estándar (con capot) con trailers de 48 pies.**



¿Por qué en Estados Unidos la gran mayoría de los camiones con estándar (con capot)? Estudios norteamericanos demostraron que los camiones con capot son más eficientes y seguros que los frontales (ambos de tecnología norteamericana). La eficiencia de este diseño de camiones se incrementa debido a que la velocidad de circulación permitida supera los 100 km/h en algunos estados.



¿Por qué en Europa solo se fabrican camiones frontales? En virtud de la infraestructura vial, la Comunidad Europea posee una legislación estricta en velocidad (bajo los 90km/h) y dimensiones, haciendo de éste un mercado poco atractivo para los camiones estándar.

Hoy el Transport & Environment de la Comunidad Europea sugiere como política pública la extensión en 1 metro el largo de los camiones y tracto camiones, apelando a importantes mejoras en seguridad y eficiencia energética. (ver figura superior)



La Aerodinámica proporciona un gran potencial para reducir el consumo y las emisiones en camiones y autobuses. Sin embargo, los fabricantes europeos tienen poco margen de acción para optimizar la aerodinámica de los camiones debido a la imposición legal de las dimensiones de longitud y altura.

Con las condiciones existentes, los camiones COE o Frontales han alcanzado las características aerodinámicas óptimas. Si las dimensiones cambiases legalmente, la resistencia aerodinámica de los camiones podría reducirse notablemente.



Centro del Transporte
Universidad Andrés Bello





Eficiencia Energética en el **TRANSPORTE DE CARGA** Impacto del Diseño de Cabinas en el Consumo de Combustible

El Procedimiento

La prueba consiste en comparar el consumo de combustible de dos camiones en la ruta. En este caso el "Diseño de la Cabina" se expresa en el porcentaje de combustible ahorrado. El cual es calculado usando los consumos de combustibles relativos entre un camión y otro respecto de un vehículo de control. Cada uno de los consumos relativos representan un segmento de prueba en los que participa un vehículo de control (C) y un vehículo de prueba (T), aislando matemáticamente factores climatológicos en carreteras nacionales y a 90km/h.

Los vehículos comparados son dos tractores marca Freighliner modelos Columbia y Argosy, idénticos en su tren motriz (kilometraje, mantenimiento, motor, caja de cambios, diferenciales y llantas) y ambos con una carga de 24.600 kg.



Tanto el protocolo de prueba basado en la norma SAE J-1321 utilizado en el proyecto, así como los resultados obtenidos por su implementación fueron validados por el Centro de Certificación y Control Vehicular (CCV), organismo dependiente del Ministerio de Transportes encargado de la certificación vehicular del país.

La Prueba

El circuito de prueba cuenta en total con aproximadamente 71,6 kilómetros de distancia y comienza en el trébol vial cruce Champa, aproximadamente en el kilómetro 47,5 de la carretera Sur, y retorna en el trébol de General Velázquez con Américo Vespucio Express en el kilómetro 7,7 de Autopista Central - General Velázquez.

Consideraciones:

- Cada día, antes de las corridas de prueba, los vehículos se calientan hasta la temperatura de funcionamiento óptima.
- La velocidad de ambos vehículos será controlada por velocidad crucero y GPS a 90 km/h.
- Se controla la conducción mediante observadores (copilotos) e hitos demarcados en la ruta, teniendo especial precaución en los procesos de aceleración, conexión y desconexión de la velocidad crucero.

El consumo de combustible fue medido por proceso de gravimetría, esto requiere que el combustible sea pesado antes y después de cada vuelta; la diferencia entre ambos representa el consumo. A fin de respetar los tiempos entre vueltas establecidos por la norma, es necesario equipar los camiones con estanques removibles con fittings de conexión rápida.

- El tiempo de cada corrida (58 minutos aprox.) no debe variar más de 17 segundos entre vueltas.
- Los vehículos fueron puestos a punto para la prueba y cada uno tuvo un mantenimiento equivalente al otro.
- Una sola corrida no es concluyente, ésta es solo un indicador que debe ser comparada con al menos otras dos corridas.
- Mientras mayores sean las variables controladas, mayor es la precisión de los resultados, por esto se controlaron también las condiciones ambientales de cada corrida.





Eficiencia Energética en el **TRANSPORTE DE CARGA** Impacto del Diseño de Cabinas en el Consumo de Combustible

Pruebas Efectuadas en Rutas Nacionales, Según el Protocolo de Prueba SAE-J 1321.

La Norma SAE J-1321 es un procedimiento creado por Society of Automotive Engineers (SAE) para comparar el consumo de combustible de un vehículo que opera bajo condiciones distintas, ya sea producto de la implementación de tecnologías, cambios de conducción o la comparación de dos vehículos completamente distintos.

Es importante destacar que esta prueba requiere de un vehículo de control, el que no debe ser modificado. Dicho vehículo permite aislar matemáticamente variables externas que afecten también al vehículo de prueba como el viento, temperatura, condiciones de la carretera y otras.

La Norma SAE J-1321, dio origen al proyecto de norma chilena INN pnNCh 3331 "Método de prueba para la determinación del consumo de combustible para vehículos de transporte terrestre", que permite realizar pruebas con la misma rigurosidad, pero adaptada a las condiciones de operación y factibilidad nacional.



La Metodología

La metodología se basa en realizar tres corridas válidas (según el protocolo SAE J-1321) para obtener un dato para la línea base, así como tres corridas válidas para cada uno de los segmentos de pruebas necesarios. Las corridas serán validadas por requerimientos prácticos y estadísticos:

Vehículo de Control C: Freightliner Argosy año 2005, con un Trailer Great Dane SSL año 2012, con un peso bruto total de 40.800 kg.

Vehículo de Prueba T0: Freightliner Argosy año 2005, con un Trailer Great Dane SSL año 2012, con un peso bruto total de 40.760 kg.

Vehículo de Prueba T1: Freightliner Columbia (Standard) año 2008 con un tráiler Great Dane SSL año 2012, con un peso bruto total de 40.900 kg.

Los Resultados

En el cuadro podemos encontrar el consumo de combustible en Kg, para los vehículos de control y prueba, con ello se generan los ratios para los segmentos de línea base y prueba.

Se demuestra que el diseño de cabina del Columbia, diseño Standard o con Capot, impacta de manera positiva en el consumo de combustible, ahorrando un 3,96% de combustible.

Resultados de la comparativa

Ahorro 3,96%

Segmento de Línea Base Control C - Prueba T0				Segmento de Prueba Control C - Prueba T1			
Corrida	Prueba T0 (kg)	Control (kg)	T0/C	Corrida	Prueba T1 (kg)	Control (kg)	T1/C
1	23,86	24,08	0,9909	1	23,02	24,30	0,9473
2	23,54	23,74	0,9916	2	22,80	24,18	0,9429
3	23,64	24,30	0,9728	3	23,06	24,22	0,9521
4	23,64	23,86	0,9908	4			

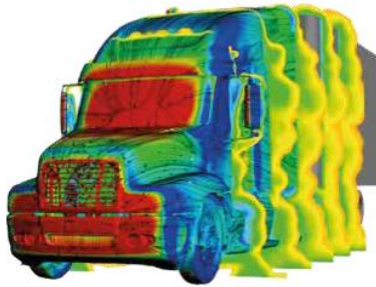


Eficiencia Energética en el **TRANSPORTE DE CARGA**

Impacto del Diseño de Cabinas en el Consumo de Combustible

El Concepto

Cuando un vehículo avanza, debe ir desplazando el aire que tiene delante y llenando el espacio que va dejando detrás. A mayor velocidad, mayor es la potencia necesaria para realizar dicho trabajo. La resistencia aerodinámica depende de la sección frontal del vehículo (destacada en color rojo en la figura), de la densidad del aire y de la velocidad elevado al cuadrado.



Alcances, Limitaciones y Proyecciones

Los resultados de esta prueba no deben ser extrapolados a otras marcas, ya que al comparar equipos de marcas distintas no solo comparamos el diseño de cabina, sino que el equipo entero: motor, caja, diferenciales, cabina, suspensión, peso y otros factores que fueron aislados en esta prueba.

Creemos necesario entonces comprar equipos y nuevas tecnologías para que sumado a los trabajos efectuados previamente por el Centro del Transporte de la Universidad Andrés Bello y la Agencia Chilena de Eficiencia Energética formen parte de un material permanente que permita mejorar la toma de decisiones del sector y además actuar como catalizador entre los proveedores de la industria, que en muchos casos basan sus campañas de marketing y comercialización en mejoras en la eficiencia energética.

Equipo Investigador y Contactos

Participantes del proyecto



Julio Villalobos
Director Centro del Transporte
Universidad Andrés Bello



Carlos Salazar
Investigador Centro del Transporte
Universidad Andrés Bello



Claudio Gavilan
Jefe Área Transporte
Agencia Chilena de Eficiencia
Energética (ACHEE)



Cesar Rojas
Jefe de Mantenimiento
TNT-LTCargo

Links de Interés

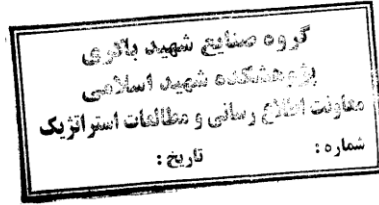
www.part20.eu
www.greenfreighteurope.eu
www.epa.gov/smartway
transporte.unab.cl
www.acee.cl

Contacto

Julio Villalobos C.
jvillalobosc@unab.cl

FUNDAMENTALS OF AERODYNAMICS

Second Edition



John D. Anderson, Jr.
*Professor of Aerospace Engineering
University of Maryland*

McGraw-Hill, Inc.

New York St. Louis San Francisco Auckland
Bogotá Caracas Hamburg Lisbon London Madrid
Mexico Milan Montreal New Delhi Paris San Juan
São Paulo Singapore Sydney Tokyo Toronto

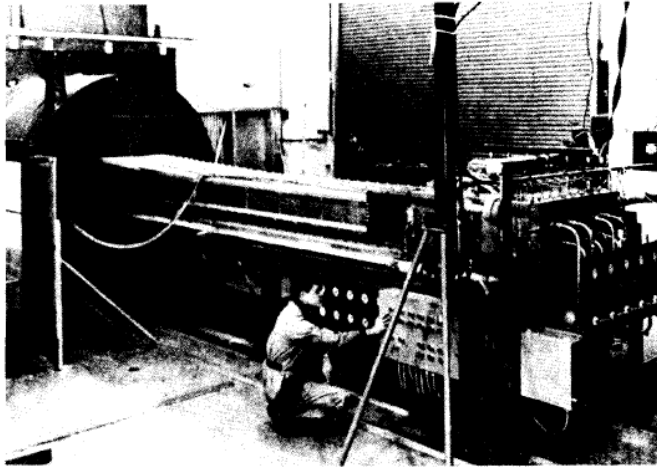


FIGURE 1.5
A $\text{CO}_2\text{-N}_2$ gas-dynamic laser, circa 1969. (Courtesy of the Avco-Everett Research Laboratory.)

The above is just a sample of the myriad applications of aerodynamics. One purpose of this book is to provide the reader with the technical background necessary to fully understand the nature of such practical aerodynamic applications.

1.3 ROAD MAP FOR THIS CHAPTER

When learning a new subject, it is important for you to know where you are, where you are going, and how you can get there. Therefore, at the beginning of each chapter in this book, a road map will be given to help guide you through the material of that chapter and to help you obtain a perspective as to how the material fits within the general framework of aerodynamics. For example, a road map for Chap. 1 is given in Fig. 1.6. You will want to frequently refer back to these road maps as you progress through the individual chapters. When you reach the end of each chapter, look back over the road map to see where you started, where you are now, and what you learned in between.

1.4 SOME FUNDAMENTAL AERODYNAMIC VARIABLES

A prerequisite to understanding physical science and engineering is simply learning the vocabulary used to describe concepts and phenomena. Aerodynamics

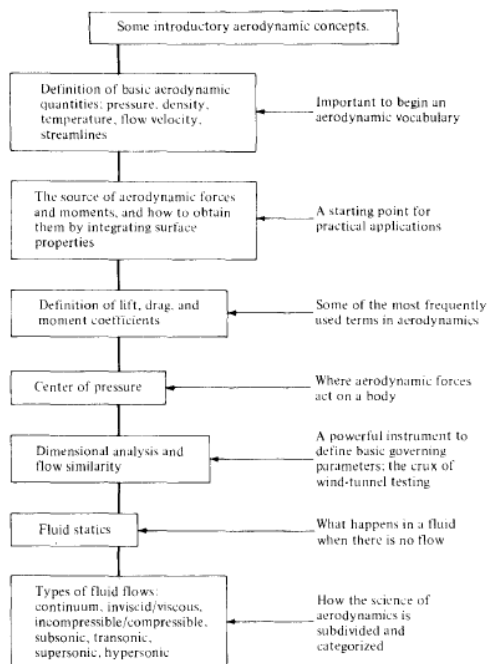


FIGURE 1.6
Road map for Chap. 1.

is no exception. Throughout this book, and throughout your working career, you will be adding to your technical vocabulary list. Let us start by defining four of the most frequently used words in aerodynamics: “pressure,” “density,” “temperature,” and “flow velocity.”†

Consider a surface immersed in a fluid. The surface can be a real, solid surface such as the wall of a duct or the surface of a body; it can also be a free surface which we simply imagine drawn somewhere in the middle of the fluid. Also, keep in mind that the molecules of the fluid are constantly in motion. *Pressure* is the normal force per unit area exerted on a surface due to the time rate of change of momentum of the gas molecules impacting on (or crossing)

† A basic introduction to these quantities is given on pages 51–55 of Ref. 2.

that surface. It is important to note that even though pressure is defined as force "per unit area," you do not need a surface that is exactly 1 ft^2 or 1 m^2 to talk about pressure. In fact, pressure is usually defined as a *point* in the fluid or a *point* on a solid surface and can vary from one point to another. To see this more clearly, consider a point B in a volume of fluid. Let

dA = elemental area at B

dF = force on one side of dA due to pressure

Then, the pressure at point B in the fluid is defined as

$$p = \lim_{dA \rightarrow 0} \left(\frac{dF}{dA} \right)$$

The pressure p is the limiting form of the force per unit area, where the area of interest has shrunk to nearly zero at the point B .[†] Clearly, you can see that pressure is a *point property* and can have a different value from one point to another in the fluid.

Another important aerodynamic variable is *density*, defined as the mass per unit volume. Analogous to our discussion on pressure, the definition of density does not require an actual volume of 1 ft^3 or 1 m^3 . Rather, it is a *point property* that can vary from point to point in the fluid. Again, consider a point B in the fluid. Let

dv = elemental volume around B

dm = mass of fluid inside dv

Then, the density at point B is

$$\rho = \lim_{dv \rightarrow 0} \frac{dm}{dv}$$

Therefore, the density ρ is the limiting form of the mass per unit volume, where the volume of interest has shrunk to nearly zero around point B . (Note that dv cannot achieve the value of zero for the reason discussed in the footnote concerning dA in the definition of pressure.)

Temperature takes on an important role in high-speed aerodynamics (introduced in Chap. 7). The temperature T of a gas is directly proportional to the average kinetic energy of the molecules of the fluid. In fact, if KE is the mean molecular kinetic energy, then temperature is given by $\text{KE} = \frac{3}{2} kT$, where k is the Boltzmann constant. Hence, we can qualitatively visualize a high-temperature gas as one in which the molecules and atoms are randomly rattling about at high

[†] Strictly speaking, dA can never achieve the limit of zero, because there would be no molecules at point B in that case. The above limit should be interpreted as dA approaching a very small value, near zero in terms of our macroscopic thinking, but sufficiently larger than the average spacing between molecules on a microscopic basis.

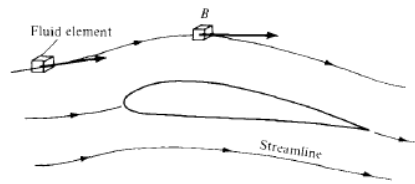


FIGURE 1.7
Illustration of flow velocity and streamlines.

speeds, whereas in a low-temperature gas, the random motion of the molecules is relatively slow. Temperature is also a point property, which can vary from point to point in the gas.

