

## ANÁLISIS DE COEFICIENTES AERODINÁMICOS EN UN CAMIÓN EN ALTURAS SUPERIORES A 2500 MSNM

### ANALYSIS AERODYNAMIC FACTORS IN A TRUCK, AT HEIGHTS OVER 2500 METERS ABOVE SEA LEVEL

Abel Remache Coyago <sup>1</sup>, Luis Tipanluisa Sarchi <sup>2</sup>, Santiago Fernando Celi <sup>3</sup>, Jaime Molina Osejos <sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidad Central del Ecuador - Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemáticas

<sup>2</sup>Escuela Politécnica Nacional - Facultad de Ingeniería Mecánica

<sup>2, 3, 4</sup> Universidad Internacional SEK - Facultad de Ingeniería Mecánica, Alberto Einstein y 5ta Transversal (Quito)

e-mail: <sup>1</sup> apremache@uce.edu.ec <sup>2</sup> luis.tipanluisa@epn.edu.ec <sup>3</sup> santiago.celi@uisek.edu.ec <sup>4</sup> jaime.molina@uisek.edu.ec

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, V Edición 2016, No. 11 (15)

#### RESUMEN

Se presenta el método de cálculo in situ, de tres coeficientes aerodinámicos: coeficiente de resistencia al aire (k), coeficiente aerodinámico (Cx) y coeficiente de resistencia por rodadura (f) basado en la formulación de Cascajosa [1], la cual se aplicó y utilizó en un camión. Se obtuvieron valores reales y comparables a una altura superior a los 2500 metros sobre el nivel del mar. Se analiza la diferencia que existe al variar los datos ambientales a nivel del mar, así como el uso de valores adecuados para integrar los en los cálculos. Los coeficientes se ven afectados directamente por la altura y el campo gravitacional influyendo factores aleados, tales como: presión atmosférica, temperatura, densidad del aire, entre otros. Así, se concluye que la presión atmosférica y la gravedad afectan mayormente al coeficiente (Cx), con una variación de 10,49%, los otros valores no presentan cambios representativos. Estos datos son útiles para en simulaciones y futuros cálculos relacionados a consumo de combustible, potencia, aerodinámica, y otros.

#### Palabras Clave:

Coeficientes aerodinámicos, resistencia del aire, resistencia por rodadura, arrastre, presión atmosférica.

#### Abstract

The in situ calculation method is presented, of three aerodynamic coefficients: air resistance coefficient (k), drag coefficient (Cx) and rolling resistance coefficient (f) based on the Cascajosa formulation [1], which was applied and used in a truck. Real and comparable values were obtained at a height above 2500 meters above sea level. It analyzes the difference that exists in varying environmental data at sea level, as well as the use of appropriate values to integrate them into the calculations. The coefficients are directly affected by height and gravitational field influencing alloying factors, such as: atmospheric pressure, temperature, air density, among others. Thus, it is concluded that atmospheric pressure and gravity affect mainly the coefficient (Cx), with a variation of 10.49%, the other values do not present representative changes. These data are useful for simulations and future calculations related to fuel consumption, power, aerodynamics, and others.

#### Keywords:

aerodynamic coefficients, air resistance, rolling resistance, drag, atmospheric pressure.

## 1. INTRODUCCIÓN

Existen valores de coeficientes aerodinámicos importantes para cálculos en vehículos tales como: coeficiente de resistencia al aire (k), coeficiente aerodinámico (Cx) y coeficiente de resistencia por rodadura (f) [1], estos permiten la facilidad de procesamiento de datos para obtención de resultados relacionados con pérdidas en potencia, consumo de energía, consumo de combustible, resistencias. [2].

En varias simulaciones son de importancia estos datos, por lo que se ingresan valores que se encuentren en rangos recomendados, que por lo general no figuran ni aseguran un valor exacto sino aproximado, siendo los porcentajes de error más elevados; varias citas presentan estos valores en rangos cercanos que son un promedio de investigaciones generales y no se toma en cuenta niveles o cotas de altura superior. Por otra parte los valores de coeficientes aerodinámicos no son de fácil acceso o recopilación respecto a camiones y vehículos industriales, por lo que es necesario recomendar la metodología para el cálculo de valores que se puedan adquirir y diferenciar en regiones altas.

