

COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO EN LA REDUCCIÓN DEL ARRASTRE MEDIANTE LA VARIACIÓN DE ACCESORIOS EN UN TRACTOCAMIÓN

AERODYNAMIC BEHAVIOR IN REDUCING DRAG BY VARYING ACCESSORIES ON A TRACTOR-TRAILER

Antonio Castillo

Máster en Ingeniería de Vehículos, Grupo de Investigación del Mantenimiento Gimán, Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, (Ecuador).

E-mail: antoniog.castillo@esPOCH.edu.ec ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0045-7495>

Alex Tenicota

Magister en Gestión del Mantenimiento, Grupo de Investigación del Mantenimiento Gimán, Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, (Ecuador).

E-mail: alex.tenicota@esPOCH.edu.ec ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0707-7698>

Stalin Nuela

Magister en Gestión del Mantenimiento, Grupo de Investigación del Mantenimiento Gimán, Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, (Ecuador).

E-mail: stalin.nuela@esPOCH.edu.ec ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3543-9390>

Recepción: 20/07/2020 **Aceptación:** 08/10/2020 **Publicación:** 14/12/2020

Citación sugerida:

Castillo, A., Tenicota, A., y Nuela, S. (2020). Comportamiento aerodinámico en la reducción del arrastre mediante la variación de accesorios en un tractocamión. *3C Tecnología. Glosas de innovación aplicadas a la pyme*, 9(4), 17-43. <https://doi.org/10.17993/3ctecno/2020.v9n4e36.17-43>

RESUMEN

El transporte público y carga pesada como productos del sector automotriz son las principales fuentes de emisión de dióxido de carbono (CO₂), y aproximadamente un tercio son causadas por vehículos comerciales, especialmente de la clase de tractocamión - remolque de extensos recorridos en carretera. Aunque las estrategias para reducir el consumo de combustible cada vez son más restringidas, la resistencia aerodinámica es una alternativa sustentable des ahorro de combustible en la última década. El objetivo de la investigación persigue identificar el comportamiento aerodinámico en la reducción del arrastre hasta el límite mediante la variación de accesorios en un tractocamión y remolque para identificar las posibles ganancias aerodinámicas. Un tractocamión - remolque estándar con dimensiones conocidas fue modelado en CAD, del mismo modo los accesorios instalados en el remolque, deflector de techo, estabilizador de vórtice, secciones laterales, y extensión del marco. Con la simulación mediante Computational Fluid Dynamics FLUENT, se investigó la influencia del flujo alrededor del camión, y sus comportamientos inestables. La velocidad referencia de 90 km / h misma que contribuye al arrastre, fue analizada en diferentes regiones para la obtención de una mayor resistencia al viento frontal. Para la simulación fueron agregadas las mejoras en los accesorios del remolque, y con ello la evaluación de resultados entre la simulación y el modelo original. Los accesorios simples del remolque con la mejora en la geometría y longitud hacen posible la reducción de la resistencia aerodinámica entre el 19 al 28.8%, en comparación con el vehículo objetivo, y un aumento dimensional general inferior al 1%, sin ningún cambio en la capacidad de carga del remolque.

PALABRAS CLAVE

Resistencia aerodinámica, Tractocamión, Remolque, Accesorios.

ABSTRACT

Public transport and heavy freight as a product of the automotive sector are the main sources of carbon dioxide (CO₂) emissions, and about one third are caused by commercial vehicles, especially of the tractor-trailer class of long road journeys. Although strategies to reduce fuel consumption are becoming increasingly constrained, aerodynamic drag is a sustainable fuel-saving alternative in the last decade. The objective of the research is to identify the aerodynamic flow behaviour around the standard tractor-trailer case, within the framework of drag reduction by varying trailer devices and accessories to the limit to generate possible aerodynamic gains. A standard tractor-trailer with known dimensions was CAD-modelled, as were the trailer-installed accessories, roof deflector, vortex stabilizer, side sections, and frame extension. With the simulation using Computational Fluid Dynamics FLUENT, the influence of the flow around the truck, and its unstable behavior was investigated. The reference speed of 90 km/hr, which contributes to the drag, was analyzed in different regions to obtain a greater resistance to the front wind. For the simulation, the improvements in the trailer accessories were added, and with it the evaluation of results between the simulation and the original model. Simple trailer attachments with improved geometry and length make it possible to reduce the drag by 19 to 28.8% compared to the target vehicle and to increase the overall size by less than 1% without any change in the load capacity of the trailer.

KEYWORDS

Aerodynamic resistance, Tractor truck, Trailer, Accessories.

1. INTRODUCCIÓN

La reducción del consumo de combustible se ha convertido en una necesidad importante a resolver en la “industria automotriz definida por la tendencia al alza de precios, y la aparición de compañías competitivas y eficientes para el diseño de sus productos” (Meneses y Trejos, 2018). El transporte público y privado de carga pesada son las principales fuentes de emisión de dióxido de carbono (CO_2), y aproximadamente un tercio son causadas por vehículos comerciales como el caso del remolque-camión en largos recorridos. Según estudios especializados en el análisis del consumo de combustible de vehículos (Schaller, 2010; Hucho, 1998; IEA, 2011) y la National Research Council Canada; identifican como principales fuentes de emisiones a las cargas producidas por efecto aerodinámico, y resistencia a la rodadura, con factores de consumo de entre el 30 al 55%, debido a las cargas axiales en alta velocidad y diseño de accesorios.

Debido a que los vehículos están trabajando para avanzar por el aire o túnel de viento, el aire creará una fuerza de arrastre que se opone al movimiento. En circunstancias realistas y condiciones de conducción, el túnel de viento se divide en varias partes; suelo, entrada, salida, paredes laterales y techo. La entrada está configurada como entrada de velocidad, la cara de salida está configurada como salida de presión, mientras que las paredes laterales se definen como pared estacionaria sin condición de deslizamiento para simular simetría. Esto hace que el vehículo tenga que crear más potencia para realizar la misma cantidad de trabajo, debido a que el arrastre es una fuerza inevitable que debe minimizarse para maximizar la cantidad de potencia para desplazarse hacia adelante. Los estudios realizados por especialistas aerodinámicos tales como Meneses y Trejos (2018), y Algozino (2019), consideran a los camiones grandes como cuerpos bluff, por disponerse en un flujo de alta velocidad a enormes fuerzas de arrastre, y ser aerodinámicamente ineficientes. Lo mencionado a los 100 km/h se caracteriza por un coeficiente de arrastre promedio (C_d) de 0.6 y gasto del 65% del combustible para superar la resistencia aerodinámica, a diferencia de un automóvil de pasajeros de consumo menor hasta en 4 veces en mismas condiciones. “Un camión - remolque a gran escala en un túnel de viento a 55 millas por hora y sin ningún dispositivo

adicional aerodinámico, puede producir un coeficiente de arrastre promedio por el viento entre 0.80 y 1.00” (Englar, 2013). En tal virtud, “cualquier reducción de la resistencia aerodinámica, dará como resultado un gran ahorro de combustible” (Lav, 2013). La aerodinámica en un camión estándar varía de manera no lineal, mientras que la resistencia a la rodadura crece linealmente con la velocidad. “El arrastre aerodinámico aumenta cúbicamente a razón de los aproximados 80 km/h, pero las pérdidas aerodinámicas son menores a bajas velocidades” (Leuschen y Cooper, 2006).