The principal focus of aerodynamics is fluids in motion. Hence, flow velocity is an extremely important consideration. The concept of the velocity of a fluid is slightly more subtle than that of a solid body in motion. Consider a solid object in translational motion, say, moving at 30 m/s. Then all parts of the solid are simultaneously translating at the same 30 m/s velocity. In contrast, a fluid is a “squishy” substance, and for a fluid in motion, one part of the fluid may be traveling at a different velocity from another part. Hence, we have to adopt a certain perspective, as follows. Consider the flow of air over an airfoil, as shown in Fig. 1.7. Lock your eyes on a specific, infinitesimally small element of mass in the gas, called a *fluid element*, and watch this element move with time. Both the speed and direction of this fluid element can vary as it moves from point to point in the gas. Now fix your eyes on a specific fixed point in space, say, point *B* in Fig. 1.7. *Flow velocity* can now be defined as follows: The velocity of a flowing gas at any fixed point *B* in space is the velocity of an infinitesimally small fluid element as it sweeps through *B*. The flow velocity \mathbf{V} has both magnitude and direction; hence, it is a vector quantity. This is in contrast to p , ρ , and T , which are scalar variables. The scalar magnitude of \mathbf{V} is frequently used and is denoted by V . Again, we emphasize that velocity is a point property and can vary from point to point in the flow.

Referring again to Fig. 1.7, a moving fluid element traces out a fixed path in space. As long as the flow is steady, i.e., as long as it does not fluctuate with time, this path is called a *streamline* of the flow. Drawing the streamlines of the flow field is an important way of visualizing the motion of the gas; we will frequently be sketching the streamlines of the flow about various objects. A more rigorous discussion of streamlines is given in Chap. 2.

1.5 AERODYNAMIC FORCES AND MOMENTS

At first glance, the generation of the aerodynamic force on a giant Boeing 747 may seem complex, especially in light of the complicated three-dimensional flow field over the wings, fuselage, engine nacelles, tail, etc. Similarly, the aerodynamic resistance on an automobile traveling at 55 mi/h on the highway involves a

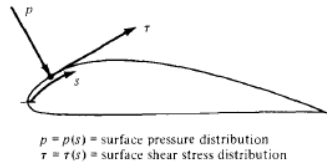


FIGURE 1.8
 Illustration of pressure and shear stress on an aerodynamic surface.

complex interaction of the body, the air, and the ground. However, in these and all other cases, the aerodynamic forces and moments on the body are due to only two basic sources:

1. *Pressure distribution* over the body surface
2. *Shear stress distribution* over the body surface

No matter how complex the body shape may be, the aerodynamic forces and moments on the body are due entirely to the above two basic sources. The *only* mechanisms nature has for communicating a force to a body moving through a fluid are pressure and shear stress distributions on the body surface. Both pressure p and shear stress τ have dimensions of force per unit area (pounds per square foot or newtons per square meter). As sketched in Fig. 1.8, p acts *normal* to the surface, and τ acts *tangential* to the surface. Shear stress is due to the "tugging action" on the surface, which is caused by friction between the body and the air (and is studied in great detail in Chaps. 15 to 17).

The net effect of the p and τ distributions integrated over the complete body surface is a resultant aerodynamic force R and moment M on the body, as sketched in Fig. 1.9. In turn, the resultant R can be split into components, two sets of which are shown in Fig. 1.10. In Fig. 1.10, V_∞ is the *relative wind*, defined as the flow velocity far ahead of the body. The flow far away from the body is called the *freestream*, and hence V_∞ is also called the freestream velocity. In Fig. 1.10, by definition,

- $L \equiv$ lift \equiv component of R perpendicular to V_∞ .
- $D \equiv$ drag \equiv component of R parallel to V_∞ .

The chord c is the linear distance from the leading edge to the trailing edge of the body. Sometimes, R is split into components perpendicular and parallel to

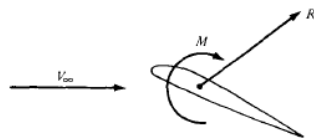


FIGURE 1.9
 Resultant aerodynamic force and moment on the body.

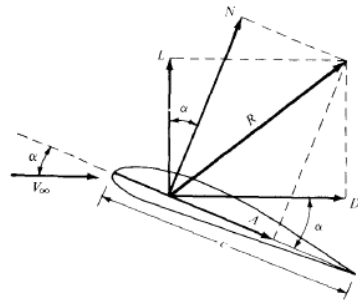


FIGURE 1.10
Resultant aerodynamic force and the components into which it splits.

the chord, as also shown in Fig. 1.10. By definition,

$N = \text{normal force} \equiv \text{component of } R \text{ perpendicular to } c$

$A = \text{axial force} \equiv \text{component of } R \text{ parallel to } c$

The angle of attack α is defined as the angle between c and V_∞ . Hence, α is also the angle between L and N and between D and A . The geometrical relation between these two sets of components is, from Fig. 1.10,

$$L = N \cos \alpha - A \sin \alpha \tag{1.1}$$

$$D = N \sin \alpha + A \cos \alpha \tag{1.2}$$

Let us examine in more detail the integration of the pressure and shear stress distributions to obtain the aerodynamic forces and moments. Consider the two-dimensional body sketched in Fig. 1.11. The chord line is drawn horizontally, and hence the relative wind is inclined relative to the horizontal by the angle of attack α . An xy coordinate system is oriented parallel and perpendicular, respectively, to the chord. The distance from the leading edge measured along the body surface to an arbitrary point A on the upper surface is s_u ; similarly, the distance to an arbitrary point B on the lower surface is s_l . The pressure and shear stress on the upper surface are denoted by p_u and τ_u , respectively; both p_u and τ_u are functions of s_u . Similarly, p_l and τ_l are the corresponding quantities on the lower surface and are functions of s_l . At a given point, the pressure is normal to the surface and is oriented at an angle θ relative to the perpendicular; shear stress is tangential to the surface and is oriented at the same angle θ relative to the horizontal. In Fig. 1.11, the sign convention for θ is positive when measured *clockwise* from the vertical line to the direction of p and from the horizontal line to the direction of τ . In Fig. 1.11, all thetas are shown in their positive direction. Now consider the two-dimensional shape in Fig. 1.11 as a cross section of an infinitely long cylinder of uniform section. A unit span of such a cylinder is shown in Fig. 1.12. Consider an elemental surface area dS of this cylinder, where

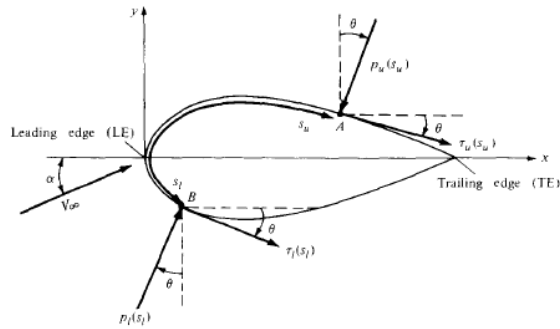


FIGURE 1.11
Nomenclature for the integration of pressure and shear stress distributions over a two-dimensional body surface.

$dS = (ds)(1)$ as shown by the shaded area in Fig. 1.12. We are interested in the contribution to the total normal force N' and the total axial force A' due to the pressure and shear stress on the elemental area dS . The primes on N' and A' denote force per unit span. Examining both Figs. 1.11 and 1.12, we see that the elemental normal and axial forces acting on the elemental surface dS on the upper body surface are

$$dN'_u = -p_u ds_u \cos \theta - \tau_u ds_u \sin \theta \quad (1.3)$$

$$dA'_u = -p_u ds_u \sin \theta + \tau_u ds_u \cos \theta \quad (1.4)$$

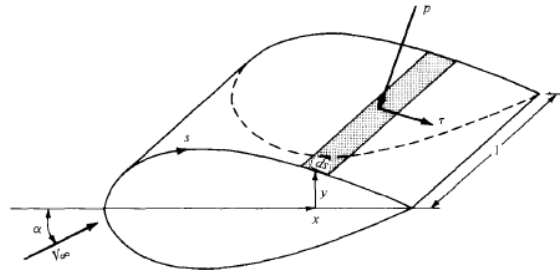


FIGURE 1.12
Aerodynamic force on an element of the body surface.

On the *lower* body surface, we have

$$dN'_l = p_l ds_l \cos \theta - \tau_l ds_l \sin \theta \quad (1.5)$$

$$dA'_l = p_l ds_l \sin \theta + \tau_l ds_l \cos \theta \quad (1.6)$$

In Eqs. (1.3) to (1.6), the positive directions of N' and A' are those shown in Fig. 1.10. In these equations, the positive clockwise convention for θ must be followed. For example, consider again Fig. 1.11. Near the leading edge of the body, where the slope of the upper body surface is positive, τ is inclined upward, and hence it gives a positive contribution to N' . For an upward inclined τ , θ would be counterclockwise, hence negative. Therefore, in Eq. (1.3), $\sin \theta$ would be negative, making the shear stress term (the last term) a positive value, as it should be in this instance. Hence, Eqs. (1.3) to (1.6) hold in general (for both the forward and rearward portions of the body) as long as the above sign convention for θ is consistently applied.

The total normal and axial forces *per unit span* are obtained by integrating Eqs. (1.3) to (1.6) from the leading edge (LE) to the trailing edge (TE):

$$N' = - \int_{LE}^{TE} (p_u \cos \theta + \tau_u \sin \theta) ds_u + \int_{LE}^{TE} (p_l \cos \theta - \tau_l \sin \theta) ds_l \quad (1.7)$$

$$A' = \int_{LE}^{TE} (-p_u \sin \theta + \tau_u \cos \theta) ds_u + \int_{LE}^{TE} (p_l \sin \theta + \tau_l \cos \theta) ds_l \quad (1.8)$$

In turn, the total lift and drag per unit span can be obtained by inserting Eqs. (1.7) and (1.8) into (1.1) and (1.2); note that Eqs. (1.1) and (1.2) hold for forces on an arbitrarily shaped body (unprimed) and for the forces per unit span (primed).

The aerodynamic moment exerted on the body depends on the point about which moments are taken. Consider moments taken about the leading edge. By convention, moments which tend to increase α (pitch up) are positive, and moments which tend to decrease α (pitch down) are negative. This convention is illustrated in Fig. 1.13. Returning again to Figs. 1.11 and 1.12, the moment per unit span about the leading edge due to p and τ on the elemental area dS on the upper surface is

$$dM'_u = (p_u \cos \theta + \tau_u \sin \theta)x ds_u + (-p_u \sin \theta + \tau_u \cos \theta)y ds_u \quad (1.9)$$

On the bottom surface,

$$dM'_l = (-p_l \cos \theta + \tau_l \sin \theta)x ds_l + (p_l \sin \theta + \tau_l \cos \theta)y ds_l \quad (1.10)$$

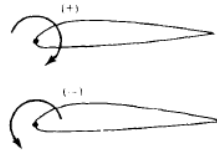


FIGURE 1.13
Sign convention for aerodynamic moments.

In Eqs. (1.9) and (1.10), note that the same sign convention for θ applies as before and that y is a positive number above the chord and a negative number below the chord. Integrating Eqs. (1.9) and (1.10) from the leading to the trailing edges, we obtain for the moment about the leading edge per unit span

$$M'_{LE} = \int_{LE}^{TE} [(p_u \cos \theta + \tau_u \sin \theta)x - (p_u \sin \theta - \tau_u \cos \theta)y] ds_u \\ + \int_{LE}^{TE} [(-p_l \cos \theta + \tau_l \sin \theta)x + (p_l \sin \theta + \tau_l \cos \theta)y] ds_l \quad (1.11)$$

In Eqs. (1.7), (1.8), and (1.11), θ , x , and y are known functions of s for a given body shape. Hence, if p_u , p_l , τ_u , and τ_l are known as functions of s (from theory or experiment), the integrals in these equations can be evaluated. Clearly, Eqs. (1.7), (1.8), and (1.11) demonstrate the principle stated earlier, namely, *the sources of the aerodynamic lift, drag, and moments on a body are the pressure and shear stress distributions integrated over the body*. A major goal of theoretical aerodynamics is to calculate $p(s)$ and $\tau(s)$ for a given body shape and freestream conditions, thus yielding the aerodynamic forces and moments via Eqs. (1.7), (1.8), and (1.11).

As our discussions of aerodynamics progress, it will become clear that there are quantities of an even more fundamental nature than the aerodynamic forces and moments themselves. These are *dimensionless force and moment coefficients*, defined as follows. Let ρ_∞ and V_∞ be the density and velocity, respectively, in the freestream, far ahead of the body. We define a dimensional quantity called the freestream *dynamic pressure* as

$$\text{Dynamic pressure:} \quad q_\infty = \frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2$$

The dynamic pressure has the units of pressure (i.e., pounds per square foot or newtons per square meter). In addition, let S be a reference area and l be a reference length. The dimensionless force and moment coefficients are defined as follows:

$$\text{Lift coefficient:} \quad C_L = \frac{L}{q_\infty S}$$

$$\text{Drag coefficient:} \quad C_D = \frac{D}{q_\infty S}$$

$$\text{Normal force coefficient:} \quad C_N = \frac{N}{q_\infty S}$$

$$\text{Axial force coefficient:} \quad C_A = \frac{A}{q_\infty S}$$

$$\text{Moment coefficient:} \quad C_M = \frac{M}{q_\infty S l}$$



Mecánica de fluidos

Sexta edición

Robert L. Mott

Universidad de Dayton

TRADUCCIÓN

Javier Enríquez Brito

Traductor profesional

REVISIÓN TÉCNICA

Javier León Cárdenas

Universidad La Salle



México • Argentina • Brasil • Colombia • Costa Rica • Chile • Ecuador
España • Guatemala • Panamá • Perú • Puerto Rico • Uruguay • Venezuela



17 Arrastre y sustentación

17.1 Panorama

Mapa de aprendizaje

- Un cuerpo en movimiento sumergido en un fluido experimenta fuerzas ocasionadas por la acción de éste. A esa fuerza se le denomina *arrastre*.
- En forma similar, un fluido en movimiento que incide en un objeto estacionario o que se mueve con lentitud, ejerce una fuerza sobre el objeto.
- Cuando un cuerpo de forma especial denominado *aeroplano** surca el aire, el flujo a su alrededor ocasiona una fuerza neta hacia arriba que recibe el nombre de *sustentación*. Ésta es la causa fundamental por la que vuela el aeroplano.
- Igualmente, los cuerpos de forma especial que se mueven por el agua se llaman *hidroplanos*.
- Usted debe desarrollar la capacidad de analizar las fuerzas de arrastre y sustentación.

Descubrimientos

- Busque ejemplos de productos y equipos en los que las fuerzas de arrastre o sustentación tengan un efecto sobre su funcionamiento o rendimiento.
- Considere algunos de los ejemplos mencionados en la sección Panorama, del capítulo 16.
- Conforme encuentre ejemplos, mencione la forma y tamaño con tanto detalle como pueda.

En este capítulo presentamos los principios de análisis de las fuerzas de arrastre y sustentación. Además, presentamos datos de coeficientes de arrastre para muchas formas.

Conceptos introductorios

Un cuerpo en movimiento inmerso en un fluido experimenta fuerzas ocasionadas por la acción del fluido. El efecto total de estas fuerzas es muy complejo. Sin embargo, para propósitos de diseño o estudio del comportamiento de un cuerpo en un fluido, son dos las fuerzas resultantes de mayor importancia: el arrastre y la sustentación. Las fuerzas de arrastre y sustentación son iguales, sin que importe si es el cuerpo el que se mueve en el fluido o el fluido el que se mueve alrededor del cuerpo.