Existen diferencias entre los datos tomados a nivel del mar como en la altura, estos pueden cambiar los valores resultantes de los coeficientes; de tal forma que es importante considerar los aspectos ambientales y valores adecuados para obtener estos resultados en el medio que se vaya a investigar con la finalidad de asegurar mejores deducciones.

Para el cálculo de los parámetros a ser calculados existen varias formulaciones hechas por Cascajosa [1] en el siguiente orden (1) coeficiente de resistencia al aire, (2) coeficiente aerodinámico y (3) coeficiente de resistencia por rodadura:

$$k = \frac{(4M(j-j'))}{S[(v_1 + v_2)^2 - (v'_1 + v'_2)^2]} \quad Ec. 1$$

$$Cx = \frac{k2g}{\delta} \quad Ec. 2$$

$$f = \frac{Mj - kS\left(\frac{v_1 + v_2}{2}\right)^2}{Mg} \quad Ec. 3$$

En donde:

k: coeficiente de resistencia al aire, Cx: coeficiente aerodinámico, f : coeficiente de resistencia por rodadura, M: masa del vehículo, S: superficie maestra, j: desaceleración en alta velocidad, j': desaceleración en baja velocidad,  $\delta$ : peso específico del aire, g: gravedad, v1: velocidad inicial (alta velocidad), v2: velocidad final (alta velocidad), v'1: velocidad inicial (baja velocidad), v'2: velocidad final (baja velocidad).

La gravedad generada a diferente altura y latitud, necesaria para los cálculos se la obtiene con el dato de Ramos [3], en donde la gravedad es  $g = 9.7803185 \text{ m/s}^2$ , considerada como aceleración de la gravedad en el Ecuador latitud = 0, pero para considerar datos más exactos en cualquier lugar se lo puede adquirir del Gravity Information System, en la coordenada exacta que se requiera, de ahí que la gravedad en el sector de prueba fue  $9.772 \text{ m/s}^2$  [4], todo esto necesario para los cálculos de densidad del aire ( $\rho$ ) y coeficiente aerodinámico (Cx).

Para considerar un resultado más adecuado de la densidad del aire ( $\rho$ ) (4) y considerando los efectos de altura se aplica la ecuación según Efecto Estela [5]:

$$\rho = \left(\frac{Po}{RT}\right) \exp\left(\frac{-gz}{RT}\right) \quad Ec. 4$$

En donde:

$\rho$ : densidad [ $\text{Kg/m}^3$  ],  
Po: presión atmosférica [Pa],  
R: constante del aire [ $\text{J}/(\text{Kg.K})$ ],

T:temperatura [°K],  
g:gravedad [m/s<sup>2</sup> ],  
z:altitud [m]

## 2. METODOLOGÍA

El estudio de la resistencia por aire en la fase vehicular está orientado a la obtención de coeficientes relacionados a la aerodinámica vehicular. Los datos fueron tomados en la población de El Quinche, ciudad de Quito, a una altura de 2619 msnm., por la condición de la carretera y viento obligatorios para la toma de datos. Se realizó pruebas físicas con vehículos pesados analizando su desaceleración.