Los métodos de reducción de resistencia para mejorar el rendimiento aerodinámico se remontan desde los aportes de Tanner en 1975, resumidos en acciones pasivas que no consumen energía externa, pero reducen o disponen de prototipos para componentes como la base, sangrado de la base, cola del bote, placas separadoras, cuñas separadoras, y varios tipos de bordes dentados o serrados. Los trabajos especializados de Santana *et al.* (2020), y Sautié *et al.* (2020), consideran a las placas separadoras como largas y difíciles de aplicar debido a la limitación de espacio y estabilidad, pero los relaves de botes son más fáciles de implementar para reducir los arrastres. La primera generación de dispositivos complementarios se caracteriza por la disminución del coeficiente de arrastre general entre 0.15 a 0.25. La segunda generación considera el uso de dispositivos como el sello de separación, faldones laterales del remolque y la cola trasera del bote con potencial de disminución del coeficiente de arrastre de 0.03 a 0.10.

El uso simultáneo de las alternativas, es una opción económica y viable en la reducción del coeficiente de arrastre y ahorro de combustible. “Los dispositivos más usados que reducen el arrastre en la región base del avance, son la cola de barco con grandes placas que producen una región de estela pequeña de baja presión” (Goñi y Rojas, 2017). Los generadores de vórtice con lengüeta de aire añaden impulso al flujo en la región fuera del espacio sin que entre al mismo” (Wood, 2004). El arrastre ocasionado por ruedas del tractor y remolque, han sido reducidos por la implementación de faldones laterales. La implementación de una forma externa variable del extremo trasero del remolque ha contribuido con la eficiencia del transporte de los futuros remolques de larga distancia, de tal manera que permite un

enfoque de reducción de la resistencia aerodinámica y aprovisionamiento de un volumen adecuado de transporte en concordancia con los tipos de carga útil, de tal manera que el 95% del espacio destinado para la carga útil total esté disponible para fines de transporte según los criterios establecidos en las investigaciones de Fabian (2016) y Stadler, Hirschberg, y Hirz (2012).

Para la disminución del coeficiente aerodinámico mediante soluciones numéricas, Hyams *et al.* (2011), obtiene una reducción del 9% en la resistencia con ecuaciones inestables de Navier-Stokes promediadas por Reynolds, y un solucionador de flujo paralelo que investiga el efecto del flujo aerodinámico inestable en la economía de combustible de los camiones de clase 8, con respecto al ángulo de guiñada, los extensores de la cabina, las ruedas giratorias, las aletas de base en el campo de flujo alrededor del camión y las placas separadoras. La reducción del 30% en el coeficiente aerodinámico documentado en Hyams *et al.* (2011), registra el uso de un deflector y un desviador de flujo de aire que circula por la parte superior del remolque, con un valor adicional del 10% en la reducción de arrastre, sin embargo, el modelo en 2D es limitado. Las pruebas de túnel de viento y simulaciones numéricas para investigar los efectos del faldón lateral de Hwang *et al.* (2016) han contribuido con la reducción de resistencia en camiones pesados hasta un 5%. Doost y Zadeh (2013), lograron una reducción del arrastre del 23%, gracias a la canalización del aire desde el parachoques delantero hacia el trasero con vórtice reducido, y para la simulación del campo, las líneas de flujo alrededor del vehículo, junto con los vórtices y la distribución de presión en la estructura fueron simuladas mediante las ecuaciones que rigen FLUENTE. Sin embargo, aunque los dispositivos complementarios funcionan como se esperaba, su efectividad no se puede comparar con los que se aplican a la misma región de origen de arrastre en el avance. Para la simulación precisa y válida del flujo alrededor de los camiones mediante métodos numéricos, se debe considerar las características del campo de flujo turbulento y las complejidades geométricas. El mallado de sólido, algoritmos de solución confiables y recursos informáticos apropiados son necesarios para la simulación tridimensional en lo referente a la caracterización aerodinámica. “Los camiones para el transporte de mercancía que permita la pequeña reducción de la resistencia aerodinámica mediante la consideración de los

efectos aerodinámicos y cambios en el flujo por la variación de la forma y dimensiones de dispositivos y accesorios, significan menor consumo de combustible manifestado en reducción en las emisiones de los camiones” (Lo y Kontis, 2016).

La presente investigación tiene como objetivo estudiar el comportamiento del flujo y resistencia aerodinámica frente al consumo de combustible del camión–remolque estándar, conforme a la variación de accesorios de reducción de arrastre. El transporte de mercaderías a nivel nacional e internacional ha contribuido con el desarrollo del comercio entre países, pero a la vez ha manifestado grandes proporciones de emisiones contaminantes. La contaminación del aire como un importante problema de salud pública, la reducción del consumo de combustible mediante la implementación de adiciones aerodinámicas en camiones pesados, la mejora de la salud de la población. La aplicación de tecnologías de reducción de resistencia de arrastre permitirá reducir emisiones y con ello el impacto que tienen sobre el calentamiento global.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

El arrastre aerodinámico en cualquier caso del flujo de fluido fue definido por la fuerza resultante sobre el objeto como paralela a la velocidad de la corriente libre de acuerdo a:

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

donde:

(C_D); coeficiente de arrastre como indicador de eficiencia aerodinámica entre diferentes vehículos.