Arrastre es la fuerza sobre un cuerpo ocasionada por el fluido que opone resistencia en la dirección del movimiento del cuerpo. Las aplicaciones más familiares que requieren el estudio del arrastre se dan en el campo del transporte. 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. Como la generación de una fuerza de propulsión requiere que se agregue energía, es deseable minimizar el arrastre.

Sustentación es una fuerza ocasionada por el fluido en dirección perpendicular a la dirección del movimiento del cuerpo. Su aplicación más importante está en el diseño y análisis de alas de aeronaves llamadas *aeroplanos*. La geometría de un aeroplano es tal que se produce una fuerza de sustentación cuando el aire pasa sobre y bajo él. Por supuesto, la magnitud de la sustentación debe ser al menos igual al peso de la aeronave para que vuele.

* En inglés, *airfoil*. En el contexto de la aerodinámica se refiere a una superficie de sustentación, como un ala, y no al avión como un todo. *Airfoil* también significa *papalote*. N. del T.

La disciplina que estudia el rendimiento de los cuerpos en corrientes de aire en movimiento es la *aerodinámica*. Además del aire, otros gases podrían considerarse en este campo, pero debido a la importancia obvia de las aplicaciones en el diseño de aeronaves, la mayor parte del trabajo se ha realizado con el aire como fluido.

La *hidrodinámica* es el nombre que se da al estudio de los cuerpos que se mueven sumergidos en líquidos, en particular en agua. Muchos conceptos que conciernen a la sustentación y el arrastre son similares, sin que importe que el fluido sea un líquido o un gas. Sin embargo, a velocidades altas esto no es cierto, pues en este caso deben tenerse en cuenta los efectos de la compresibilidad del fluido. En el estudio del arrastre y la sustentación, los líquidos son considerados incompresibles.

¿Qué ejemplos de productos o equipos encontró, donde las fuerzas de arrastre o sustentación tienen un efecto sobre su comportamiento o rendimiento? Considere las preguntas y observaciones siguientes cuando los describa:

- ¿Los bordes son afilados o suaves y bien redondeados?
- ¿La forma es plana o tiene superficie redondeada?
- ¿Si el objeto tiene forma de tasa, el lado abierto da hacia al viento (u otro fluido) o no?
- ¿Qué intentos se han hecho para darle forma aerodinámica?
- Encuentre dos automóviles que tengan forma muy distinta, uno muy aerodinámico y el otro con aspecto de caja. Quizás este último sea un modelo viejo, incluso antiguo. ¿Cómo cree que afecte la forma el arrastre?
- Describa la forma de los trenes rápidos, como el *Acela* de Estados Unidos, el *TGV* de Francia o el tren bala de Japón. ¿Qué enfoques se utilizaron para disminuir el arrastre? ¿Cómo se comparan sus formas con las locomotoras de carga convencionales? En Internet u otra fuente de información, encuentre datos de las características de arrastre de los trenes rápidos.
- Compare automóviles de carrera de épocas distintas. Considere automóviles tipo Indy, deportivos y reforzados para colisiones. ¿En qué son similares en cuanto al enfoque para reducir el arrastre? ¿En qué difieren?
- Compare aeronaves de épocas diferentes. ¿Qué intentos se hicieron en los primeros días del vuelo, de los hermanos Wright a la década de 1930, para disminuir el arrastre? ¿Cómo cambió la aviación militar entre el estallido de la segunda guerra mundial y la guerra de Corea, y otros conflictos más recientes? ¿En qué difieren las aeronaves de propulsión a chorro con las de hélice, en relación con su aerodinámica?

Gran parte de los datos prácticos que conciernen a la sustentación y el arrastre han sido obtenidos en forma experimental. En este capítulo serán mencionados para ilustrar los conceptos. Las referencias que se citan al final del capítulo incluyen tratamientos exhaustivos del tema.

17.2 OBJETIVOS

Al terminar este capítulo podrá:

1. Definir *arrastre*.
2. Definir *sustentación*.
3. Escribir la expresión para calcular la fuerza de arrastre sobre un cuerpo que se mueve respecto de un fluido.
4. Definir el *coeficiente de arrastre*.
5. Definir el término *presión dinámica*.
6. Describir el punto de estancamiento de un cuerpo que se mueve respecto de un fluido.
7. Diferenciar entre *arrastre de presión* y *arrastre de fricción*.
8. Analizar la importancia de la separación del flujo sobre el arrastre de presión.
9. Determinar el valor del coeficiente de arrastre por presión para cilindros, esferas y otras formas geométricas.
10. Analizar el efecto del número de Reynolds y la geometría de la superficie sobre el coeficiente de arrastre.

11. Calcular la magnitud de la fuerza de arrastre de presión sobre cuerpos que se mueven respecto de un fluido.
12. Calcular la magnitud de la fuerza de arrastre de fricción sobre esferas suaves.
13. Analizar la importancia del arrastre en el rendimiento de vehículos terrestres.
14. Analizar los efectos de la compresibilidad y la cavitación sobre el arrastre y el rendimiento de los cuerpos inmersos en fluidos.
15. Definir el coeficiente de sustentación para un cuerpo inmerso en un fluido.
16. Calcular la fuerza de sustentación sobre un cuerpo que se mueve con relación a un fluido.
17. Describir los efectos del arrastre de fricción, arrastre de presión y arrastre inducido sobre los aeroplanos.

17.3 ECUACIÓN DE LA FUERZA DE ARRASTRE



FUERZA DE ARRASTRE

Por lo general, se expresan las fuerzas de arrastre en la forma

$$F_D = \text{arrastre} = C_D(\rho v^2/2)A \quad (17-1)$$

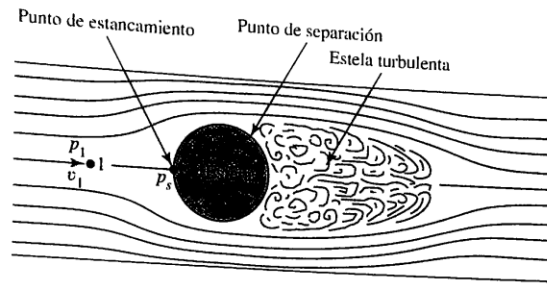
Los términos en esta ecuación son los siguientes:

- C_D es el *coeficiente de arrastre*. Se trata de un número adimensional que depende de la forma del cuerpo y su orientación con respecto a la corriente de fluido.
- ρ es la densidad del fluido. Debido a que la densidad de los líquidos es bastante mayor que la de un gas, el orden general de magnitud de las fuerzas de arrastre sobre objetos que se mueven en el agua es mucho más grande que para los objetos que se mueven en el aire. La compresibilidad del aire afecta un poco su densidad.
- v es la velocidad de la corriente libre del fluido en relación con el cuerpo. En general, no importa si el que se mueve es el cuerpo o el fluido. Sin embargo, la ubicación de otras superficies cerca del cuerpo de interés afecta el arrastre. Por ejemplo, cuando un camión o un automóvil viajan en una carretera, la interacción del lado de abajo del vehículo con la superficie del camino afecta el arrastre.
- A es algún área característica del cuerpo. Hay que tener el cuidado de observar en las secciones posteriores cuál es el área que se utilizará en una situación dada. Lo más frecuente es que el área de interés sea la superficie transversal máxima del cuerpo, que suele recibir el nombre de *área proyectada*. Piense cuál sería la forma bidimensional más grande si mirara de frente su automóvil. Ésa sería el área que se emplearía para calcular el arrastre sobre el coche, y se le denomina *arrastre de forma* o *arrastre de presión*. No obstante, para formas muy alargadas y suaves, como las formas de los vagones de los trenes de pasajeros o de un dirigible, puede utilizarse el área de la superficie. En este caso se estudia el *arrastre de fricción* cuando el aire fluye a lo largo de la superficie del vehículo.
- El término combinado $\rho v^2/2$ es la *presión dinámica*, definida a continuación. Observe que la fuerza de arrastre es proporcional a la presión dinámica y, por tanto, es proporcional al *cuadrado* de la velocidad. Esto significa, por ejemplo, que si se duplica la velocidad de un objeto dado, la fuerza de arrastre se incrementará en un factor de cuatro.

Para que visualice la influencia de la presión dinámica sobre el arrastre, observe la figura 17.1, donde se muestra una esfera en una corriente de fluido. Las líneas de corriente ilustran la trayectoria del fluido conforme éste se aproxima y fluye alrededor de la esfera. En el punto s de la superficie de la esfera, la corriente de fluido está en reposo o estancada. El término *punto de estancamiento* se emplea para denotar dicho punto. La relación entre la presión p_s y la presión de la corriente no perturbada del punto 1, se encuentra por medio de la ecuación de Bernoulli a lo largo de la línea de corriente:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_s}{\gamma} \quad (17-2)$$

FIGURA 17.1 Esfera en una corriente de fluido que muestra el punto de estancamiento sobre el frente de la superficie y la estela turbulenta detrás.



Al resolver para p_s , obtenemos

$$p_s = p_1 + \gamma v_1^2 / 2g$$

Debido a que $\rho = \gamma/g$, tenemos

$$p_s = p_1 + \rho v_1^2 / 2 \quad (17-3)$$

La presión de estancamiento es mayor que la presión estática en la corriente libre por la magnitud de la presión dinámica $\rho v_1^2 / 2$. La energía cinética de la corriente en movimiento se transforma en una clase de energía potencial en forma de presión.

Es de esperar que el incremento de presión en el punto de estancamiento produzca una fuerza sobre el cuerpo, opuesta a su movimiento, es decir, una fuerza de arrastre. Sin embargo, la magnitud de la fuerza depende no sólo de la presión de estancamiento, sino también de la presión en el lado trasero del cuerpo. Debido a la dificultad de predecir la variación real de la presión en el lado de atrás, es común que se utilice el coeficiente de arrastre.

El arrastre total sobre un cuerpo se debe a dos componentes. (Para un cuerpo que se eleva, como un aeroplano, existe un tercer componente, descrito en la sección 17.8.) El *arrastre de presión* (también llamado *arrastre de forma*) se debe a los disturbios de la corriente de flujo conforme pasa el cuerpo, lo que crea una estela turbulenta. Las características de los disturbios dependen de la forma del cuerpo, y a veces del número de Reynolds del flujo y de la rugosidad de la superficie. El *arrastre de fricción* se debe a las fuerzas cortantes en la capa delgada de fluido que se encuentra cerca de la superficie del cuerpo, la cual recibe el nombre de *capa límite*. En las secciones siguientes se describen estos dos tipos de arrastre.

17.4 ARRASTRE DE PRESIÓN

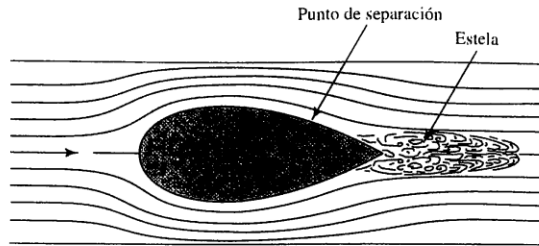
Cuando una corriente de fluido se mueve alrededor de un cuerpo, tiende a adherirse a la superficie en la porción de la longitud del cuerpo. Después de cierto punto, la capa límite delgada se separa de la superficie, lo que hace que se forme una estela turbulenta (vea la figura 17.1). La presión en la estela es mucho más baja que la presión en el punto de estancamiento en el frente del cuerpo. Así, se crea una fuerza neta que actúa en dirección opuesta a la del movimiento. Esta fuerza es el arrastre de presión.

Si puede hacerse que el punto de separación ocurra en un sitio lejano de la parte posterior del cuerpo, el tamaño de la estela disminuye y el arrastre de presión será menor. Éste es el razonamiento que se sigue para dar formas aerodinámicas. La figura 17.2 ilustra el cambio en la estela que ocasiona la elongación y aguzamiento de la cola del cuerpo. Así, la cantidad del arrastre de presión depende de la forma del cuerpo, y con frecuencia se emplea el término *arrastre de forma*.

La fuerza del arrastre de presión se calcula por medio de la ecuación (17-1), donde A se toma como la máxima área de sección transversal del cuerpo, perpendicular al flujo. El coeficiente C_D es el coeficiente de arrastre de presión.

Como ilustración de la importancia de las formas aerodinámicas, se dirá que el valor de C_D para el arrastre sobre una esfera suave que se mueve por el aire con número de Reynolds aproximado de 10^5 , es de 0.5. En cambio, una forma muy aerodinámica

FIGURA 17.2 Efecto de una forma aerodinámica sobre la estela.



ca como la que se emplea en la mayor parte de las aeronaves (dirigibles) tiene un C_D aproximado de 0.04 ¡una reducción en un factor de 10!

17.4.1 Propiedades del aire

Es frecuente que la meta del estudio del arrastre sea el arrastre que tienen los cuerpos que se mueven a través del aire. Para utilizar la ecuación (17-1) con objeto de calcular las fuerzas de arrastre, se necesita conocer la densidad del aire. Igual que sucede con todos los gases, las propiedades del aire cambian en forma drástica con la temperatura. Además, conforme aumenta la altitud sobre el nivel del mar, la densidad disminuye. En el apéndice E se presentan las propiedades del aire a varias temperaturas y altitudes.

17.5 COEFICIENTE DE ARRASTRE

La magnitud del coeficiente de arrastre para el arrastre de presión depende de muchos factores, sobre todo de la forma del cuerpo, el número de Reynolds del flujo, la rugosidad de la superficie y la influencia de otros cuerpos o superficies en las cercanías. En primer lugar, estudiaremos dos de las formas más sencillas: la esfera y el cilindro.

17.5.1 Coeficiente de arrastre de esferas y cilindros

Los datos graficados en la figura 17.3 proporcionan el valor del coeficiente de arrastre *versus* el número de Reynolds, para esferas y cilindros lisos. Para dichas formas, el número de Reynolds se calcula con la relación cuya aspecto resulta conocida

$$N_R = \frac{\rho v D}{\eta} = \frac{v D}{\nu} \quad (17-4)$$

Sin embargo, el diámetro D es el del cuerpo en sí, en lugar del diámetro de un conducto de flujo, que en las secciones anteriores se denotaba con D .

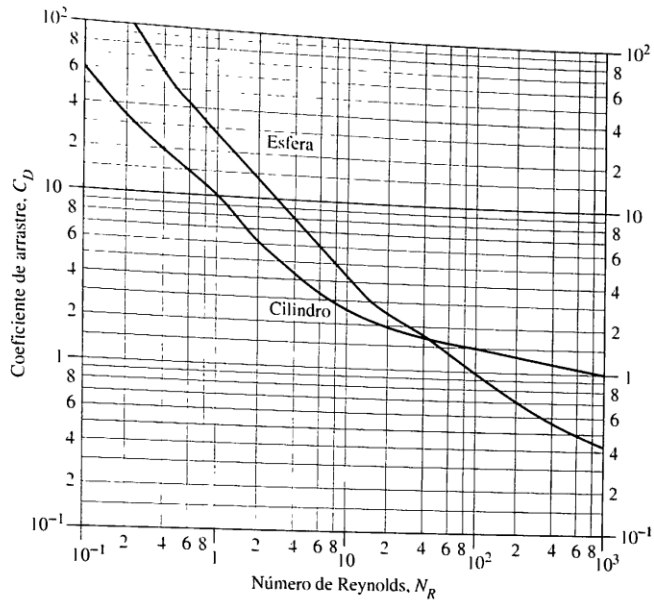
Observe los valores muy altos de C_D para números de Reynolds bajos, de más de 100 para una esfera lisa con $N_R = 0.10$. Esto corresponde al movimiento a través de un fluido muy viscoso. Cae con rapidez a un valor de 4.0 para $N_R = 10$, y después a 1.0 para $N_R = 100$. El valor de C_D varía de 0.38 a 0.46, aproximadamente, para los números de Reynolds más elevados de 1000 a 10^5 .

Para cilindros, $C_D \approx 60$ para número de Reynolds muy bajo de 0.10. Disminuye a un valor de 10 para $N_R = 1.0$ y a un valor de 1.0 para $N_R = 1000$. En los rangos superiores de números de Reynolds, C_D varía de 0.90 a 1.30, aproximadamente, para N_R de 1000 a 10^5 .

