

Propuesta de configuración geométrica en la carrocería de un ómnibus para la mejora aerodinámica y la disminución del consumo de combustible

Geometrical configuration proposal on bus bodywork for aerodynamic improve and fuel consumption decrease

Santiago Amaury Santana-Reyes^{1,*}, José Félix Morales-Leslie², Yusimit Karina Zamora-Hernández³, Yoandrys Morales-Tamayo⁴

¹Universidad de Granma. Departamento de Ingeniería Mecánica. Carretera a Manzanillo, km 17 ½, Peralejo, Bayamo. Granma, Cuba.

²Broadening Your Horizont.SRL. Avenida Centenario, Condominio Navarra #203. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.

³Universidad Técnica de Cotopaxi. Ave. Los Almendros y calle Pujili sector La Virgen. La Maná. Ecuador.

⁴Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Ave. Carlos J. Arosemena 38. Quevedo, Ecuador.

*Autor de correspondencia: ssantanar@udg.co.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 25 julio 2022 **Aceptado:** 7 diciembre 2022 **Publicado:** 14 diciembre 2022

Resumen

El diseño y fabricación de vehículos automotrices terrestres ha tenido una constante evolución desde su surgimiento. En tal sentido, el desempeño aerodinámico de este tipo de vehículos se ha convertido en un factor importante en el análisis integral del desempeño energético de las máquinas automotrices. El objetivo de la presente investigación es establecer una propuesta de configuración geométrica en la carrocería del ómnibus DIANA modelo GD.01C que mejore el desempeño aerodinámico del vehículo con la consecuente disminución del consumo de combustible. Para tal fin, se efectuó un análisis aerodinámico, haciendo uso de la técnica de Dinámica de Fluidos Computacional, en la carrocería con el modelo original y en la carrocería con las modificaciones propuestas. Se demuestra que el modelo modificado presenta un mejor comportamiento de los patrones de flujo del aire, al existir una reducción de los mismos respecto al modelo original; asimismo se constata una apreciable reducción de la fuerza de resistencia aerodinámica entre ambos modelos. El coeficiente de resistencia aerodinámica por presión promedio en el modelo original es de 1,1072 mientras que en el modelo propuesto es de 0,9088. Existe una marcada diferencia en el consumo de combustible del ómnibus, asociada a la resistencia aerodinámica, con el modelo de carrocería original (94,895 L/año) y el ómnibus con el modelo de carrocería propuesto (74,498 L/año). Finalmente, se concluye que la propuesta de configuración geométrica en la carrocería del ómnibus constituye una solución viable para el mejoramiento del desempeño aerodinámico y energético del vehículo.

Palabras clave: Aerodinámica, Consumo de combustible, Carrocería, Ómnibus

Abstract

The design and manufacture of automotive ground vehicles has had a constant evolution since its inception, in this sense, aerodynamic performance of this vehicle type has become an important factor in comprehensive analysis of automotive-machines energy performance. This research objective is to establish a geometric configuration proposal in bodywork of DIANA bus model GD.01C that improve the vehicle aerodynamic performance, with consequent fuel consumption reduction. For this purpose, an aerodynamic analysis was carried out, using the Computational Fluid Dynamics technique, in bodywork with original model and in bodywork with proposed modifications. It is shown that the modified model presents a better airflow patterns behavior, since there is a reduction of them with respect to original model; likewise, an appreciable reduction in the aerodynamic resistance force between both models is verified. The average pressure aerodynamic drag coefficient in original model is 1,1072 while in proposed model it is 0,9088. There is a marked difference in bus fuel consumption, associated to aerodynamic resistance, with original bodywork model (94,895 L/year) and bus with proposed bodywork model (74,498 L/year). Finally, it is concluded that the geometric configuration proposal in bus bodywork constitutes a viable solution for improvement of aerodynamic and energetic performance of vehicle.

Keywords: Aerodynamic, Fuel consumption, Bodywork, Bus

1. Introducción

El uso de los combustibles fósiles en la industria pesada, la industria ligera, la generación de electricidad y el transporte, entre otras esferas, es el principal causante de las emisiones de los gases de efecto invernadero. En ese sentido, Douglas, et al. [1], plantean que existe una necesidad de que todos los ingenieros comprendan el mecanismo que conduce al cambio climático y además estudiar el rango de posibles soluciones ingenieriles que demuestren el mejor potencial para continuar reduciendo las emisiones de efecto invernadero.