(F_d); fuerza de arrastre aerodinámica, $F_d = \frac{1}{2} C_D \rho A V^2$

(V); velocidad del vehículo,

(A); área frontal o de referencia

(ρ); densidad

Se tomaron en cuenta tres ecuaciones de la Mecánica de Fluidos (FM) para estudiar la acción de fuerzas aplicadas o existentes de acuerdo con el trabajo especializado de (White, 2005):

- Conservación de la masa para establecer el equilibrio entre la cantidad de flujo másico que ingresa a un volumen y la cantidad que lo abandona.

$$\nabla V = 0 \quad (2)$$

- Conservación del momento lineal de la segunda ley del movimiento de Newton como fluido newtoniano, para obtener una relación entre la presión, el momento y las fuerzas viscosas.

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} = -\nabla p + \mu \nabla^2 V + \rho g \quad (3)$$

- Conservación de la energía de acuerdo con la Primera ley de la termodinámica para establecer el equilibrio de la cantidad total de energía dentro del sistema, con posibles cambios entre los diferentes estados.

Energy equation

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = k \nabla^2 T + \Phi \quad (4)$$

Donde:

V = campo de velocidad,

g = campo de gravedad

ρ = densidad,

c_p = capacidad calorífica específica,

t = tiempo,

T = temperatura,

p = presión,

k = coeficiente de conductividad térmica,

μ = viscosidad,

Φ = función de disipación viscosa

La complejidad matemática de las ecuaciones hizo imposible resolverlas analíticamente, excepto en casos simplificados. Las condiciones del sistema fueron dadas a temperatura ambiente constantes con número de Mach inferior a 0,3, y densidad constante del flujo, junto con el supuesto de que la viscosidad del fluido es constante. Las ecuaciones de continuidad y momento fueron resueltas para velocidad y presión. Todos los flujos de fluidos fueron considerados turbulentos el caso de estocásticos, tridimensionales y dependientes del tiempo. Se describieron flujos con fluctuaciones con valores medios de presión y velocidad más un término de fluctuación; $u = \bar{u} + u'$ “y $p = \bar{p} + p'$ ” respectivamente. Para manejar esto, las ecuaciones (continuidad e impulso), con términos adicionales debido a fluctuaciones, se promedian en el tiempo. “Las nuevas ecuaciones se denominan ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds, abreviadas como RANS” (Versteeg y Malalasekera, 2007).

Ecuación de continuidad para el flujo medio

$$\nabla \bar{V} = 0 \quad (5)$$

Ecuación de momento en dirección X

$$\rho \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \rho g_z + \frac{\partial}{\partial x} \left(u \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} - \overline{\rho u' w'} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(u \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} - \overline{\rho v' w'} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(u \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} - \overline{\rho w'^2} \right)$$

Ecuación de momento en dirección Y

$$\rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \rho g_y + \frac{\partial}{\partial x} \left(u \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \overline{\rho u' v'} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(u \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \overline{\rho u'^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(u \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \overline{\rho u' w'} \right)$$

Ecuación de momento en dirección Z

$$\rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \rho g_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(u \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \overline{\rho u'^2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(u \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \overline{\rho u' v'} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(u \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \overline{\rho u' w'} \right)$$

Con el sistema de ecuaciones resuelto se pudo contar con todas las variables velocidad, presión, y temperatura de cada intervalo del sistema o discretización de un espacio en celdas pequeñas en las que se modela el fluido y se resuelven las ecuaciones para cada una de ellas. La investigación del flujo aerodinámico alrededor de un camión - remolque detalla aspectos en los accesorios instalados, de manera que, se identificaron las diferentes áreas y localización de zonas de mayor aporte como alternativas para reducir el arrastre aerodinámico. La evaluación del efecto de diferentes dispositivos de remolque reductores de resistencia mediante CFD, para con las dimensiones y geometría del camión - remolque definido en la Figura 1. El área frontal del modelo de grado cero es de 9.78 m^2 . Se considera 3 L para una distancia entre la entrada y el área frontal del camión, 5 L la distancia entre la salida y la parte trasera del camión, 12 W ancho del dominio, y 6 H de altura del dominio.

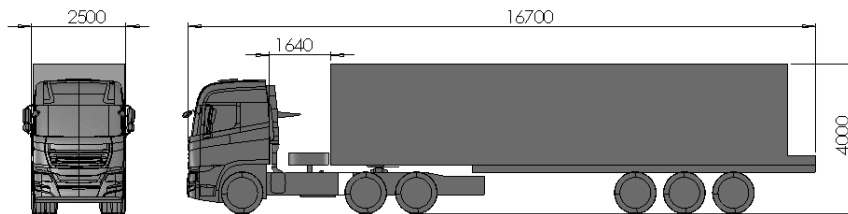


Figura 1. Geometría simplificada y dimensiones estándar en tractocamiones y remolque.
Fuente: (SAE , 2013).

Debido a que el régimen predominante fue turbulento para el estudio, en ese sentido se utilizó la simulación numérica directa de DNS con el cálculo de variables promedio en el tiempo y el método Lattice Boltzmann (LBM) para recuperar la hidrodinámica de la ecuación de Navier-Stokes según (Kandasamy *et al.*, 2002). La información suficiente generada sobre el flujo, se pudo informatizar los datos con la aplicación de modelos RANS, de manera que fueron combinados los modelos de turbulencia y esfuerzo cortante de Menter, con la implicación de características cercanas y alejadas del muro.

Para involucrar una región 3D o su contraparte 2D simplificada donde se supone que el fluido ocupa el espacio del dominio computacional y sus celdas con el volumen hexaédrico para que de ese modo el

software CFD resuelva las ecuaciones diferenciales gobernantes. El dominio se modela con un bloqueo inferior al 5%. La configuración se realizó de acuerdo con la sugerencia de SAE J2966. La geometría del vehículo fue limpiada topológicamente y se verificó la geometría de intersección sin errores, notando así un modelo limpio con superficie de malla ideal. La discretización del dominio fue conjeturada mediante la aplicación de “mallas híbridas” (Wang *et al.*, 2014), de manera que se asociaron características de las mallas estructuradas y no estructuradas, para llenar los dominios sin restricción alguna, y mejora en la precisión de los cálculos viscosos. Son considerados los tamaños de malla entre finas y gruesas de diversas regiones establecidas según el dominio computacional en las diversas partes del tractocamión y remolque según la descripción de la Tabla 1.