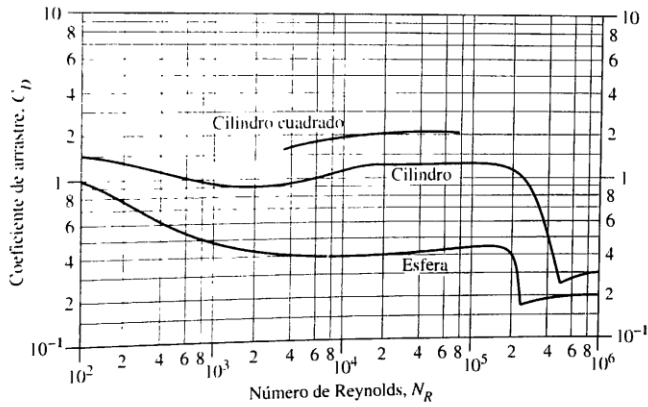
Para números de Reynolds muy pequeños ($N_R < 1.0$, aproximadamente), el arrastre se debe casi por completo a la fricción, y se estudiará más adelante. En números de Reynolds altos, la importancia de la separación del flujo y la estela turbulenta tras el cuerpo hace que predomine el arrastre de presión. El análisis siguiente se relaciona sólo con el arrastre de presión.

Con un valor de número de Reynolds de alrededor de 2×10^5 , el coeficiente de arrastre de las esferas cae en forma abrupta de 0.42 a 0.17, aproximadamente. Esto lo ocasiona el cambio súbito de régimen de la capa límite, de laminar a turbulento. Además, el punto sobre la esfera en el que ocurre la separación retrocede, lo que disminuye el tamaño de la estela. Para cilindros, sucede un fenómeno similar en $N_R = 4 \times 10^5$, aproximadamente, donde C_D cambia de 1.2 a 0.30, aproximadamente.

FIGURA 17.3 Coeficientes de arrastre de esferas y cilindros.



(a) C_D versus N_R para valores bajos de N_R



(b) C_D versus N_R para valores elevados de N_R

Es posible disminuir el número de Reynolds en que ocurre la transición de la capa límite, de laminar a turbulenta, ya sea con una superficie más rugosa o con el aumento de la turbulencia de la corriente, como se ilustra en la figura 17.4. Esta gráfica sólo trata de mostrar las formas comunes de la curva, y no debe emplearse para obtener valores numéricos.

Las pelotas de golf tienen facetas, para optimizar la turbulencia del aire cuando éste fluye a su alrededor, y ocasionar que ocurra un descenso abrupto del coeficiente de arrastre a velocidad baja (número de Reynolds bajo), lo que redonda en vuelos más largos. Una pelota perfectamente lisa sólo podría lanzarse alrededor de 100 yardas, incluso por los golfistas mejores, mientras que el diseño con facetas, que es familiar, permite que el jugador promedio rebasa esta distancia. Los profesionales lanzan tiros de 300 yardas (consulte los sitios 2 a 4 de Internet).

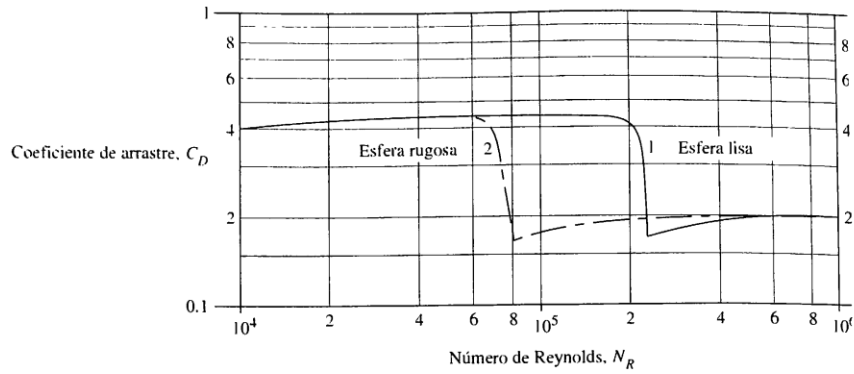


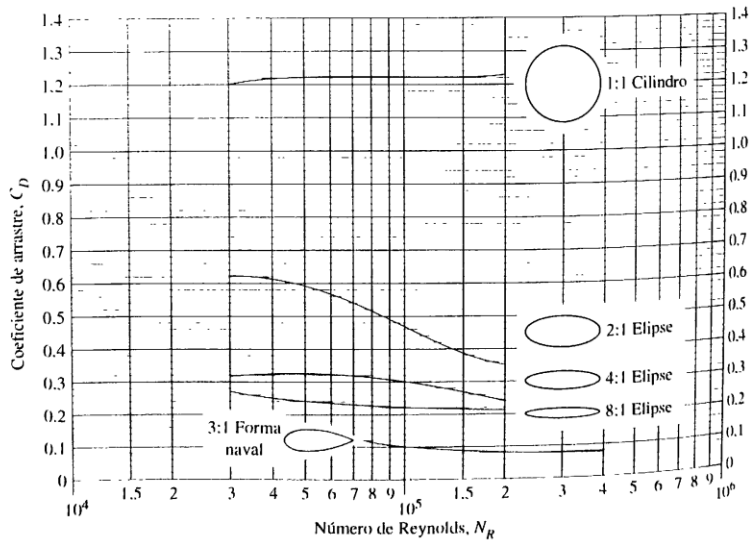
FIGURA 17.4 Efecto de la turbulencia y la rugosidad sobre el C_D de las esferas.

17.5.2
Coefficientes de arrastre para otras formas

Un cilindro cuadrado tiene una sección transversal cuadrada uniforme, y es relativamente largo en relación con su altura. En la figura 17.3 se muestra el coeficiente de arrastre para un cilindro cuadrado con un lado plano perpendicular al flujo, para números de Reynolds de 3.5×10^3 a 8×10^4 . Los valores varían de 1.60 a 2.05, aproximadamente, algo más altos que para el cilindro circular. Se obtienen reducciones significativas con el uso de radios de esquina pequeños o moderados, lo que disminuye los valores de C_D a algo tan bajo como 0.55, con números de Reynolds altos. Sin embargo, para tales diseños, los valores tienden a ser bastante afectados por cambios en los números de Reynolds. Se recomienda hacer pruebas.

En la figura 17.5 se proporcionan datos del C_D para tres versiones de cilindros elípticos, con números de Reynolds de 3.0×10^4 a 2×10^5 . Estas formas tienen por

FIGURA 17.5 Coeficientes de arrastre para cilindros elípticos y puntiagudos.



Ingeniería de Vehículos

Sistemas y Cálculos

2a. Edición

Manuel Cascajosa



Scanned by CamScanner

Capítulo I: Estudio de la dinámica de un vehículo

Resistencias que se oponen al avance de un vehículo

La definición del conjunto motriz de un vehículo, para cumplir con unas exigencias determinadas (prestaciones), requiere el cálculo previo de las resistencias posibles que se le van a oponer en su avance en cualquier situación.

Las resistencias son cuatro, que pueden o no coexistir al mismo tiempo.

Resistencia por rodadura	R_r
Resistencia por pendiente	R_p
Resistencia por inercia	R_j
Resistencia por el aire	R_a

La suma de las resistencias, simultáneas, ha de ser vencida por una fuerza F , de empuje, en el eje motriz. Esta fuerza es consecuencia del par aplicado al eje, originado por el par motor M , después de ser sustituido por otro par equivalente $F \cdot r$.

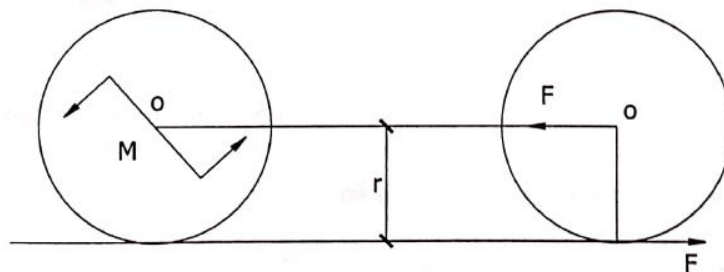


Figura 1.1

La fuerza F del par, aplicada en el punto de contacto rueda-suelo, permite impulsar al vehículo hacia delante.

Potencia en rueda, cuando la velocidad es V :

$$W_r = F \cdot V$$

Es inferior a la que en ese momento da el motor, W_m , debido a las pérdidas por rozamientos e inercias en la transmisión, W_{tr} , por lo que:

$$W_r = W_m - W_{tr}$$

Resistencia por rodadura, R_r

Tiene su origen en la deformación del neumático y suelo.

Cuando la rueda está estática, la reacción del suelo al peso está en la misma vertical que éste, sin embargo, cuando rueda, dicha reacción avanza una distancia « d » (extremo de la huella), dando lugar a un momento resistente, que ha de ser equilibrado. Por tanto, parte del valor de la fuerza F_r en la figura F_r , vence a la resistencia por rodadura.

La resistencia por rodadura es independiente de que la rueda sea portadora (sólo soporta peso) o motriz (soporta peso y transmite par motor).

a) Portadora

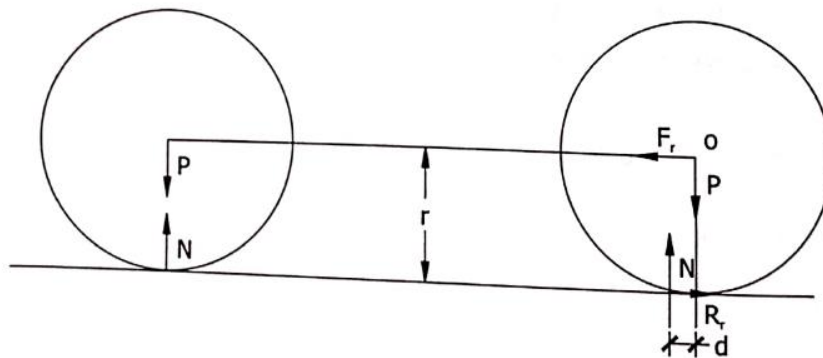


Figura 1.2

Para que el sistema de fuerzas (F_r , P , R_r y N) esté en equilibrio, la resultante de N y R_r , ha de ser igual y opuesta a la correspondiente de F_r y P .

Tomando momentos respecto al centro «o»:

$$N \cdot d = R_r \cdot r; \quad R_r = N \cdot \frac{d}{r} = P \cdot \frac{d}{r}$$

Los valores de r (radio del neumático bajo carga) y « d », son fijados por el fabricante del neumático para una carga P y presión determinada.

Si las condiciones anteriores son adversas, la resistencia a la rodadura puede aumentar, con el consiguiente mayor consumo para una misma prestación.

Aunque la resistencia por rodadura se considera constante e independiente de la velocidad, esto no es estrictamente cierto.

b) Portadora y motriz

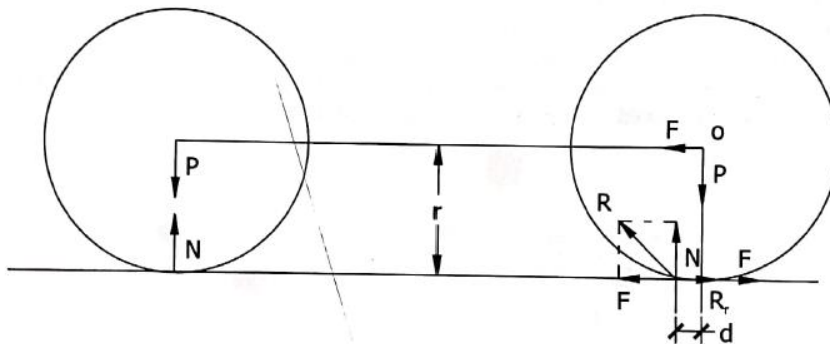


Figura 1.3

Al igual que en la rueda sólo portadora, el punto de aplicación de la resistencia por rodadura, está desplazado « d » en el sentido de la marcha.

En el sistema, además de las fuerzas verticales P y N , se tienen las siguientes:

En el eje. F

En el supuesto de que exista simultaneidad de todas las resistencias posibles,
 $F = R_r + R_a + R_p + R_j$

En el suelo. F , su reacción $-F$, y R_r , ésta vencida por parte de la F aplicada en el eje.

Tomando momento respecto al centro de la rueda « o ».

$$(F - R_r)r + N \cdot d = F \cdot r \quad \text{y como} \quad N = P$$

$$R_r = \frac{d}{r}P$$

Igual que en las ruedas portadoras.

A $\frac{d}{r}$ se le llama coeficiente de resistencia a la rodadura y se le suele indicar por f .

$$f = \frac{d}{r} = \operatorname{tg}\varphi$$

La resultante R (reacción del suelo), de N y F, tiene un valor variable según el de sus componentes.

La reacción del suelo es hacia adelante, y en rueda sólo portante, hacia atrás. (véase capítulo 3, *Adherencia*).

Como se ha dicho, el valor de f no es constante ni independiente de la velocidad, pues influye ésta, la temperatura, estado del suelo, tipo de neumático (radial, etc.), radio del mismo y presión de inflado, pudiéndose de forma empírica obtener f en función de aquellos. Valores típicos de este coeficiente aparecen en la tabla, aunque como valor de cálculo se suele tomar 15 kg por tonelada de forma general. Para ciertos firmes de asfalto y neumáticos, los valores pueden llegar a ser inferiores incluso a los 12 kg/t señalados en la tabla.

$$R_r (\text{kg}) = 15 P (\text{t})$$

Tipo de suelo	Coefficiente de rodadura kg/t
Asfalto	12/17
Hormigón	15
Adoquinado	55
Tierra compacta	50
Tierra suelta	100

La resistencia por rodadura es mayor que la debida al aire hasta una cierta velocidad, siendo a partir de ésta siempre menor. En vehículos industriales, esa frontera está alrededor de los 80 km/h.

Cuando el vehículo gira, el coeficiente f se incrementa por la influencia de: radio de giro, tipo de eje y coeficiente de fricción lateral. Esto no influye en el cálculo de la resistencia.

Resistencia por pendiente, R_p

Es la que se opone al avance del vehículo cuando éste sube una pendiente.

$$R_p = P \cdot \operatorname{sen} \alpha$$

Como los ángulos son pequeños, el seno y la tangente son similares, por lo que $R_p = P \operatorname{tg} \alpha$. De forma habitual, la pendiente se expresa; x metros de subida vertical por cada 100 metros recorridos horizontal:

$$R_p = P \cdot \frac{x}{100}$$

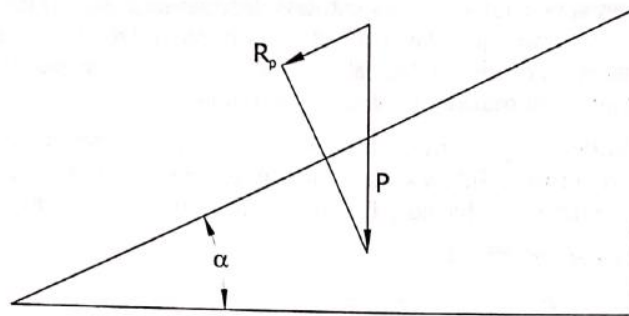


Figura 1.4

Cuando P se expresa en toneladas y R_p en kg:

$$R_p = 1000 \cdot P \cdot \frac{x}{100} \quad R_p = 10 \cdot P \cdot x$$

Resistencia por inercia, R_j

Está originada por un incremento de velocidad.

$$R_j = M \cdot j = \frac{P \cdot j}{g}$$

M es la masa del vehículo y j la aceleración que ha de adquirir, por ejemplo, para adelantar a otro:

$$j = \frac{(V_2 - V_1)}{t}$$

V_1 Velocidad inicial

V_2 Velocidad final

t Tiempo invertido para pasar de V_1 a V_2

Con P en toneladas y tomando para g el valor de 10 m/s^2 en kg

$$R_j = \frac{1000 \cdot P \cdot j}{10} \quad R_j = 100 \cdot P \cdot j \text{ en kg}$$

Resistencia por el aire, R_a

De todas las resistencias, ésta es sin duda la más estudiada, no sólo por su importancia en cuanto al consumo del vehículo, sino por lo relacionada que está con la estética del mismo.