El cálculo de la aceleración se realizó tomando datos a altas velocidades en rangos entre 100 a 60 Km/h y a bajas velocidades en rangos de 25 a 10 Km/h, es decir 2 pruebas macro, con la tabulación de varios resultados para su comprobación, aseguramiento y justificación. Para esto se aplicaron las siguientes normas [1]:

- Al momento de las pruebas no debe existir la intervención del motor o del tren motriz, por lo que al instante de iniciar las pruebas de aceleración debe desconectarse las marchas, es decir la transmisión en posición neutral.
- El vehículo debe estar desembragado lo que significa que el pedal de embrague debe estar pisado a fondo para evitar la intervención del embrague o las fuerzas que puedan actuar por la inercia.
- La carretera debe ser horizontal, no presentar irregularidades o cambios en el tipo de material de la misma, que afecten el cálculo de la aceleración y del coeficiente de rodadura.
- La velocidad del viento debe ser 0, es decir en lo posible no debe existir movimiento del aire, puesto que este

afecta a los valores finales, puede incrementar los valores de aceleración o disminuirlos dependiendo del ángulo de ataque del viento hacia la carrocería.

Para el registro de datos sin viento, fue primordial verificar durante las pruebas que la velocidad del viento sea 0, con un anemómetro digital, para lo cual se verifica la proyección del estado del tiempo en la localidad establecida a través de datos obtenidos en Meteored [6].

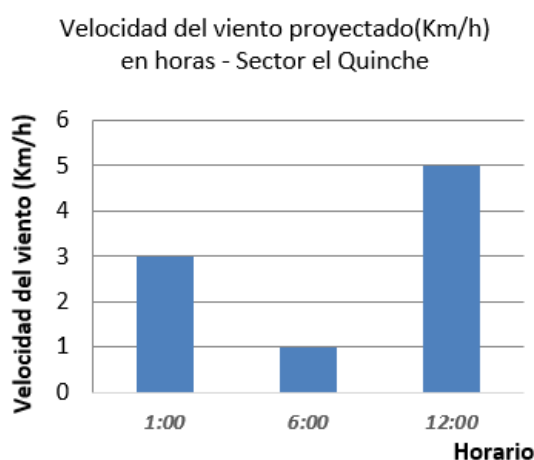


Figura 1. Velocidad del viento proyectado para la toma de datos

Las mejores condiciones establecidas estaban entre las 6:00 y 10 horas, con una presión atmosférica de 733 mbar (73300 Pascales), a una temperatura de 18°C [6], para lo cual se inició las pruebas en los momentos que la velocidad del viento fue igual a 0, condiciones que si fueron posibles. Haciendo relación con la altura de Quito que se encuentra a 2850 msnm esta posee una presión atmosférica de 717.7 mbar [7], así a un nivel mayor de altura el diferencial de presión se muestra notorio.

Los datos recolectados de velocidad, tiempo y de las aceleraciones calculadas fueron los siguientes:

Tabla 1. Valores calculados de la aceleración (-) a alta velocidad

Velocidad Km/h	tiempo (s)	Desaceleración A (m/s <sup>2</sup> )
70-60	7,9	0,35189
70-60	8,55	0,32514
80-70	8,29	0,33534
70-60	8,01	0,34706
70-60	8,22	0,33819

Tabla 2. Valores calculados de la aceleración (-) a baja velocidad

Velocidad Km/h	tiempo (s)	Desaceleración A (m/s <sup>2</sup> )
20-10 Km/h	18,96	0,14662
20-10 Km/h	17,52	0,15867
20-10 Km/h	16,59	0,16757
20-15 Km/h	9,56	0,14539
20-15 Km/h	8,31	0,16726

Los valores medidos con un incremento en la velocidad del viento o velocidad diferente de cero fueron desechados.

Los datos de masa fueron adquiridos de la ficha técnica del vehículo y comprobado en una báscula: 6885 Kg, y los datos de superficie maestra calculada con los mismos datos proporcionados fue 6,719 m<sup>2</sup> además de ser comprobados a partir de una nube de puntos escaneados de una imagen 3D. Se debe entender por superficie maestra, al área de contacto frontal del vehículo con aire o la sombra que genera este en una vista frontal.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### Resultados obtenidos

Los valores calculados fueron promediados, se recopilaron cinco datos experimentales tanto en alta como en baja velocidad, los resultados fueron los siguientes:

Tabla 3. Valores calculados de coeficientes aproximados en altura

Coefficiente	Valor
Coefficiente de Resistencia por Rodadura (f)	0,0159
Coefficiente de Resistencia al Aire (k)	0,059
Coefficiente aerodinámico (Cx)	1,109

El cálculo de coeficiente de resistencia por rodadura (f) generó un valor de 0,0159. Estos valores fluctúan entre 0.012 y 0.02 [8], y dependen individualmente del tipo de neumático, presión de inflado, tipo de superficie en este caso asfalto y temperatura.