Tabla 1. Configuración de malla.

| Elementos | Espesor de malla (mm) |
|------------------------|-----------------------|
| Camión | 5-60 |
| Remolque | 10-150 |
| Carretera | 10-1800 |
| Caja de refinamiento 1 | 220 |
| Caja de refinamiento 2 | 500 |
| Paredes laterales | 1900 |
| Entrada y salida | 1900 |

A partir de la malla realizada en ANSA, se creó una superficie cerrada, múltiple y no intersectante de forma triangulada de alta calidad, con algoritmo Tetra Rapid en el túnel de viento. Las capas de prisma más cercanas a la superficie fueron necesarias para resolver la parte interna de la capa límite y así manejar los gradientes de alta velocidad. Para asegurarse de que la solución esté estabilizada, se verificó la convergencia de los residuos y el diagrama de arrastre. De acuerdo con la experiencia sugerida en trabajos especializados en estudios de arrastre aerodinámico Roy (2005) y Versteeg y Malalasekera (2007), fue considerado el arrastre de presión (fuerza que actúa normal a la superficie) y arrastre de fricción (fuerza que actúa tangencial a la superficie), mismos que contribuyen más del 90% de la resistencia total de las regiones alrededor del camión formadas por la brecha entre el tractor y el remolque, la estela de la

base detrás del remolque y el tren de rodaje. El ancho comprendido desde la parte trasera de la cabina hasta el extremo delantero de la carrocería fue caracterizado su alta presión positiva (coeficiente de presión $+0,5$ a $+1$) en la parte delantera de la cabina y la carrocería. La altura de la carrocería medida sobre el techo de la cabina, en un patrón típico de flujo de aire alrededor de un camión no aerodinámico fue caracterizado su presión negativa (coeficiente de presión $-0,5$ a -1) en la parte trasera.

La distribución de resistencia aerodinámica entre el tractor y el remolque fue considerada la configuración de los coeficientes de arrastre en la cara frontal del tractor, la región de separación, y la base del remolque como regiones dominantes de arrastre de acuerdo con lo mostrado en la Figura 2. Para la distribución del arrastre del tractocamión y remolque, se tomaron en cuenta las configuraciones ideales en adición las características de los accesorios en los alerones, techos y carenados laterales, tomando en cuenta los efectos de viento cruzados, lo cual manifiesta la distribución de la resistencia aerodinámica de 40% para el tractor y 60% para el remolque.

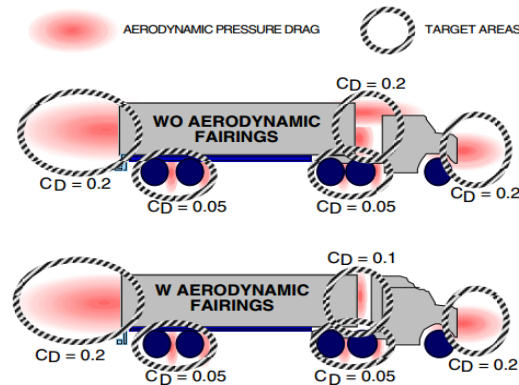


Figura 2. Regiones dominantes de arrastre en un tracto – camión.

Fuente: (SAE , 2013).

En el estudio fueron incluidos los extensores laterales al tractor, con el montaje de dispositivos dentro del hueco y cierre completo como el ejemplo de la Figura 3, para tratar de evitar vientos cruzados,

acumulación de aire entre espacios, y separación del flujo con implicación de gran turbulencia que afecten a las condiciones definidas para el arrastre y estabilidad aerodinámica.



Figura 3. Cabina con deflector de techo y extensores laterales de cabina y Trailer-Tractor con espacio sellado.
Fuente: (SAE , 2013).

Debajo del remolque fue considerado el uso de faldones laterales y deflectores en las ruedas Bogey, con fondos más lisos y menos irregularidad para mejorar el flujo del tren de rodaje dirigiendo el flujo a lo largo del costado del remolque, ver la Figura 4.



Figura 4. Tratamiento del tren de rodaje.
Fuente: (SAE , 2013).

Para disminuir y estabilizar la estela base mediante el flujo en la parte trasera del remolque, fue considerado para el estudio el caso de placa base y cola del barco, descrito en la Figura 5, mismos contienen el flujo turbulento inestable, así como lo establecen las pruebas del túnel de viento que reflejan mejoras en la resistencia en 51 y 44 recuentos de resistencia, respectivamente.



Figura 5. Cola de barco larga de 4 paneles y placas base.

Fuente: (SAE , 2013).

“Los resultados de las pruebas de túnel de velocidad de viento, desarrolladas por el Consejo Nacional de Investigación de Canadá (NRC), a 100 km / h con barrido de guiñada promedio, sirvieron como referencia para argumentar la reducción de la resistencia de arrastre” (Mohamed-Kassim y Filippone, 2010; Wood y Bauer, 2003).

3. RESULTADOS

Mediante la aplicación de los argumentos de la ecuación 1, se pudo definir el coeficiente de arrastre (C_d) útil para la comparación de la eficiencia aerodinámica entre diferentes vehículos. Lo calculado con respecto al eje x, la velocidad del camión y la fuerza de arrastre se muestran en la Tabla 2. El valor calculado de C_d fue considerado como base para la comparación en simulaciones futuras y la validación de la eficiencia de diferentes complementos aerodinámicos.

Tabla 2. Arrastre aerodinámico del modelo de referencia.

| | |
|-----------------------------|-----------------------------|
| Área proyectada | 9.78 m ² |
| Fuerza de arrastre | 2313.95 kg m/s ² |
| Velocidad de entrada | 25 m/s ² |

| | |
|--------------------------|-------------------------|
| Densidad del aire | 1.293 kg/m ³ |
| Cd | 0.619 |

Los resultados de las simulaciones de los dispositivos individuales corresponden a cambios de dispositivos y geometría del deflector de techo, estabilizador de vórtice, faldones laterales carenado y extensiones de marco.

Tabla 3. Cd del camión con deflector de techo y estabilizador de vórtice.

| | Fuerza de arrastre | Cd | % reducción del Cd |
|---|---------------------------|-----------|---------------------------|
| Modelo referencia | 2327.88 | 0.621 | |
| Modelo + Deflector de techo + Estabilizador de vórtice | 1753.13 | 0.463 | 25.4 |

El dispositivo adicional de faldones laterales ayuda en el flujo aerodinámico debajo del remolque a reducir el arrastre general. Como se ve en la Tabla 4, hay una mejora del 8% en la reducción de la resistencia y el flujo se desplaza a lo largo de los lados del remolque a nivel del suelo. Además, las mejoras también se pueden ver desde el difusor lateral en la parte trasera; estabilizando el flujo y dirigiéndolo hacia el centro de la estela base.