Los vehículos han ido evolucionando, buscando la disminución de la resistencia R_a . Los faros se empotraron en las aletas, evitando su propia resistencia de

forma. Las ruedas se cubrieron. Los estribos desaparecieron. Las formas prismáticas de las carrocerías que dan confort, fueron sustituyéndose por otras más aerodinámicas. En el diseño de las cabinas de los camiones se combina la menor resistencia al aire y el máximo confort en su interior.

Para el cálculo de la R_a se emplean fórmulas empíricas obtenidas con la ayuda de ensayos en túneles. Intervienen: carrocería, presión, temperatura, sección transversal máxima del vehículo y fundamentalmente la velocidad.

El valor de R_a viene dado por:

$$R_a = K \cdot S \cdot V^2 \quad \text{en la cual}$$

$$K = \delta \frac{C}{2g}$$

δ = peso específico del aire en condiciones normales (en kg/m^3)

C = constante

El valor de C puede variar desde 0,15 en turismos, con diseños aerodinámicos óptimos, hasta 1,5 en camiones. Normalmente y según diseño, se sitúa entre 0,25 y 0,7 en turismos y entre 1 y 1,5 en camiones.

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

La superficie maestra S , se obtiene de forma aproximada, multiplicando el ancho por el alto del vehículo, afectado por un coeficiente de 0,8.

$$S = 0,8 \cdot a \cdot h \text{ en m}^2$$

V en m/s

Relativa al aire

R_a en kg.

En camiones, cuando la carrocería sobresale por encima de la cabina, es posible reducir R_a mediante la instalación de un deflector en su techo, consiguiéndose ahorros medios de combustible del orden del 5% al 8%. Los deflectores deben estar homologados por el fabricante del vehículo, quien puede garantizar la reducción de consumo y al mismo tiempo, una instalación correcta, sin que altere la toma de aire del motor (cuando se hace en la parte superior trasera de la cabina), ni afecte al confort por ruidos, ni a la vida de la cabina por posibles vibraciones.

En las características de los vehículos se suele dar los consumos, para velocidades entre 90-100 km/h y 120-130 km/h; la diferencia entre ellos corresponde casi en su totalidad a vencer la resistencia al aire.

Para la estabilidad del vehículo, es importante la situación del centro de empuje a la resistencia al aire, localizado en la mayor parte, delante y por encima del centro de gravedad.

La R_a puede descomponerse en tres fuerzas, siguiendo los ejes geométricos del vehículo; longitudinal, transversal y vertical. Con ello puede estudiarse el empu-

je hacia arriba o abajo, la deriva transversal y la resistencia longitudinal. La componente vertical, se desea que sea casi nula a medida que aumenta la velocidad, sin embargo, en los vehículos deportivos de alta velocidad se juega con ella para aumentar su adherencia.

Cálculo aproximado de K y f

Los coeficientes K (Resistencia al aire) y f (Resistencia por rodadura), pueden determinarse aproximadamente para un vehículo, haciendo dos pruebas, ambas sin la intervención del motor (desembragado), en carretera llana, horizontal y sin viento.

1ª A alta velocidad

Velocidad inicial	V_1
Velocidad final	$V_2 \quad V_2 < V_1$
Tiempo invertido	t

2ª A baja velocidad

Velocidad inicial	V'_1
Velocidad final	$V'_2 \quad V'_2 < V'_1$
Tiempo invertido	t'

$$R_a = K \cdot S \cdot \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right)^2$$

$$R'_a = K \cdot S \cdot \left(\frac{V'_1 + V'_2}{2} \right)^2$$

$$R_r = f \cdot P$$

$$R'_r = f \cdot P$$

$$R_a + R_r = M \cdot j$$

$$R'_a + R'_r = M \cdot j'$$

S sección maestra, M masa del vehículo, j y j' deceleraciones.

Sustituyendo en:

$$R_a + R_r = K \cdot S \cdot \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right)^2 + f \cdot P = M \cdot j$$

Kraftfahrzeuge Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs Lastkraftwagen und Kraftomnibusse		DIN 70 030 Teil 2
Road vehicles; determination of fuel consumption; goods vehicles and buses		Ersatz für Ausgabe 07.78
<p>1 Anwendungsbereich und Zweck</p> <p>Diese Norm gilt für Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs von Lastkraftwagen und Kraftomnibussen nach DIN 70 010. Die nach dem Verfahren ermittelten Verbrauchswerte sind reproduzierbar und ergeben vergleichbare Werte.</p> <p>Je nach Fahrweise, Straßen- und Verkehrsverhältnissen, Umwelteinflüssen und Fahrzeugzustand werden sich in der Praxis Werte für den Kraftstoffverbrauch ergeben, die von den nach dieser Norm ermittelten Werten abweichen.</p> <p>2 Fahrzeug</p> <p>Das Fahrzeug, an dem der Kraftstoffverbrauch ermittelt werden soll, muß in allen Teilen sowie in der Vergaser- und Zündeinrichtung bzw. der Einspritzpumpeneinstellung der serienmäßigen Ausführung entsprechen. Reifenluftdruck und Viskosität der Öle für Motor, Getriebe, Antriebsachsen und Hilfsaggregate müssen den Angaben des Fahrzeugherstellers entsprechen. Der Motor soll eingelaufen sein und bei Beginn der Prüfung die übliche Betriebstemperatur aufweisen.</p> <p>3 Belastung</p> <p>Das Fahrzeug muß bei der Prüfung mit einem Gewicht belastet sein, das der halben Gewichts Differenz zwischen zulässigem Gesamtgewicht und Leergewicht entspricht.</p> <p>4 Prüfstrecke</p> <p>Eine ebene, trockene Fahrbahn (kurze Steigungen und Gefälle von höchstens 1,5 %) von ungefähr 10 km Länge ist hin und zurück zu durchfahren. Hin- und Rückfahrt müssen unmittelbar aufeinander folgen. Die genaue Länge der zurückgelegten Strecke ohne den Auslauf des Fahrzeugs ist anhand der Streckenkennzeichnung zu ermitteln.</p> <p>5 Wetterbedingungen</p> <p>Trockenes windstilles Wetter (höchste Windgeschwindigkeit 3 m/s), Atmosphärendruck 0,991 bis 1,017 bar, Lufttemperatur 10 bis 30 °C.</p>	<p>6 Prüfgeschwindigkeit</p> <p>Die Prüfgeschwindigkeit soll über die gesamte Fahrstrecke möglichst gleichmäßig $\frac{3}{4}$ der nach DIN 70 020 Teil 3 ermittelten Höchstgeschwindigkeit oder der durch Regler begrenzten Geschwindigkeit des Fahrzeugs betragen. Die Höchstgrenze der Prüfgeschwindigkeit ist die nach der StVO höchstzulässige Fahrgeschwindigkeit.</p> <p>7 Kraftstoff</p> <p>Verwendung eines handelsüblichen, in der Betriebsanleitung für das betreffende Fahrzeug vorgeschriebenen Kraftstoffes.</p> <p>8 Kraftstoffverbrauch</p> <p>8.1 Messen des Kraftstoffverbrauches</p> <p>Die für die Zurücklegung der Prüfstrecke verbrauchte Kraftstoffmenge ist genau zu ermitteln. Für die Verbrauchsmessung muß ein umschaltbares Gerät verwendet werden, das gestattet, beim Passieren der Anfangs- und Endmarken auf Messung zu schalten und eine symmetrische Fehlergrenze von 2 % besitzt.</p> <p>8.2 Angabe der Ergebnisse</p> <p>Der sich bei der Prüfung ergebende Verbrauch wird zur Berücksichtigung ungünstiger Umstände im üblichen Straßenverkehr um 10 % erhöht (Faktor 1,1 in der unten angegebenen Gleichung).</p> <p>Für den Kraftstoffverbrauch k gilt folgende Gleichung:</p> $k = 1,1 \frac{K}{s} \cdot 100 \text{ in l je } 100 \text{ km}$ <p>Hierin bedeuten:</p> <p>K verbrauchte Kraftstoffmenge in Liter</p> <p>s Länge der zurückgelegten Wegstrecke in km</p> <p>1,1 als Sicherheitsfaktor zur Berücksichtigung ungünstiger Umstände im üblichen Straßenverkehr.</p> <p>Der so ermittelte Kraftstoffverbrauch k ist bei seiner Angabe nach DIN 1333 Teil 2 zu runden, und zwar auf eine Stelle hinter dem Komma (unter 0,05 nach unten, bei 0,05 und darüber nach oben).</p>	
		Fortsetzung Seite 2
Normenausschuß Kraftfahrzeuge (FAKRA) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.		

Jede Art der Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, gestattet.

8.3 Bezeichnung des Kraftstoffverbrauchs

8.3.1 Angabe des Kraftstoffverbrauchs im Klartext

Kraftstoffverbrauch von 9,7 l je 100 km eines nach den Abschnitten 8.1 und 8.2 mit Prüfgeschwindigkeit 80 km/h gemessenen Kraftfahrzeugs ist wie folgt anzugeben:

**Kraftstoffverbrauch nach DIN 70 030 Teil 2
bei 80 km/h = 9,7 l je 100 km**

8.3.2 Norm-Bezeichnung

Bezeichnung des Kraftstoffverbrauchs nach DIN 70 030 Teil 2 (2) für ein Kraftfahrzeug ermittelt mit 9,7 l je 100 km (9,7) bei einer Prüfgeschwindigkeit von 80 km/h (80):

Verbrauch DIN 70 030 – 2 – 9,7 – 80

Bezieht sich die Verbrauchsangabe auf Dieselmotorkraftstoff nach DIN 51 601, so ist zwischen Sommer-Dieselmotorkraftstoff (SDK) und Winter-Dieselmotorkraftstoff (WDK) zu unterscheiden, z. B.:

Verbrauch DIN 70 030 – 2 – 9,7 – 80 SDK

9 Nachprüfung

Bei Nachprüfung gilt für den Kraftstoffverbrauch k zur Berücksichtigung unvermeidbarer Unterschiede in den Prüfbedingungen eine Abweichung von +5%.

Zitierte Normen und andere Unterlagen

DIN 1333 Teil 2	Zahlenangaben, Runden
DIN 51 601	Flüssige Kraftstoffe; Dieselmotorkraftstoff; Mindestanforderungen
DIN 70 010	Systematik der Straßenfahrzeuge; Begriffe für Kraftfahrzeuge, Züge und Anhängerfahrzeuge
DIN 70 020 Teil 3	Kraftfahrzeugbau; Höchstgeschwindigkeit, Beschleunigung; Verschiedenes, Begriffe, Prüfbedingungen
StVO	Straßen-Verkehrsordnung

Weitere Normen

ISO 7680	Straßenfahrzeuge; Motorräder; Verfahren zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs
DIN 70 030 Teil 1	Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs von Kraftfahrzeugen; Personenkraftwagen

Frühere Ausgaben

DIN Kr 30: 01.39, 12.39
DIN 70 030: 04.52, 08.56, 03.68
DIN 70 030 Teil 2: 07.78

Änderungen

Gegenüber der Ausgabe Juli 1978 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- Hinweis auf Krafträder gestrichen.
- Norm redaktionell überarbeitet.

Erläuterungen

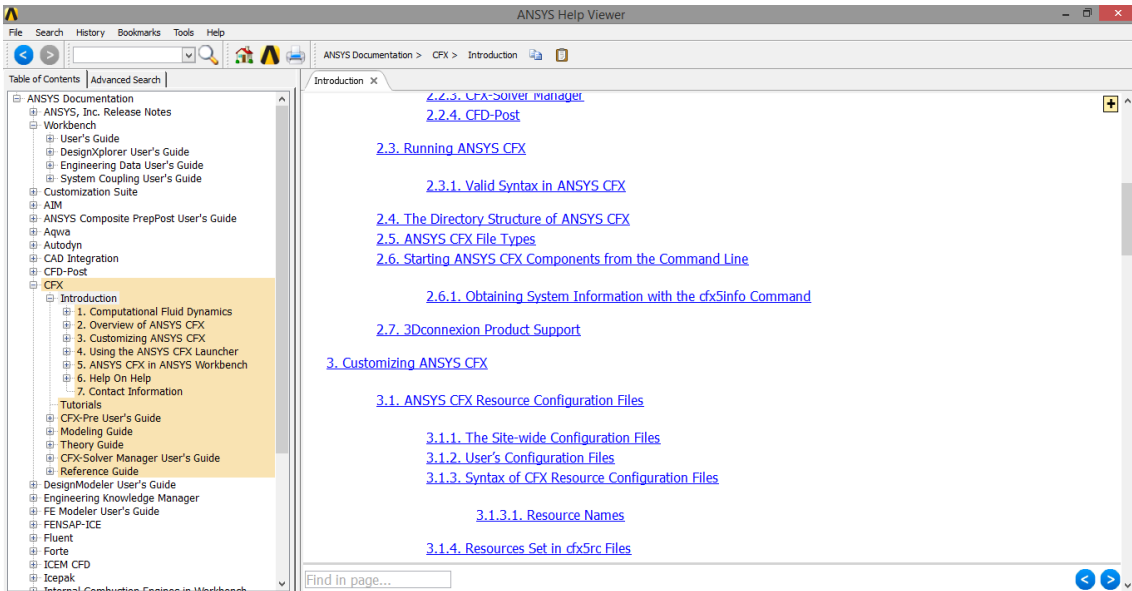
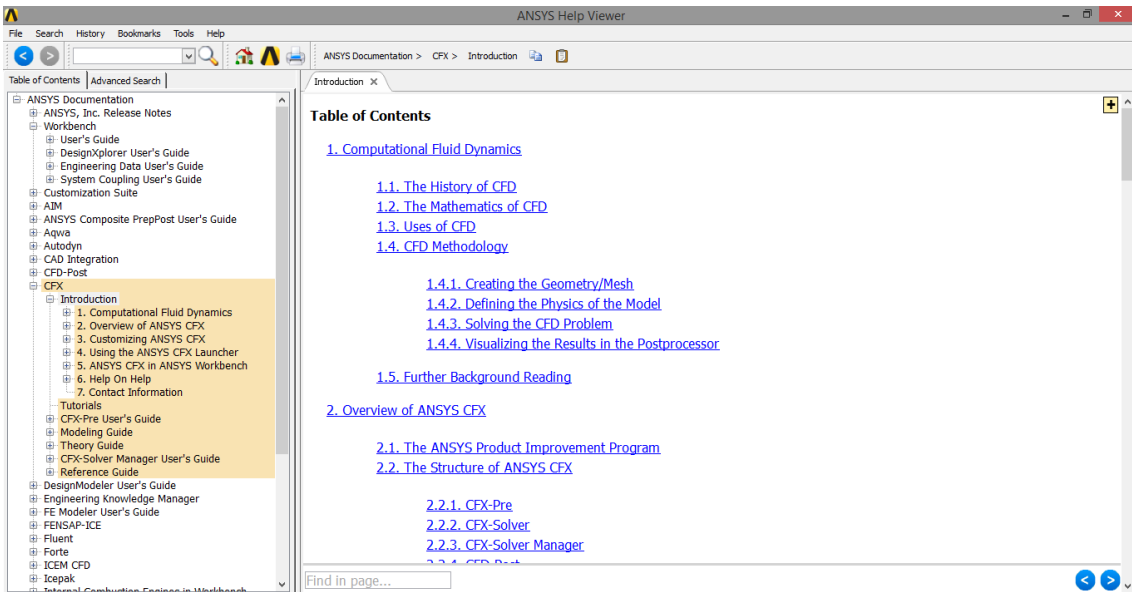
Die Überarbeitung dieser Norm ergab sich aus der Veröffentlichung von ISO 7680 – 1983 „Straßenfahrzeuge; Motorräder; Verfahren zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs“. Um eine Doppelfestlegung innerhalb des DIN-Normenwerks zu vermeiden, wurden alle Hinweise auf Krafträder in DIN 70 030 Teil 2 gestrichen, weil beabsichtigt ist, ISO 7680 – 1983 in das nationale Normenwerk zu übernehmen.