El valor determinado para el coeficiente de resistencia al aire (k) es 0,059, estos valores están en un rango de 0,05 y 0,07 en lo que respecta a camiones [9]; considerando que dichos rangos dependen directamente del peso y al área frontal del vehículo, el valor calculado se encuentra dentro de los parámetros establecidos.

El coeficiente aerodinámico (Cx) generó un valor de 1,109 y estos datos como valores normales para camiones están en el rango de 0,9 y 1,2 [10], sin olvidar que el área frontal es similar a la de un vehículo industrial, es decir posee grandes dimensiones, por lo que este valor es elevado, en el caso de estudio el valor está dentro de los rangos normales para camiones o vehículos industriales.

Los valores encontrados pueden ser recalculados a nivel del mar, variando los datos promedio generados: gravedad a nivel del mar (9,81 m/s<sup>2</sup>), temperatura promedio de 18,15 °C y presión atmosférica 1013,249 mbar, valores generados en las costas ecuatorianas situadas a la misma latitud y en el mismo horario de la toma de datos. De esta manera se calculó el valor porcentual diferencial aproximado a diferentes alturas (Tabla 4).

Tabla 4. Diferencias porcentuales de datos respecto a la altura

Coeficiente	Valor a nivel del mar	Diferencia
Resistencia por Rodadura (f)	0,0159	0,3%
Resistencia al Aire (k)	0,058	0,3%
Coeficiente Aerodinámico (Cx)	1,225	10,49%

### Discusión

Los valores de coeficiente de resistencia a la rodadura (f), el coeficiente de resistencia al aire (k), y el coeficiente aerodinámico (Cx) están relacionados entre sí y dependen de datos que por su ubicación geográfica y condiciones ambientales influirán en los cálculos directos o simulaciones necesarias para resultados finales e investigaciones. Por ejemplo el valor de la gravedad varió acorde a la altura y la latitud de la tierra hasta en un 0,6%, por lo que en el Ecuador puede haber una variación del 0,3% en el valor de este parámetro [11].

Estas mismas condiciones geográficas afectan directamente en los valores de temperatura, densidad y presión atmosférica.

En condiciones normales en la región Costa a nivel del mar los valores de temperatura cambian en los rangos de 25 a 31 °C mientras que en la región Andina a alturas superiores a los 2500 m.s.n.m. entre 10 a 19 °C [12] esto hace que los valores de densidad afecten directamente en los resultados de coeficientes aerodinámicos.

A mayor altura existió menor presión por lo que la cantidad de aire se ve limitada, influyendo en los valores finales, otro componente importante es la cantidad de humedad presente en el ambiente.

Los datos obtenidos van a variar respecto

a los generados a nivel del mar, y dependiendo de la geografía que se tenga estos pueden afectar directamente en los coeficientes calculados. Se debe tomar en cuenta que la mayoría de datos entregados en documentos educativos están basados en datos tomados a nivel del mar y muchos de los resultados son derivados de pruebas realizadas en túneles de viento.

### 4. CONCLUSIONES

Los coeficientes aproximados para cálculos principales se ven afectados directamente por la altura, el campo gravitacional y por ende los factores aleados a los mismos tales como: presión atmosférica, temperatura, densidad del aire, entre otros.

La presión atmosférica y la gravedad afectan directamente al coeficiente aerodinámico, en este caso un valor de 10,49%, considerando a este valor un porcentaje importante en lo que se refiere a valores concluyentes y de inclusión en cálculos.