Tabla 4. Cd de las faldas laterales.

| | Fuerza de arrastre | Cd | % reducción de Cd |
|------------------------------------|---------------------------|-----------|--------------------------|
| Modelo referencia | 2327.88 | 0.621 | |
| Modelo + Faldones laterales | 2250.04 | 0.582 | 6.3 |

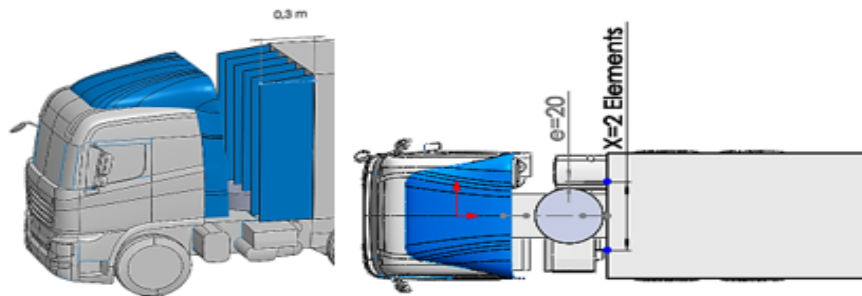
Según los resultados de la simulación la extensión de trama adicional causó la reducción de la región de activación y el tamaño de la activación. Una mayor extensión de la región de la cola puede causar una mayor reducción de la estela y, por lo tanto, arrastrar, ver Tabla 5.

Tabla 5. Cd del marco de extensión.

| | Fuerza de arrastre | Cd | % reducción de Cd |
|------------------------------------|--------------------|-------|-------------------|
| Modelo referencia | 2327.88 | 0.621 | |
| Modelo + Marco de extensión | 2139.04 | 0.541 | 12.9 |

La evaluación de los dispositivos individuales muestra los resultados de las simulaciones en donde se puede deducir de acuerdo a lo mostrado que el caso Modelo + Deflector de techo + Estabilizador de vórtice es el de menor Cd, considerado de menor fuerza de arrastre.

El deflector de techo con estabilizador de vórtice y extensión de marco brindan las mejoras de resistencia más significativas. Esto da una indicación de que el flujo de aire entre el espacio del tractor y el remolque, y detrás del remolque tiene una gran influencia en la resistencia aerodinámica. En ese sentido se presentan los resultados de la optimización del estabilizador de vórtice utilizando el parámetro “X”, y es el número de estabilizador de vórtice en la parte delantera del remolque, estos dispositivos se distribuyen de manera uniforme de acuerdo con el ancho del remolque (ver Figura 6).

**Figura 6.** Mejora del esquema para el estabilizador de vórtice.

Fuente: elaboración propia.

Los resultados que reflejan la línea punteada naranja en el Gráfico 1 representa el Cd del vehículo objetivo, la línea azul representa la variación del Cd sobre los números de vórtice “X”. Se puede observar una reducción de la resistencia entre el 25% y el 28% en referencia al modelo original. Sin embargo, la configuración más adecuada es cuando $X = 6$, notada por buena reducción de la resistencia

y un mejor rendimiento del aire en la brecha del camión, también tiene una mejora significativa de aproximadamente el 3% en comparación con llevar solo dos de estos estabilizadores de vórtice.

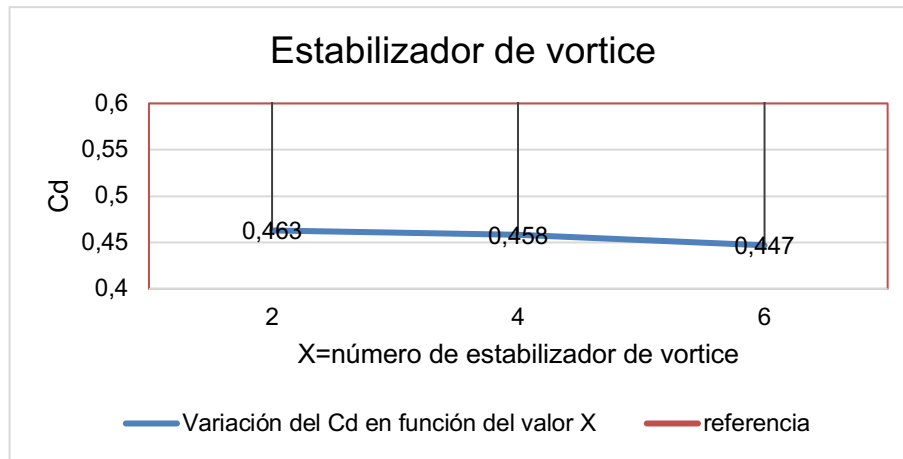


Gráfico 1. Reducción del coeficiente Cd en función del número X del estabilizador de vórtice.

Fuente: elaboración propia.

La mejora en el ángulo de ataque del deflector del techo tiene una gran influencia en la capacidad de reducir la resistencia del vehículo en general, con una reducción de la resistencia entre el 17% y el 26% con referencia al modelo referencia, pero el ángulo más eficiente es cuando $\theta = 140$. Los resultados que se muestran en el Gráfico 2 muestran la línea punteada naranja como los valores Cd del vehículo objetivo, la línea azul representa la variación del Cd sobre el ángulo “ θ ”.

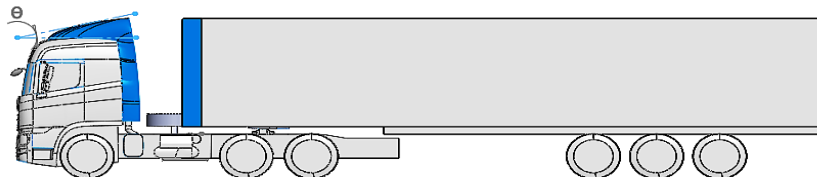


Figura 7. Mejora del ángulo del deflector de techo.

Fuente: elaboración propia.