Zu den nach dieser Norm ermittelten Werten für den Kraftstoffverbrauch wird darauf hingewiesen, daß nach den Erfahrungen der Nutzfahrzeughersteller die repräsentativen Angaben in hohem Maße von den Rüstzuständen und Einsatzbedingungen der einzelnen Fahrzeuge abhängen. Bei diesen Fahrzeugen mit einer besonderen Betriebsgeschwindigkeit – z. B. Kehrfahrzeuge – ist es gegebenenfalls empfehlenswert, eine andere Prüfgeschwindigkeit zu vereinbaren.

Internationale Patentklassifikation

G 01 F 9/00

ANEXO 8. CFX – Help support





Cálculo de la densidad del aire utilizando la formula del CIPM-2007¹

Registre los datos que se solicitan

Calcular con:

Humedad Relativa

Temperatura de Punto de Rocio

Magnitud

Valor

Incertidumbre ($k = 1$)

Temperatura, t :

°C

°C

Presión, p :

Pa

Pa

Humedad Relativa, h :

%

%

Realizar Cálculo

Resultado

Densidad del aire:

kg/m³

Incertidumbre ($k = 1$):

kg/m³

Nota:

* Este cálculo de la densidad del aire considera una fracción molar de dióxido de carbono en el aire igual a 400 mmol mol⁻¹.

* Los límites recomendados para la ecuación del CIPM-2007 son:

$$600 \text{ hPa} \leq p \leq 1100 \text{ hPa}$$

$$15 \text{ °C} \leq t \leq 27 \text{ °C}$$

$$0 \% \leq h \leq 100 \%$$

Referencias:

¹. A. Picard, R S Davis, M Gläser and K. Fujii, "Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007)", Metrologia 45 (2008), 149-155.

ANEXO 10. Evaluación del consumo de combustible de un camión con la implementación de un deflector de aire



Figura 2.10. Deflector de aire para un Hino 500.

(Fuente: Propia)

Las características se muestran en la tabla 2.6

Tabla 2.8. Características del deflector de aire.

Material de fabricación	Fibra de vidrio
Costo (dólares)	600
Tipo de anclaje	Pernos
N° de anclajes	4
Dimensiones (m)	1,70 x 2 x 1,5
Peso (kg)	35
Base con guías para acople	

(Fuente: Propia)

2.7. Protocolo de prueba

En base a la revisión de normas referente al consumo de combustible en carretera de vehículos pesados, se elaboró el siguiente procedimiento:

1. Recorrer previamente la ruta seleccionada en un vehículo liviano el día planificado para las pruebas, en busca de algún tipo de inconveniente como trabajos en la vía, controles por parte de la policía, presencia de calzada mojada en cualquier punto del recorrido, restricción vehicular, etc. Adicional a esto se debe colocar la respectiva señalización que indique los puntos A, B, C, D, como se muestra en la figura 2.11

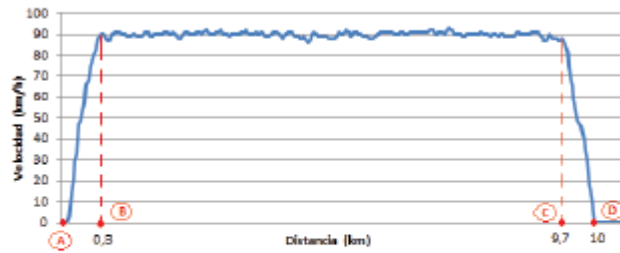


Figura 2.11. Puntos de referencia.

(Fuente: Propia)

2. Verificar el funcionamiento del equipo de medición, registrar los datos de la velocidad del viento, temperatura del aire, presión atmosférica y altitud, en el formulario F1 que se indica en el anexo 1, se debe procurar tener una superficie nivelada en los puntos donde se detiene el vehículo, para colocar la balanza digital y posterior pesaje del tanque portátil de combustible.
3. Inspeccionar el estado del vehículo, chequeo de niveles (aceite, refrigerante, dirección, embrague), presión de neumáticos, fugas del motor o sistemas auxiliares, estado del labrado de los neumáticos, luces, carga eléctrica, etc. Antes de iniciar con las pruebas, el motor debe alcanzar la temperatura normal de funcionamiento, durante las pruebas se tiene que llevar las ventanas de la cabina cerradas.
4. El conductor debe conocer la forma de conducción, de modo que refleje el mismo estilo de conducción para cada una de las pruebas.
5. Instalar el tanque portátil de combustible, asegurándose que las conexiones de alimentación y retorno estén sujetas, evitando la presencia de fugas en sus alrededores como se indica en la figura 2.12, a fin de tener una fácil manipulación para la medición de la masa de combustible, luego de esto se debe purgar el sistema de inyección de combustible para extraer las burbujas de aire que ingresaron durante la instalación de este tanque.



Figura 2.12. Tanque portátil de combustible.

(Fuente: Propia)

6. Tomando como referencia el punto de partida A, se debe pesar el tanque portátil de combustible y registrar su masa (m_p) en el formulario F1 que se indica en el anexo II pág. II, luego de lo cual el vehículo avanza sin forzar el motor hasta alcanzar los 90 km/h hasta el punto B y mantenerlo con esa velocidad hasta el punto C, luego de lo cual se reduce la velocidad progresivamente hasta detenerse en el punto de llegada D como se muestra en la figura 2.11, en este punto se pesa el tanque y se registra su masa (m_f). El consumo de combustible (C) se da por la diferencia de masas al inicio y final de cada prueba.
7. Se realiza 4 repeticiones como mínimo, según estos datos se obtiene un valor repetibilidad (R), si este valor es mayor a 5% se realiza una prueba adicional, se puede realizar 10 repeticiones como máximo, caso contrario se debe cambiar el vehículo de prueba, por uno de similares características.

Para el desarrollo de las pruebas se tiene que considerar medidas de seguridad:

- Estacionar el camión en la carretera, de manera de tener un espacio adecuado para la extracción y manipulación del tanque, colocación de la balanza y medición.
- Colocar triángulos o conos de seguridad en la vía, a una distancia prudencial del camión (a 50 m y deben ser visible a 100 m) a fin de alertar a los demás conductores y tomen las debidas precauciones.
- Utilizar recipientes adecuados al momento de purgar el sistema de inyección de combustible con el tanque portátil instalado, evitando que se derrame en la calzada de la carretera.
- Tomar las debidas precauciones al momento de girar el camión en el punto de partida y llegada para repetir las pruebas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados de la prueba en ruta

Los resultados del consumo de combustible del camión en carretera con y sin deflector de aire, se muestra el formulario F1 que se encuentra en el Anexo II pág. II, estos valores se muestran en la tabla 3.1

Tabla 3.1. Resultados de la prueba en ruta.

Registro de datos del consumo de combustible en ruta				
Lugar: Santo Domingo (vía Quininde - la Concordia)		Fecha: 03/05/2017		
Distancia de prueba: 10 km		Velocidad de prueba: 90 km/h		
Punto partida: Empresa EPACEM S.A.		Altura (m.s.n.m): 516		
Punto llegada: Entrada a la cantera		Altura (m.s.n.m): 381		
Datos del vehículo de prueba				
Marca: Hino		Nº Cilindros: 6		
Modelo: G08JL8A 7.7 2P 4X2 TM DIESEL CN		Posición: Línea		
Chasis: 9F36G08JL8EXX13712		Potencia máx.: 191 kW@2500 rpm		
Año: 2014		Torque máx.: 745 Nm@2500 rpm		
Transmisión (M/A): Manual/ 6 cambios + retro		Cilindrada: 7684 cc		
Kilometraje: 340187		Combustible: Diesel premium		
Neumáticos: 225/70 R 22.5/14 lonas		Emisiones: EURO III		
Condición atmosférica				
Velocidad del viento: 1,5 m/s		Presión atmosférica: 950,1 hPa		
Temperatura del aire: 29,3 °C		Presencia de lluvia: NO		
Mediciones registradas				
Camión con deflector de aire				
Nº Prueba	Hora Inicio	m_0 (kg)	m_f (kg)	C (kg)
1	10:38:00	8,15	6,80	1,35
2	11:11:00	8,65	7,35	1,30
3	11:38:00	8,35	7,10	1,25
4	12:05:00	8,80	7,55	1,25
Camión estándar				
Nº Prueba	Hora Inicio	m_0 (kg)	m_f (kg)	C (kg)
1	13:23:00	9,25	7,85	1,40
2	13:51:00	8,20	6,85	1,35
3	14:18:00	8,50	7,15	1,35
4	14:46:00	7,80	6,50	1,30
m_0 : masa del taque portátil de combustible al inicio de la prueba m_f : masa del taque portátil de combustible al final de la prueba C: consumo de combustible ($C = m_0 - m_f$)				

(Fuente: Propia)

ANEXO 11. Impacto de la aerodinámica para el ahorro del combustible



Eficiencia Energética en el Transporte de Carga: Impacto de la Aerodinámica para el Ahorro de Combustible

+ Protocolo de Ensayo / Norma SAE J-1321



Iniciativa desarrollada en el marco de los proyectos I+D+i del "Concurso Universidades", realizado por la Agencia Chilena de Eficiencia Energética (AChEE) y cuyo beneficiario es la Universidad Andrés Bello (UNAB), patrocinada por el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (MTT) y TNT-LIT Cargo.

Sus objetivos fueron:

1. Establecer y validar en Chile metodológica y económicamente la aplicación de la norma norteamericana SAE J1321 "Joint TMC/SAE Fuel Consumption Test Procedure".
2. Aplicar la norma SAE J1321 para obtener el ahorro efectivo de distintos kits de dispositivos aerodinámicos en vehículos de transporte de carga por carretera en Chile.
3. Convertir la norma SAE J1321 en una norma chilena (NCh)

Lo anterior, permitirá mejorar la información sobre el impacto en eficiencia energética de distintas tecnologías y componentes en la industria del transporte de carga por carretera, entregando nuevas

herramientas que apoyen la toma de decisiones al momento de realizar nuevas inversiones.

EL CONCEPTO

Cuando un vehículo avanza, debe ir desplazando el aire que tiene delante y llenando el vacío que va dejando atrás. La resistencia aerodinámica depende del coeficiente aerodinámico "Cx", de la densidad del aire, del área frontal del vehículo "A" (destacada en rojo en la figura) y de la velocidad elevada al cuadrado "V".

Así, duplicar la velocidad, equivale a multiplicar por 8 la potencia necesaria para vencer la resistencia aerodinámica.

$$R = \frac{1}{2} C_x \rho A V^2$$



TENDENCIA MUNDIAL

La aerodinámica proporciona un gran potencial para reducir el consumo de combustible y consecuentemente las emisiones de CO2 en camiones y autobuses, ya que prácticamente el 40% del consumo total de energía necesaria para mantener un camión de 40 toneladas a una velocidad de 85 km/h en una carretera plana, se relaciona a la resistencia aerodinámica.

Sin embargo, las restricciones asociadas a longitud y altura máxima establecidas en los distintos países para la circulación de los vehículos de carga, han limitado a los fabricantes a alcanzar el potencial real de optimización aerodinámica de los camiones.

Así, en la medida que las restricciones se relajen, las reducciones en consumo de combustible por mejoras aerodinámicas irán en aumento.



La norma SAE J-1321

Esta norma, creada por la Society of Automotive Engineers, define un riguroso procedimiento de prueba que permite determinar el cambio en el consumo de combustible de un mismo vehículo, que opera bajo condiciones distintas, ya sea producto de la implementación de tecnologías, nuevos componentes, cambios en la técnica de conducción o, bien comparar, dos tipos de vehículos completamente distintos.

Es importante destacar que este procedimiento de prueba se basa en un estricto proceso de recolección y análisis de datos que son generados en un número de vueltas que efectúa el vehículo sobre un circuito previamente definido.

Para que la prueba sea válida se deben realizar al menos tres vueltas al circuito con una variación en el rango de tiempo, no superior al 0,5% y de variación en el consumo de combustible en estas vueltas, no superior a un 2%.

Durante toda la prueba la norma exige que un vehículo de control acompañe al vehículo de prueba, a fin de aislar del resultado variables externas tales como el viento, la temperatura, condiciones de la ruta, etc.

La norma SAE J1321 es aplicable a camiones y buses en circuitos tanto en vía pública como en óvalos de prueba.



Tanto el protocolo de prueba basado en la norma SAE J-1321 utilizado en el proyecto, así como los resultados obtenidos por la implementación de ésta fueron validados por el 3CV, organismo dependiente del Ministerio de Transportes, el que se encarga de la certificación vehicular del país.

LA PRUEBA

El circuito de prueba definido para este proyecto cuenta en total con 76,1 kilómetros, con punto de partida en el trébol vial cruce Champa (kilómetro 47.5 de la Ruta 5 Sur) y retorno en el trébol de General Velásquez con Américo Vespucio Express (kilómetro 7.7 de Autopista Central - General Velásquez).

Para la realización de esta prueba se debió cumplir, entre otras exigencias, con los siguientes requerimientos:

- Alcanzar una temperatura óptima de funcionamiento. Cada día, antes de iniciar las vueltas de prueba, los vehículos deben ser precalentados hasta alcanzar dicha temperatura.
- Control de conducción. Esta acción se realiza a través de observadores (copilotos) e hitos demarcados en la ruta, teniendo especial precaución de replicar en cada una de las vueltas los procesos de aceleración y conexión/desconexión de la velocidad crucero.
- Tiempo entre vueltas. El tiempo entre cada vuelta no debe variar más de 17 segundos.



Otras consideraciones:

- La velocidad de ambos vehículos, prueba y control, fue de 90 km/h. con velocidad crucero.
- Los vehículos fueron puestos a punto para la prueba y ambos vehículos tuvieron un mantenimiento equivalente.
- Una sola vuelta no es concluyente; es sólo un indicador que debe ser considerado en un conjunto de al menos 3 vueltas válidas.
- Las condiciones ambientales fueron monitoreadas en cada vuelta.



¿Cómo se midió la diferencia en consumos?

El consumo de combustible fue medido por proceso de gravimetría, esto requiere que el combustible sea pesado antes y después de cada vuelta; la diferencia entre ambos pesos representa el consumo. A fin de respetar los tiempos entre vueltas establecidos por la norma, es necesario equipar los camiones con estanques removibles con fittings de conexión rápida.

Metodología en acción – La semana D

Las pruebas se realizaron entre el 21 y el 25 de noviembre de 2011, entre las 23:00 pm. y 05:00 am., a objeto de minimizar el tráfico en la ruta.

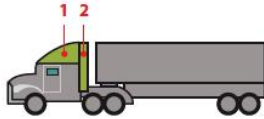
Día 1

Se realizaron las vueltas necesarias para establecer la línea base, esto es el consumo de combustible del vehículo de prueba sin dispositivos aerodinámicos.



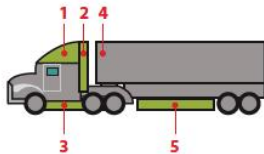
Día 2

Se realizaron las vueltas necesarias para establecer el consumo de combustible del vehículo de prueba equipado con el kit estándar.



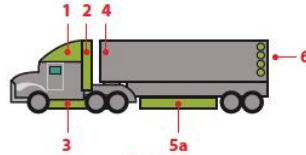
Día 3

Se realizaron las vueltas necesarias para establecer el consumo de combustible del vehículo de prueba equipado con el kit intermedio.



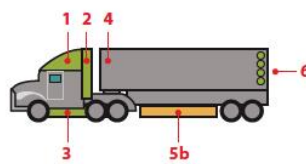
Día 4

Se realizaron las vueltas necesarias para establecer el consumo de combustible del vehículo de prueba equipado con el kit completo A.