Los coeficientes de resistencia por rodadura (f) y coeficiente de resistencia al aire (k), no presentan cambios importantes cuando la diferencia de altura y coeficiente gravitacional cambian, en este caso el valor de 0,3% puede ser considerado no influyente en cálculos a nivel de altura.

Los valores aproximados de los coeficientes son referentes cercanos para realizar cálculos y análisis de simulación con mejores resultados, puesto que solo existe información de rangos en los que los coeficientes se han de encontrar en ambientes a nivel del mar.



## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Manuel Cascajosa, Ingeniería de Vehículos. Madrid: Tebar Flores S.L., 2006.
- [2] José Olivares de Jodar, "Estudio aerodinámico aplicado en el campo de la automoción," Barcelona, 2011.
- [3] Rogelio Ramos, Máximo Patricia, Narcisso Jessica, Mirón Monserrate, and Beltrán Mayra, "Estudio Geoestadístico para Obtener la Gravedad Local, Pendiente y Cálculo Hidrológico de las Barrancas Xaltelulco, Tepeloncocone, Tenepanco, Colorada y Quimichule del Volcán Popocatépetl," Boletín de Ciencias de la Tierra, pp. 65-84, 2012.
- [4] Physikalisch-Technischen Bundesanstalt. (2007, Marzo) Gravity Information System. [Online]. Disponible en <http://www.ptb.de/cartoweb3/SISproject.php>
- [5] Efecto Estela. (2015, Febrero) Efecto Estela - Energía eólica al alcance de todos. [Online]. Disponible en <http://efectoestela.com/2013/04/18/calculo-de-la-densidad-del-aire/>
- [6] Meteored. (2015, Marzo) Meteored. [Online]. Disponible en [http://www.meteored.com.ec/tiempo-en\\_Quinche-America+Sur-Ecuador-Pichincha--1-20047.html](http://www.meteored.com.ec/tiempo-en_Quinche-America+Sur-Ecuador-Pichincha--1-20047.html)
- [7] EXA - Agencia Espacial Civil Ecuatoriana. (2015, Marzo) DIVISIÓN DE CIENCIAS PLANETARIAS. [Online]. Disponible en <http://quito.exa.ec/>
- [8] Pablo Luque and Daniel Alvarez, Investigación de Accidentes de Tráfico - Estudio del Automóvil. Oviedo - España: Universidad de Oviedo, 2003.
- [9] Bosch, Robert GmbH, Manual de la Técnica del Automóvil. Barcelona: Reverté, 1996.

- [10] Bruce Bowling. (2015, Marzo) Air Drag Coefficients and Frontal Area Calculation. [Online]. Disponible en <http://www.bgsoflex.com/airdragchart.html>
- [11] Docsetools. (2015, Abril) La gravedad de la Tierra. [Online]. Disponible en [http://docsetools.com/articulos-utiles/article\\_123634.html](http://docsetools.com/articulos-utiles/article_123634.html)
- [12] Terra Andina. (2015, Abril) Terra Andina Ecuador. [Online]. Disponible en <http://www.ecuador-viaje.com/ecuador/clima.html>

## 6. BIOGRAFÍA



<sup>1</sup> Abel Remache.- Magíster en Gerencia y Liderazgo Educacional, Ingeniero Automotriz, Maestrante en Energías Renovables y Sostenibilidad Energética Universidad de Barcelona, Profesor Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad Central del Ecuador.



<sup>2</sup> Luis Tipanluisa.- Magíster en Energías Renovables, Ingeniero Automotriz, Profesor Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad SEK y Escuela Politécnica Nacional, Encargado de Laboratorio de Termodinámica.



<sup>3</sup> Santiago Celi.- Magíster en Administración de Empresas y Marketing, Ingeniero Automotriz, Profesor Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad SEK.



<sup>4</sup> Jaime Molina.- Magíster en Diseño, Producción y Automatización Industrial, Ingeniero Mecánico, Profesor Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad SEK

---

REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN

---

Fecha recepción	26 junio 2016
Fecha aceptación	25 octubre 2016

---