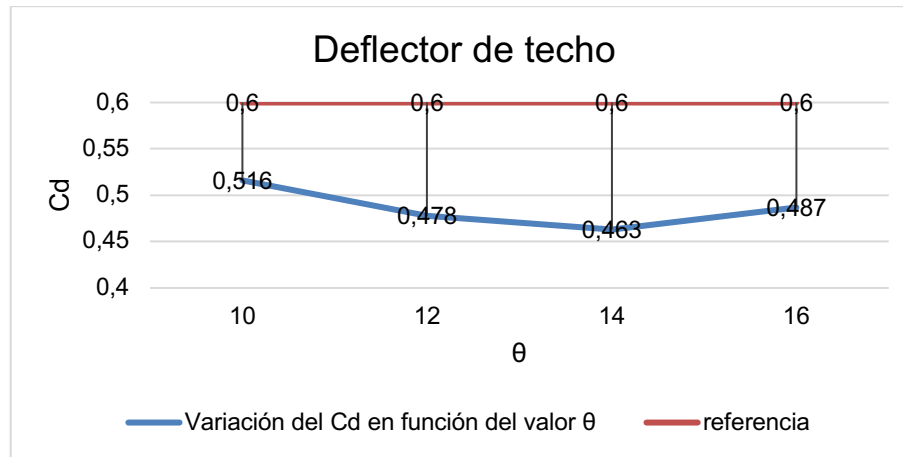


Gráfico 2. Reducción del coeficiente deflector del techo en función del ángulo θ .

Fuente: elaboración propia.

La Figura 8 muestra un espacio sellado que confirma una buena reducción de la fuerza de arrastre y también una muy buena fijación del flujo sobre el espacio a lo largo del techo del remolque, en comparación con la Referencia. El sellado del espacio es descrito por los parámetros de extensión del deflector de techo “a” y la longitud del estabilizador de vórtice “b”, el espacio del modelo original es de 1640 mm sin estos dispositivos. Los resultados que se muestran en el siguiente gráfico donde la línea punteada naranja representa el Cd del vehículo objetivo, la línea azul representa la variación del Cd en la relación entre la longitud del deflector de techo y el estabilizador de vórtice. La reducción del coeficiente de arrastre en esta configuración no es más del 2%, es decir que se considera muy baja, pero podría aportar a los resultados globales.

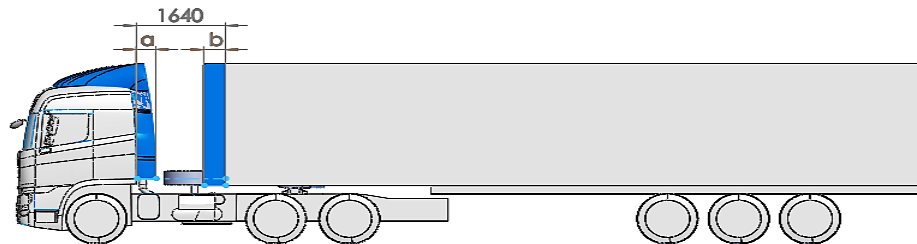


Figura 8. Mejora del deflector de techo y la longitud del estabilizador de vórtice.

Fuente: elaboración propia.

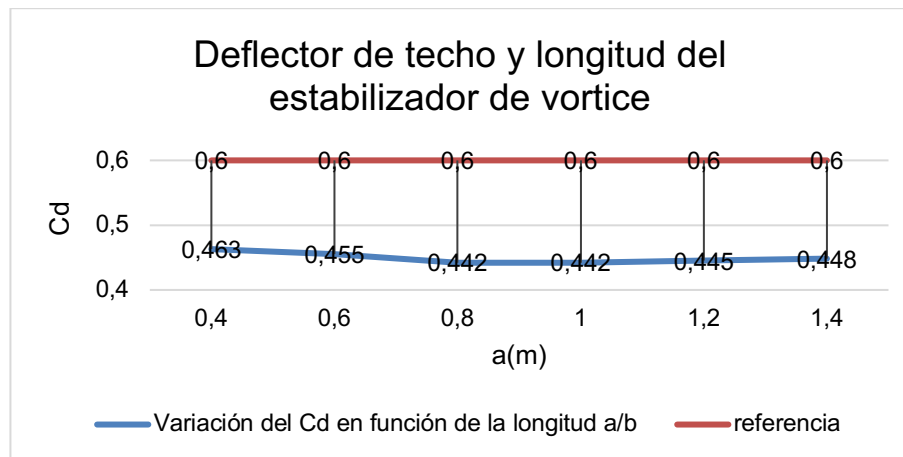


Gráfico 3. Reducción del coeficiente estabilizador en función de la longitud mediante mejora del deflector de techo y vórtice.

Fuente: elaboración propia.

La mejora de la extensión del marco se realiza utilizando la longitud “L” del dispositivo como el “parámetro principal”. Para este caso, se realizarán varias simulaciones modificando la longitud “L” de 0.3 m con un aumento de 0.3 m hasta alcanzar una longitud máxima de 2.1 m. El ángulo entre la cola, costado y la parte superior del dispositivo se fija en 13° siguiendo las recomendaciones de Browand en Gelzer (2011).

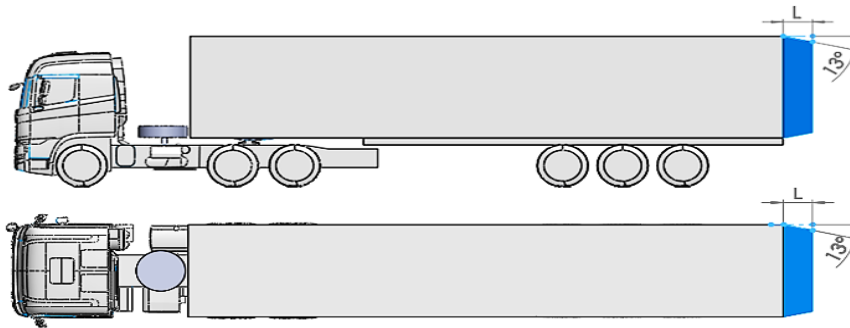


Figura 9. Mejora de la extensión del marco trasero.

Fuente: elaboración propia.

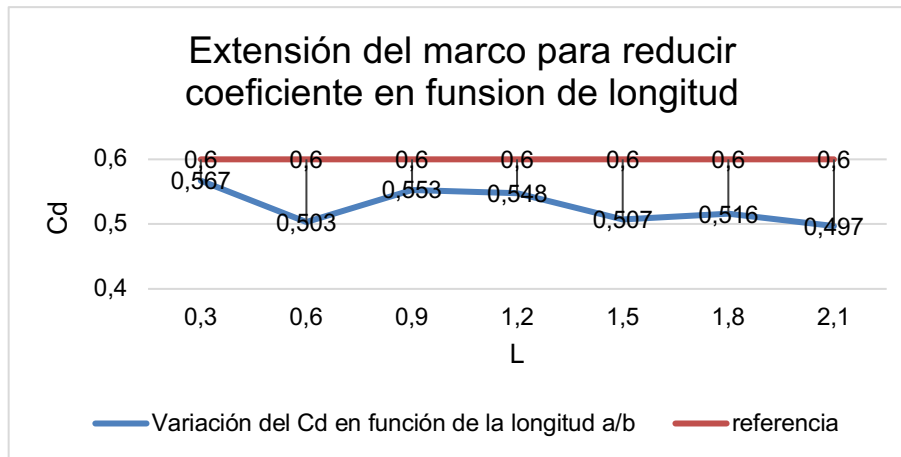


Gráfico 4. Mejora de la extensión del marco para reducir coeficiente en función de longitud.