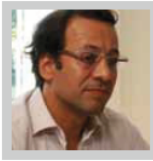
Día 5

Se realizaron las vueltas necesarias para establecer el consumo de combustible del vehículo de prueba equipado con el kit completo B.

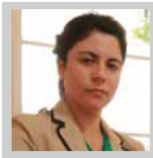


La comparación de los resultados obtenidos los días 4 y 5 refleja el impacto que puede llegar a tener el diseño del dispositivo aerodinámico. El kit aerodinámico completo A, sólo difiere del kit aerodinámico B en el diseño del carenado lateral de trailer. Ese sólo cambio incrementa el ahorro, desde un 13,64 hasta un 15,39%. De ahí entonces, que para optimizar el ahorro es necesario ser cuidadoso y elegir el dispositivo aerodinámico correcto para cada vehículo.

EQUIPO DE INVESTIGACIÓN



JULIO VILLALOBOS
Director del Centro de
Innovación Logística
CLI Chile



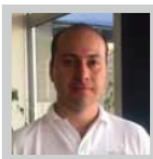
NATALIA ARANCIBIA
Jefa Área Transporte
Agencia Chilena de
Eficiencia Energética
(AChEE)



SOLEDAD RETAMAL
Coordinadora Área
Transporte Vial
MTT



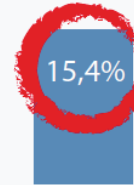
PAMELA OLIVO
Coordinadora
Sistema de Gestión
de Calidad
3CV MTT



JOSÉ LUIS VÁSQUEZ
Gerente de
Mantenimiento
TNT LitCargo

RESULTADO DESTACADO

El ahorro alcanzado de 15,4% se traduciría en un ahorro de costos cercano al 6% si consideramos que el consumo de diésel representa cerca del 40% de los costos operacionales de una empresa de transporte.



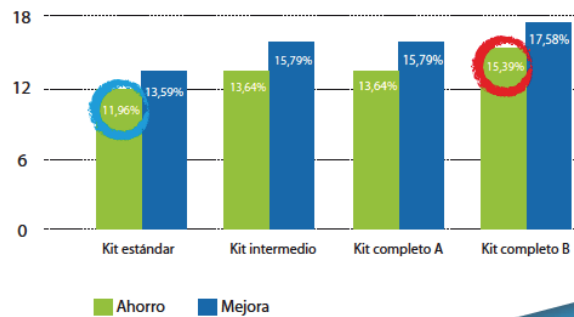
El tiempo de recuperación de la inversión para un kit aerodinámico completo es de unos 7 meses.

Resultados

- La norma SAE J-1321 contempla 2 indicadores de impacto en el consumo de combustible, estos son:

$$\% \text{ ahorro} = \frac{(\text{Prom. consumo T/C LB} - \text{Prom. consumo T/C prueba})}{\text{Prom. Consumo T/C LB}}$$

$$\% \text{ mejora} = \frac{(\text{Prom. consumo T/C LB} - \text{Prom. consumo T/C prueba})}{\text{Prom. consumo T/C prueba}}$$
- Los ahorros de combustible, producto de la implementación de aerodinámica en el vehículo de prueba fueron:



Más información:

Julio Villalobos

mail: jvillalobosc@unab.cl

ANEXO 12. Análisis aerodinámico regional mediante CFD de un semirremolque cisterna para transporte de cemento

*Aporte Santiaguino. 8 (2), 2015: 193-206
ISSN 2070-836X*

Análisis aerodinámico regional mediante cfd de un semirremolque cisterna para transporte de cemento

Regional aerodynamic analysis by the means cfd of a tanker trailer to transport cement

ABEL REMACHE COYAGO¹, LUIS TIPANLUISA SARCHI², JUAN SALVADOR JIMÉNEZ³ Y WASHINGTON ERAZO LAVERDE⁴

RESUMEN

Se realizó un análisis del flujo de aire de un camión transportador de cemento en la región Sierra - Riobamba y la región Costa - Guayaquil, con la finalidad de investigar su intervención e influencia en los siguientes coeficientes y factores: Drag o arrastre (C_D), Lift o elevación (C_L), Resistencia aerodinámica (P_a) y Potencia para vencer la resistencia al aire (R). Este análisis se efectuó mediante el uso de la mecánica de Fluidos Computacional (CFD). Para esto, se desarrolló un modelo geométrico y 3D del semirremolque y del tracto camión. Los datos del fluido fueron características promedio del aire y microclimas. Se obtuvo un C_D bajo en la zona costera, un C_L similar en cada caso, una P_a superior en la zona costera, y una R superior en Guayaquil, siendo estos valores lógicos en un buen diseño aerodinámico. Se concluye que R es mayor en la zona costera, pero la concentración de aire y la presión atmosférica pueden influir en la combustión y por ende en la adición de potencia, viéndose compensada de alguna manera esta relación. C_D es inferior en la zona costera, con similar arrastre de forma y fricción; la densidad ayuda a mejorar notablemente este coeficiente.

Palabras clave: coeficiente de sustentación; coeficiente de arrastre; aerodinámica de camiones; CFD; resistencia del aire.

ABSTRACT

An airflow analysis of a hauler of cement in the mountain region - Guayaquil was performed, for the purpose of investigation into its role and influence in the following coefficients and factors: Drag or drag (C_D) lift or elevation (C_L), aerodynamic resistance (P_a), and power to overcome air resistance (R). This analysis was performed using computational fluid mechanics (CFD).

¹ Universidad Central del Ecuador. Quito, Ecuador.

² Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

³ Universidad Internacional SEK. Quito, Ecuador.

⁴ Universidad de las Fuerzas Armadas. Latacunga, Ecuador.

For this, a 3D geometric model and the semi-trailer and truck tract developed. The data were averaged fluid characteristics of air and microclimates. A lower CD in the coastal zone, a similar CL in each case, a higher Pa in the coastal area, and a higher R Guayaquil, and these logical values in a good aerodynamic design was obtained. It is concluded that R is higher in the coastal zone, but the concentration of air and atmospheric pressure can influence the combustion and therefore the addition of power, looking compensated somehow this relationship. CD is lower in the coastal zone, having similar towed shape and frictio, density helps to significantly improve this ratio.

Keywords: lift coefficient; drag coefficient; aerodynamic truck; CFD; air resistance.

ICHIKLLACHAW

Simintu apaq kamiyunpita wayra yarquqtam rikapashqa kashqa, tsay kashqa hırka markakunachaw - Riobamba niykur achachak markakunachaw - Guayaquilchawmi; tsay rurakashqa coeficienteswan facturkuna imanawpis kay qatiqkunawan tanqanakuyanqanta nikaanapaq: Drag aw qarachana (CD), Lift aw umayaan (CL), Tsarakuq wayra dinámika (Pa), wayrata llallinapaq kallpata (R). Kay rikapakuy rurakashqa mikanika Fluidusta Kumputasiyunalta iñishirmi (CFD). Tsaypaq rurakashqa huk mudılu hiyunitriku huk 3D pullanremulkipa niykur kamiyunpa sutaqnitawan. Tsay yarqamuq wayrapawan microclimankuna pullantsashqa. Yunka kaqchaw yarkushqa CD, CL tsaynawlla llapanchaw, huk Pa llallip achachap markachaw, niykur huk R llallip Guayaquilchaw, kaynawmi allı tsanintsay huk allı diseño aerodinámicuchaw. Ushpanaq kay R yunkachawmi atska, itsa atska wayrawan patsa nitiqwan tanqan rawrayninta, tsay raykur hina adición de putinsiya yapanan, yanapanaqkuyan kay kaqkuna. CD yunkachaw ichikllam, arrastriwan kupayqa tsaynawllam, densidadmi yanapakun kay coeficiente qarachaqwan.

Pushaq shimikuna: kuwihisiyinti saraqkuna; kuwihisiyinti rutataqkuna; kamiyunkunapa wayradinamikan; CFD; wayra tsaraan.

INTRODUCCIÓN

La Simulación Aerodinámica mediante técnicas de CFD de un semirremolque cisterna para el transporte de cemento, tiene como objetivo intervenir en la optimización del consumo de combustible, que es destinado a los vehículos que realizan el transporte de productos en grandes cantidades por vía terrestre, con el afán de colaborar en investigaciones futuras de consumo de combustibles y técnicas de simulación computacional para camiones. Además, internamente se colabora con los lineamientos del Plan Nacional de Buen Vivir - Ecuador (SENPLADES, 2013).

Los puntos fundamentales tomados en cuenta para el análisis son los siguientes:

La resistencia aerodinámica del vehículo, siendo esta la fuerza que se opone al avance a través del aire, viene determinada por:

$$P_a = \frac{\rho}{2} C_x A_F v_i^2 \quad (1)$$

Donde:

ρ = Densidad del Aire, C_x = Coeficiente de resistencia aerodinámica, A_F = Área Frontal del vehículo proyectada en la dirección del movimiento y v_i = Velocidad.

De forma general, el coeficiente C_x se obtiene en túneles de viento con prototipos a escala o vehículos a escala real. Las escalas comunes en Europa son 1/4 o 1/5 para vehículos convencionales, y en vehículos comerciales se recomienda la escala 1/2,5 (Yung, 2001).

La fuerza de arrastre, que se contrarresta por medio de la fuerza de propulsión en la dirección opuesta, da como resultado el incremento o mantenimiento de la velocidad del vehículo. Esta fuerza queda representada por:

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

Donde:

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) y C_D = Coeficiente de Arrastre (adimensional) (Mott, 2006).

La sustentación es el componente aerodinámico perpendicular a la dirección en la que se traslada un cuerpo, dirigido verticalmente hacia arriba o abajo. El coeficiente de sustentación es un valor que permite comparar su incidencia-desempeño en cuerpos con diferentes formas y tamaños. Un coeficiente de sustentación positivo representa agarre o apoyo, mientras que uno negativo representa carga aerodinámica. Esta fuerza queda representada por:

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

Donde:

F_D = 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).

Se toma en cuenta para el análisis ciertas leyes de la Aerodinámica tales como:

El efecto Coanda, que es la tendencia de una corriente de aire o fluido a adherirse a las paredes del vehículo, la comprensión de este efecto permite poseer un criterio técnico

que ayuda de manera significativa al desarrollo de soluciones y conclusiones en el análisis que se realiza sobre todo en camiones (Coanda, 2004).

Estela, que se define como la línea de corriente que coincide en forma paralela con la pared. La región debajo de la línea de corriente que parte del punto de separación se llama estela (Streeter y Wylie, 1980). La aerodinámica en camiones puede ofrecer variados resultados y formas en la estela generada dependiendo del diseño del camión transportador.

Capa Límite, a partir del inicio del movimiento de un fluido de muy baja viscosidad, la rotación del flujo es nula. Dado que el fluido en las fronteras sólidas tiene velocidad igual a cero, se presenta un cambio brusco en el gradiente de velocidad. Este gradiente de velocidad en un sistema de flujo real, ocasiona que se creen fuerzas de corte cerca de los límites, reduciendo la velocidad del flujo cerca de ellas; a esto se le conoce como capa límite (Streeter y Wylie, 1980).

La *Resistencia* (R) tomada como potencia, es la pérdida que ofrece el aire al ser contraria al movimiento, para encontrar este dato se basa en la formulación de la ecuación (4) (MMPA, 2015).

$$R = \frac{1}{2} \rho v^3 A \quad (4)$$

Acorde con las velocidades que desarrolle un camión se debe considerar el fenómeno aerodinámico del *efecto suelo*, que transcurre cuando la diferencia de presiones entre la zona superior del camión y la zona inferior del mismo se acercan más hacia la superficie terrestre, generando alteraciones en el flujo de aire que pueden aprovecharse en diversos campos. En sistemas de movilidad y transporte terrestre en lo posible, se debe establecer una zona de mayor presión por encima del vehículo y baja presión con el fluido que circula por debajo. Este diferencial de presiones provoca una succión que mantiene al vehículo contra el suelo, mejorando el agarre, lo que incrementa la posibilidad de ser más estable en curvas a velocidades superiores (Cembranos, 2013).

La *Turbulencia* implica que las distintas capas de aire se desplazan de manera caótica y desordenada. La formación y creación de flujos turbulentos dependen de la inercia y velocidad del viento sobre el camión. De esta manera, el número Reynolds (Coeficiente adimensional) servirá como indicador del incremento o decremento de la Resistencia aerodinámica. Entre los factores que pueden afectar a este indicador Reynolds (Re) se encuentra la velocidad del aire, su viscosidad (influida por factores climatológicos), y de la longitud de la forma analizada (García, 2005).

Los fenómenos atmosféricos son variados en la zona andina y en la región costanera y estos pueden afectar también en el comportamiento aerodinámico en camiones, pero estos no se pueden definir de manera exacta al momento de evaluar su afectación (Cooper, 2007); también dependerá de los ángulos del viento y de la geometría a la que se esté afectando.

La mayor fuente de incertidumbre con CFD es el modelado de la turbulencia en las capas de corte que se desarrollan alrededor del vehículo. La simulación CFD para el di-

seño y el desarrollo aerodinámico está basada en realizar simulaciones de flujo estable por medio de modelos matemáticos para representar el efecto de la turbulencia en el campo de flujo promedio que rodean al vehículo.

Comúnmente las simulaciones y efectos de número de Reynolds en CFD son diferentes a las de los camiones porque los modelos de turbulencia se basan generalmente en un número de flujo Reynolds alto, donde la turbulencia tiende a comportarse de una manera diferente. Estas condiciones también niegan las características del flujo laminar y las capas de cizallamiento de transición que pueden ser frecuentes en la cara frontal de muchos vehículos de carretera. En los vehículos pesados, los flujos alrededor de las caras frontales del tractor son generalmente bajas con flujos muy diferentes a las características de la turbulencia, o, posiblemente, la ausencia de turbulencia que puede ocurrir sobre una gran parte de la cara frontal (National Research Council Canada, 2012).

Existen técnicas para simular los movimientos inestables a gran escala del flujo alrededor de un vehículo (Large Eddy Simulation) LES, y flujo separado (Detached Eddy Simulation) DES, pero las soluciones y resultados de estas técnicas son significativamente mayores en cuestiones de tiempo a las técnicas computacionales (National Research Council Canada, 2012).

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del análisis se debe realizar una cuantificación de varios parámetros, mediante los cuales se podrá obtener un criterio apropiado acerca de la reacción aerodinámica que tiene la carrocería cuando se la expone al viento tratando de emular las situaciones reales en las cuales este semirremolque operará.

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
- La Potencia para vencer la resistencia del aire (Pa)
- La resistencia del aire (R)

Para dimensionar las velocidades máximas a considerar, se tomó en cuenta 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 (INAMHI, 2010).

La humedad, velocidad media y temperatura del aire fueron tomadas mediante los máximos obtenidos de las tablas 1 y 2 del anuario meteorológico, en las ciudades de Riobamba (Zona Andina) y Guayaquil (Zona Costanera) atendiendo a los siguientes datos:

Tabla 1. Características promedio del aire en Riobamba

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

Fuente: INAMHI, 2010

Tabla 2. Características promedio del aire en Guayaquil

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

Fuente: INAMHI, 2010

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 la calcula mediante la ley de los gases ideales:

$$PV = nRT \quad (5)$$

Con la fórmula expuesta anteriormente (5) se obtiene las densidades para los microclimas seleccionados.

Tabla 3. Densidad del Aire

Zona - Región	Densidad (Kg/m ³)
Riobamba	0.84
Guayaquil	1.15

Para la simulación se debe establecer el tipo de material como influyente en el flujo, en este caso 0.04 mm (acero laminado nuevo), como rugosidad del material (White, 2013).

Para el levantamiento de medidas se tomó como referencia un Semirremolque Cisterna para el Transporte de Cemento de fabricación nacional, tomando en cuenta las características estándar, sin adicionales. De esta manera se procede a construir el modelo 3D del transportador de cemento tipo cisterna (figura 1).

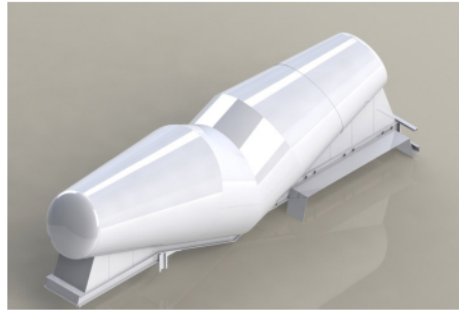


Figura 1. Modelo 3D Semirremolque Cisterna

Con la ayuda de un scanner 3D se procedió a obtener la nube de puntos de un tracto camión al azar (figura 2). Con la nube de puntos obtenida se procedió a unir los puntos más sobresalientes para con esto tener la sombra que definirá las líneas de flujo entrantes al semirremolque.

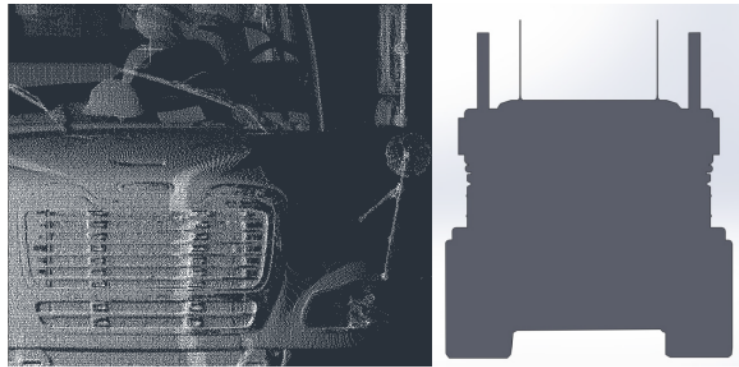


Figura 2. Obtención de la nube de puntos y simetría del tracto camión

Se establece las dimensiones en las cuales se crearán las condiciones de borde, limitando el análisis del modelo en un cubo de 18m x 6m x 4m, quedando el modelo ubicado en simetría con todas las paredes. Se realizó un análisis de la superficie externa del modelo, incluyendo espacios y cavidades donde circulará el fluido; dada la ubicación del modelo se tomará el eje «X» como referencia para el flujo del fluido.

Luego de realizar el trazado del modelo a analizar, planteadas las ecuaciones que lo gobiernan, establecidas las condiciones de contorno y configurados los resultados que se desea obtener se procede a la generación de una malla (figura 3), y posterior simulación.

Se establece dos configuraciones de la simulación, con los datos ambientales tanto de la Sierra – Centro, Riobamba, como de la costa, Guayaquil y se procede a realizar la comparación de los datos obtenidos.

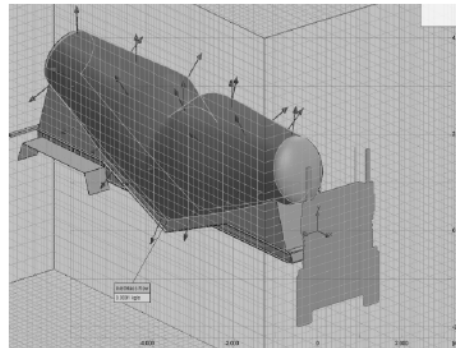


Figura 3. Mallado para posterior simulación

Dentro de las configuraciones, interiormente, en el software es necesario establecer datos exactos de los parámetros: tipo de fluido (laminar-turbulento), rugosidad, presión, temperatura, porcentaje de humedad (acorde con los microclimas), velocidad (25 km/h – 100 km/h), ubicación de sensores de viento, etc.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Respecto al Coeficiente de Arrastre – Drag, se obtuvo un valor del semirremolque de 1.18, en lo concerniente al análisis de Sierra Centro – Riobamba y un valor de 0.86 en lo que corresponde al análisis del clima en la Costa – Guayas. Dado que la resistencia aerodinámica aumenta con el cuadrado de la velocidad, lo deseable es obtener un coeficiente de arrastre bajo, lo cual se traduciría en una disminución de la potencia para el arrastre, lo que deriva en menor consumo de combustible. Para aumentar la eficiencia se recomienda disminuir la distancia entre el tracto camión y el semirremolque al máximo posible, además de mejorar los perfiles aerodinámicos del cabezal.

En el caso del coeficiente de Sustentación – Lift se obtuvo un valor de 0.03 en el análisis del clima de Sierra Centro – Riobamba, igual al que se consiguió en la simulación realizada con el clima Costa – Guayas, valores que indican que el vehículo no tiene una fuerza considerable de empuje hacia el piso, se puede establecer que el modelo actual podría presentar inestabilidad al momento de ser expuesto a altas velocidades, aunque considerando el peso de la estructura esta inestabilidad podría no notarse.

En lo concerniente al número de Reynolds se obtuvo un valor de 3.0562×10^6 para el análisis Sierra Centro – Riobamba, el cual indica que el fluido está en un régimen Turbulento, mientras que para el análisis con las características climáticas Costa-Guayas se

obtuvo un valor de 4.1842×10^6 , el cual muestra que al igual que en el estudio con el clima de la Sierra Centro se encuentra en régimen Turbulento.

Existen zonas en las que el fluido es laminar, gracias al diseño cónico del semirremolque que provoca un flujo adecuado del aire, y zonas donde se produce gran turbulencia, que es el caso del espacio que se genera entre el punto utilizado para el enganche con el tracto camión. Otro de los puntos donde se genera mayor turbulencia se encuentra en toda la «V» de descarga, en la parte frontal y posterior, y en todo el faldón inferior del semirremolque, puntos en los cuales se debe tomar en cuenta un suavizado de las superficies o una modificación en la estructura para que los componentes que generen turbulencia ingresen en el cono de transporte o espacios vacíos en la parte frontal o inferior del modelo, además de añadir paneles a los costados que permitan una mayor fluidez del aire. En las figuras 4 y 5 se puede observar las zonas en donde se genera mayor turbulencia, siendo estas las que se debe tener en cuenta para futuras modificaciones que mejoren el desempeño del semirremolque.

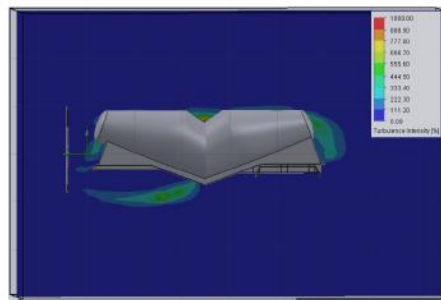


Figura 4. Intensidad de Turbulencia – Sierra - Centro

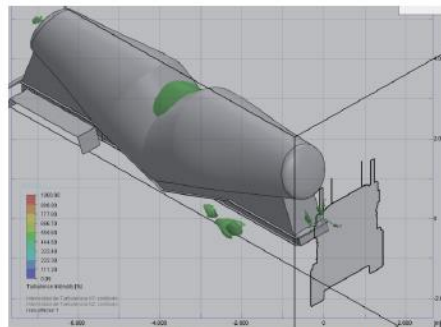


Figura 5. Puntos de Turbulencia Máxima – Sierra Centro

Para el caso de Resistencia Aerodinámica con las condiciones climáticas de la Sierra Centro, es decir con una densidad del aire calculada de $0.84 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, se obtuvo un valor

máximo de 1706,69 (N), mientras que con el análisis en condiciones climáticas de la Costa, con una densidad del aire de $1.15 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, se obtuvo un valor máximo de 2336.55 (N). Ambos análisis se realizaron con variaciones de velocidad de 0 km/h a 100 km/h dando las curvas características:

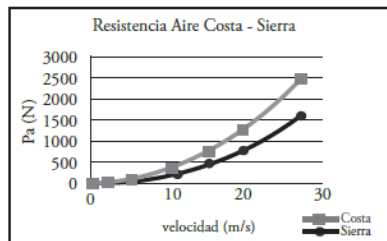


Figura 6. Resistencia del aire sector Costa y Sierra

La velocidad del flujo varía acorde con la forma del modelo, provocando perfiles de velocidad que influyen sobre el número Reynolds, lift y drag; es por esto que en ciertas zonas del modelo se encuentran Reynolds turbulentos, y fuerzas tanto de lift como drag considerables. Es importante tomar en cuenta los puntos donde los perfiles de velocidad son altos para suavizarlos y con esto reducir las turbulencias y las fuerzas que aumentan la potencia requerida para mover el vehículo.

Se puede establecer que los puntos a suavizar o corregir aerodinámicamente se encuentran en la zona de ingreso del flujo de aire, es decir en la cabina del tracto camión, de ahí que una solución óptima se basa en la utilización de alerones tanto en la parte superior como inferior del vehículo.

En cuanto al semirremolque los puntos críticos que se debe tomar en cuenta se encuentran en la parte inferior del mismo, dado que este punto es la unión de los dos cuerpos que forman la «V» de descarga; luego de este punto se puede observar una velocidad máxima de 4,91 m/s como muestra la figura 7.

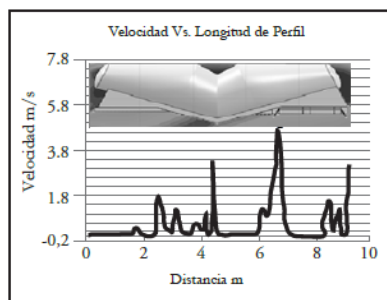


Figura 7. Velocidad del fluido respecto al perfil del semirremolque

Es importante destacar que los resultados obtenidos en la simulación en las dos condiciones climáticas de Costa Guayas, tienen valores similares a los de la simulación Sierra Centro – Riobamba, por lo que las recomendaciones que se dan benefician a las dos configuraciones climáticas.

Al determinar el área de sección transversal frontal del modelo, como se aprecia en la figura 8, se puede calcular la Resistencia (Potencia) que consume el fluido a través de la ecuación (4), el área calculada por el software estima un valor de $6,615 \text{ m}^2$. La resistencia que ofrece el aire al movimiento realizado con el clima de Riobamba da un valor de $R= 328,86 \text{ W}$; en el caso del estudio con el clima de Guayaquil se obtuvo una resistencia $R= 391,511 \text{ W}$.



Figura 8. Sección Transversal Frontal

La presión estática que se genera en la carrocería por la diferencia de velocidades, puede crear cargas e influir en el comportamiento de la estructura cuando el semirremolque esté con carga y trabajando, por lo que se debe tomar en cuenta en el diseño estructural del modelo aquellos elementos que puedan deformarse o debilitarse por las mencionadas cargas.

Se puede establecer que la presión máxima del sistema en funcionamiento se encuentra en la pared superior - posterior de la «V» de descarga, la presión de acuerdo a la figura 9 es de $101168,9547 \text{ Pa}$ en la Costa, y $71366,85061 \text{ Pa}$ en la Sierra, similar a la presión que se genera en la parte inferior - posterior donde va instalado el eje que conecta los neumáticos.

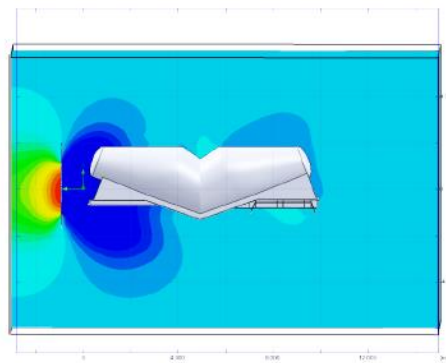


Figura 9. Presión respecto al perfil del semirremolque

El estudio de la capa límite permite observar la transición de velocidades en la franja de contacto entre el fluido y el camión semirremolque desplazándose. La formación de la capa límite dada entre otros factores por la viscosidad, es la causante de que el obstáculo produzca una variación en el movimiento de las líneas de corriente más próximas a él. El análisis de la estela tiene una importancia relevante, debido a que el comportamiento de esta, influye en la potencia que el vehículo tiene que ejercer para vencer la resistencia que ofrece el semirremolque, y debido a que esta fuerza no está en función de la sustentación se la considera como resistencia parásita, la forma de la estela varía por todas las pequeñas partes no aerodinámicas del vehículo (figura 10).

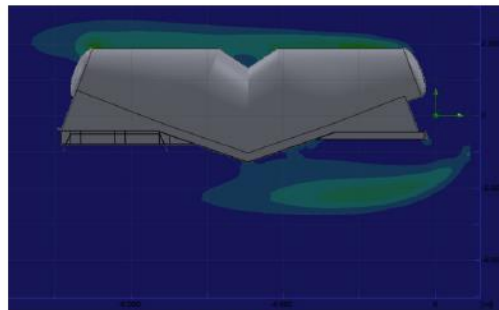


Figura 10. Estela del semirremolque

En el caso del semirremolque la forma redondeada del mismo no produce cambios importantes en la estela, lo cual implica que no se genera resistencias parásitas considerables.

CONCLUSIONES

La potencia utilizada para vencer la resistencia al aire es superior en la zona costera, por lo que influye directamente la concentración de aire y la presión atmosférica; estos factores propios de los microclimas, a la par, también pueden influir positivamente en la combustión y por ende en la adición de potencia, viéndose compensada de alguna manera esta correspondencia.

El coeficiente de arrastre (C_D) es inferior en la zona costera en comparación con la zona andina, a pesar de tener el mismo arrastre de forma y fricción, la densidad ayuda a mejorar notablemente este coeficiente, relacionado este fenómeno con la viscosidad del fluido causado por el diferencial de altura.

De forma general, el diseño del semirremolque es aerodinámicamente ideal por su terminación en cono y sus formas, produciendo el efecto que el aire tenga un flujo laminar a la salida, evitando con esto resistencias parásitas grandes que se provocan en las formas cuadradas; se debe evaluar la forma del casquete tori esférico para que el flujo del aire se optimice de mejor manera.

Se observó que es necesario obtener un coeficiente de resistencia aerodinámica (C_x) adecuado y exacto, por lo que se hace imperioso realizar pruebas de campo con el tracto camión junto con el semirremolque con parámetros y condiciones monitoreadas, o la creación de un prototipo 3D que pueda ser monitoreado en un túnel de viento, para determinar el valor exacto e introducirlo en las formulaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cembranos, Nistal y Florencio, Jesús. 2013. *Planificación de la prueba y ajustes de los equipos y elementos de los sistemas de automatización industrial*. España: Ediciones Paraninfo.
- Coanda, Henri Marie. 2004. *Aeronautics Learning Laboratory for Science Technology and Research*. <<http://www.allstar.fiu.edu/aero/Teachers.html>> [Consulta: 17-10-2015].
- Cooper, Watkins. 2007. *The Unsteady Wind Environment of Road Vehicles - Part Two: Effects on Vehicle Development and Simulation of Turbulence*, SAE.
- García, Calixto. 2005. *Zona Gravedad*. <<http://www.zonagravedad.com/-modules.php?name=News&file=article&sid=776>> [Consulta: 18-01-2015].
- INAMHI, 2012. *Anuario Meteorológico 2010*. Informe Técnico. Quito: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.
- Mc. Beath, Simon. 2005. *Aerodinámica del Automóvil de Competición*. Barcelona: CEAC.
- MMPA - Minnesota Municipal Power Agency. 2015. *Minnesota Municipal Power Agency*. <http://www.mmpa.org/Uploaded_Files/ab/ab5c7c5c-79d9-48bd-b64d-833001b7e230.pdf> [Consulta: 22-06-2015].
- Mott, Robert. 2006. *Mecánica de Fluidos*. México: Pearson Educación.

|| Abel Remache, Luis Tipanluisa, Juan Salvador y Washinton Erazo

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.

SENPLADES. 2013. *Plan Nacional para el Buen Vivir 2013-2017*. 1ra. ed. Quito.

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.

Fecha de recepción: 12 de noviembre 2015

Fecha de aceptación: 01 de diciembre 2015

Correspondencia

Abel Remache Coyago

apremache@uce.edu.ec