Fuente: elaboración propia.

Los faldones laterales carenados dieron resultados bastante buenos. Sin embargo, estas configuraciones solo se probaron para obtener una comprensión de su influencia en el arrastre y no se utilizarán en la mejora. Una combinación que formará parte de la mejora es el carenado del deflector del techo con estabilizador de vórtice, ya que hace que el flujo a lo largo del techo se estabilice y sea más simétrico, algo que sigue el flujo hasta la estela de la base. El aire que sale del espacio en la zona superior, a veces

en forma de remolinos, perturba el flujo y crea un comportamiento de flujo inestable. A continuación, se muestra un esquema de cómo se implementarían en el remolque del camión, con las longitudes y ángulos optimizados para obtener la máxima eficiencia y mejorar su coeficiente de arrastre.

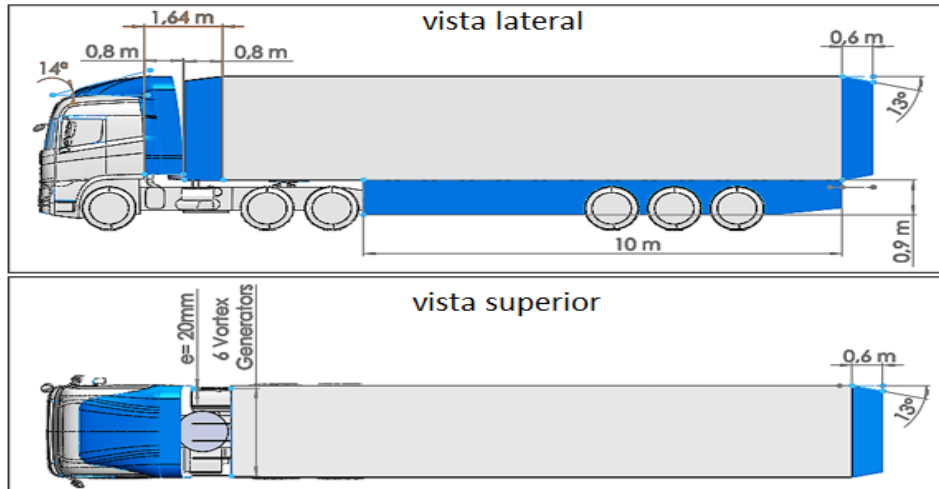


Figura 13. Vista lateral y superior del camión con accesorios aerodinámicos mejorados.

Fuente: elaboración propia.

La siguiente tabla muestra los resultados de las combinaciones y sus ganancias en la reducción de resistencia total en comparación con el modelo de referencia.

Tabla 6. Resultados de la reducción del C_d según la mejora de accesorios aerodinámicos.

| | C_d | % de reducción del C_d |
|--|-------|--------------------------|
| Modelo de referencia | 0.621 | |
| Deflector de techo y estabilizador de vórtice | 0.431 | 30.6 |
| Faldones laterales | 0.582 | 6.3 |
| Extensión del marco trasero | 0.503 | 19.0 |
| Combinación de mejoras | 0.401 | 35.4 |

El nuevo coeficiente de arrastre $C_d = 0.401$ con una eficiencia del 35.4% responde a una reducción de arrastre muy significativa resultado de la implementación de todas las mejoras. La mejora de cada dispositivo y la eficiencia varía del 19 al 28.8% en comparación con el vehículo objetivo en un resumen a continuación.

Tabla 7. Resumen de las mejoras.

| | L(m) | Cd | % Cd reducción |
|---|--------------------------------|-----------|-----------------------|
| Longitud de extensión del marco | 0.6 | 0.503 | 19.0 |
| Número del estabilizador de vórtice | X | | |
| | 6 | 0.447 | 28.0 |
| Ángulo deflector de techo | θ (°) | | |
| | 14 | 0.463 | 25.4 |
| Deflector de techo y longitud de vórtice | a=b (m) | | |
| | 0.8 | 0.442 | 28.8 |

4. CONCLUSIONES

Son verificadas las posibilidades de mejorar la aerodinámica alrededor de un camión para reducir el arrastre, y también hay potencial para explotar en este campo de la aerodinámica para camiones. Los dispositivos de remolque aerodinámicos tienen un gran potencial para reducir la resistencia. En comparación con el tractor, el remolque es mucho más susceptible a las mejoras de resistencia aerodinámica y, por lo tanto, el consumo de combustible puede reducirse sustancialmente mediante el uso de dispositivos de remolque. Al combinar los dispositivos, se pueden lograr mejoras de arrastre aún mayores. Las regiones dominantes de arrastre en un tractor-remolque son la cara frontal del tractor, el espacio entre el tractor y el remolque, la parte trasera y la base del remolque de modo que en ellas se presentan las principales pérdidas de energía, consideradas como regiones críticas. La brecha entre el camión y el remolque no tiene una gran influencia en la capacidad de reducir la resistencia del vehículo en general. Después de llevar a cabo la mejora de cada uno de los dispositivos, como el deflector de techo, el estabilizador de vórtice, la extensión del marco y la adición de un elemento como los archivos

de faldones laterales, se obtuvo una mejora del 35,4% en la reducción de la resistencia en comparación con la referencia. modelo, con un $C_d = 0,621$ del modelo original, el modelo después de la mejora el nuevo coeficiente de arrastre es $C_d = 0,401$.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Algozino, S.** (2019). *Estudio aerodinámico experimental en flujo turbulento de bajo Reynolds sobre alas con movimiento de cabeceo* [Tesis de doctorado]. Universidad Nacional de La Plata. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/83218>
- Doost, A. K., y Zadeh, A. M. S.** (2013). Green nature and reducing of air pollution with vehicle drag coefficient correction. *Advances in Energy Engineering*, 1(2), 28-33. https://www.academia.edu/27932879/Green_Nature_and_Reducing_of_Air_Pollution_with_Vehicle_Drag_Coefficient_Correction
- Englar, R.** (2013). *Advanced aerodynamic devices to improve the performance, economics, handling and safety of heavy vehicles*. SAE Paper. <https://doi.org/10.4271/2001-01-2072>
- Fabian, J.** (2016). *Variable body geometry for goods vehicles: Sustainable transport chains and networks*. Mobilität der Zukunft. <https://graz.pure.elsevier.com/en/publications/variable-body-geometry-for-goods-vehicles-sustainable-transport-c>
- Gelzer, C.** (2011). *Fairing Well - From Shoebox to Bat Truck and Beyond*. NASA Report No. SP-2011-4546.
- Goñi, J. C., y Rojas, M.** (2017). *Manual de combustibles alternativos y tecnología automotriz*. Fondo Editorial Universidad de Lima. <https://www.ulima.edu.pe/publicaciones/manual-de-combustibles-alternativos-y-tecnologia-automotriz>
- Hirz, M.** (2013). A New Approach for the Reduction of Aerodynamic Drag of Long-Distance Transportation Vehicles. *SAE International Journal of Commercial Vehicle*, 6(2), 453-458. <https://doi.org/10.4271/2013-01-2414>

- Hucho, W.-F.** (1998). *Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering* (4.ª ed.). Society of Automotive Engineers.
- Hwang, B. G., Lee, S., Lee, E. J., Kim, J. J., Kim, M., You, D., y Lee, S. J.** (2016). Reduction of drag in heavy vehicles with two different types of advanced side skirts. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 155, 36-46. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.04.009>
- Hyams, D. G., Sreenivas, K., Pankajakshan, R., Nichols, D. S., Briley, W. R., y Whitfield, D. L.** (2011). Computational simulation of model and full scale Class 8 trucks with drag reduction devices. *Computers & Fluids*, 41(1), 27- 40. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2010.09.015>
- IEA.** (2011, 2 de enero). *IEA Freight Truck Fuel Economy Workshop - Challenge Bibendum*. <https://www.iea.org/events/iea-freight-truck-fuel-economy-workshop-challenge-bibendum>
- Lav, C.** (2013). *Three Dimensional CFD Analysis on Aerodynamic Drag Reduction of a Bluff Tractor Trailer Body using Vortex Generators*. SAE. <https://doi.org/10.4271/2013-01-2458>
- Leuschen, J., y Cooper, K.** (2006). *Full-Scale Wind Tunnel Tests of Production and Prototype, Second-Generation Aerodynamic Drag-Reducing Devices for Tractor-trailers*. SAE. <https://doi.org/10.4271/2006-01-3456>
- Lietz, R., Mallick, S., Kandasamy, S., y Chen, H.** (2002). *Exterior airflow simulations using a lattice Boltzmann approach*. SAE Technical Paper 2002-01-0596. <https://doi.org/10.4271/2002-01-0596>
- Lo, K. H., y Kontis, K.** (2016). Flow characteristics over a tractor-trailer model with and without vane-type vortex generator installed. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 159, 110-122. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.10.009>
- Meneses, L. E., y Trejos, M. C.** (2018). *Análisis aerodinámico de generadores de vórtice instalados en el carenado de las ruedas del ultraliviano tipo Trike Aeronation Body Clipper 912 HJ-103*. https://repository.libertadores.edu.co/bitstream/handle/11371/2169/meneses_luis_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Mohamed-Kassim, Z., y Filippone, A.** (2010). Fuel savings on a heavy vehicle via aerodynamic drag reduction. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 15(5), 275-284. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2010.02.010>
- Roy, C. J.** (2005). Review of Code and Solution Verification Procedures in Computational Simulation. *Journal of Computational Physics*, 205(1), 131-156. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2004.10.036>
- SAE.** (2013). Guidelines for Aerodynamics Assessment of Medium and Heavy Commercial Ground Vehicle Using Computational Fluid Dynamics. *SAE Standard J2966*. https://www.sae.org/standards/content/j2966_201309/
- Santana, S. A., Morales, J. F., de la Rosa, A. A., y Álvarez, A.** (2020). Análisis aerodinámico de la carrocería de un ómnibus usando la Dinámica de Fluidos Computacional. *Revista Cubana de Ingeniería*, XI(1), 57-65. https://www.researchgate.net/publication/339956276_Analisis_aerodinamico_de_la_carroceria_de_un_omnibus_usando_la_Dinamica_de_Fluidos_Computacional_Aerodynamic_analysis_of_a_bus_bodywork_using_Computational_Fluid_Dynamics
- Sautié, N. F., Romero, L., Camano, E. B., y Parnás, V. E.** (2020). Determinación de los coeficientes de arrastre y sustentación en un perfil angular de alas iguales con el empleo de simulación numérica. *Ingeniería y desarrollo: revista de la División de Ingeniería de la Universidad del Norte*, 38(1), 66-84. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7467123>
- Schaller, K.** (2010). Commercial vehicles for the future. *ATZ - autotechnology*, 10(4), 10-15.
- Stadler, S., Hirschberg, W., y Hirz, M.** (2012). Potenzial der Aerodynamik zur Steigerung der Transporteffizienz von schweren Nutzfahrzeugen. En *5th Grazer Nutzfahrzeug Workshop* (pp. 1-15). <https://graz.pure.elsevier.com/en/publications/potenzial-der-aerodynamik-zur-steigerung-der-transporteffizienz-v>

- Versteeg, H. K., y Malalasekera, W.** (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method* (2.ª ed.). Pearson Education Limited. http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM702/Versteeg_Malalasekera_2ed.pdf
- Wang, D., Wang, Y., Han, Y., Dang, Y., Fan, D., y Li, L.** (2014). Numerical Simulation of the Influence of Additional Aerodynamic Devices on the Aerodynamic Drag of VanBody Truck. En Society of Automotive Engineers of China (SAE-China) (eds) *Proceedings of SAE-China Congress 2014: Selected Papers. Lecture Notes in Electrical Engineering*, 328. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-45043-7_2
- White, F. M.** (2005). *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill.
- Wood, R.** (2004). Impact of advanced aerodynamic technology on transportation energy consumption. *SAE Technical Paper 2004-01-1306*. <https://doi.org/10.4271/2004-01-1306>
- Wood, R., y Bauer, S.** (2003). Simple and Low-Cost Aerodynamic Drag Reduction Devices for Tractor-Trailer Trucks. *SAE Technical Paper 2003-01-3377*. <https://doi.org/10.4271/2003-01-3377>