Aparejado con el efecto nocivo al ambiente de los combustibles fósiles existe el reto de que, según Mantilla-González, et al. [2], el mundo afronta un progresivo desabastecimiento de combustibles líquidos de origen fósil, entre estos el Diesel, ampliamente utilizado en el transporte de carga y personas [3]. Las industrias en los países desarrollados juegan un importante rol en la contaminación ambiental. En tal caso, la industria automotriz es una de las más importantes, en dichos países, donde las emisiones de dióxido de carbono de los automóviles son muy elevadas [4]. La evolución de esta industria es constante en busca de la seguridad, el rendimiento y el confort de los vehículos de carretera, los cuales son parámetros esenciales. Al mismo tiempo, el bajo consumo de combustible es de crucial importancia para el desarrollo de los países [5].

La aerodinámica tiene una influencia determinante en el diseño de los automóviles, pues gracias a ella se puede reducir el consumo de combustible y mejorar el comportamiento direccional a velocidades elevadas [6]. La fuerza de resistencia aerodinámica de arrastre contribuye a la separación de las regiones del flujo en varias partes del vehículo y especialmente permite la formación de la estela detrás del mismo [7].

Es así que, de acuerdo con Arias-Paz [8] la carrocería es un factor determinante en el comportamiento aerodinámico de los vehículos y ha evolucionado constantemente con el objetivo de conseguir vehículos más veloces, económicos y seguros. En tal sentido, en la fabricación de las carrocerías se emplean dispositivos de reducción de arrastre los cuales son divididos, principalmente, en dos categorías: mecanismos pasivos, cuando no existe la demanda de energía

para su funcionamiento; y mecanismos activos, cuando existe la demanda de energía para su activación y, comúnmente, el empleo de un sistema de control [9].

Existen numerosos autores que establecen análisis de la influencia de la configuración geométrica sobre el comportamiento aerodinámico de los vehículos automotores terrestres, dentro de los que cabe destacar a Cheli, et al. [10], quienes investigan la sensibilidad de las fuerzas aerodinámicas estáticas y dinámicas, que actúan sobre los vehículos de carretera pesados. En la investigación se tomaron en consideración las diversas condiciones de funcionamiento, a partir del empleo de la experimentación en el túnel de viento, haciendo uso de modelos a escala 1:10. De igual manera, Sivaraj, et al. [5], presentan un estudio, haciendo uso de un túnel de viento, de un vehículo terrestre a escala, para evaluar su desempeño aerodinámico. Los autores sugieren un método para reducir la fuerza de arrastre a partir de la eliminación de la región de la estela en la parte trasera del vehículo y la reducción de la presión en la zona frontal.

A pesar de la precisión que ofrece el ensayo en túneles de viento de los modelos de vehículos terrestres, este consume muchos recursos económicos y de tiempo investigativo. Por tanto, las simulaciones numéricas del comportamiento aerodinámico de los vehículos son frecuentemente utilizadas en la industria para evaluar y optimizar el desempeño de los productos automovilísticos [11]. La dinámica de fluidos computacional (CFD) es, una de las técnicas más utilizadas dado a las amplias oportunidades de evaluar disímiles configuraciones geométricas de los modelos, la precisión de los resultados y al bajo costo experimental.

En tal sentido Remache-Coyago, et al. [12], realizan un análisis del flujo de aire de un camión transportador de cemento haciendo uso de la técnica CFD, y toman en consideración las propiedades del aire en diferentes regiones, con la finalidad de investigar su intervención e influencia en los coeficientes de arrastre (CD) y sustentación (CL) y de los factores resistencia aerodinámica y potencia para vencer la resistencia al aire. Asimismo, la técnica CFD es utilizada por Castillo, et al. [13], en su investigación, los autores persiguen identificar el comportamiento aerodinámico en la reducción del coeficiente CD, mediante la variación de accesorios en un tractor-camión y en su remolque con el fin de identificar las posibles ganancias aerodinámicas. En la investigación se demuestran la posibilidad que ofrece el Diseño Asistido por Computadoras (CAD, por sus siglas en inglés) en lo concerniente a la modificación de la geometría del modelo tridimensional con el propósito de evaluar el comportamiento aerodinámico del vehículo a partir de la variación geométrica.

La ventaja de los programas informáticos CAD, antes mencionada, es ampliamente explotada por Quintino-Palhães, et al. [9], en la validación de un modelo computacional con el fin de que sea empleado en el estudio del efecto que tienen los chaflanes de la carrocería sobre el comportamiento aerodinámico de los vehículos. En ese mismo orden, Vignesh, et al. [14] estudian los contornos de presión en la carrocería de un automóvil con el fin de optimizar la inclinación de los parabrisas frontales y traseros en aras de disminuir el coeficiente CD. En esta investigación las variaciones de la geometría del vehículo fueron realizadas en un entorno CAD y los modelos fueron estudiados a partir del CFD.

La fuerza de arrastre se encuentra entre las mayores causas de contribución al incremento del consumo de combustible de los vehículos. Es por eso que Mukut, et al. [15], han estudiado resultados relevantes de investigaciones experimentales y numéricas concernientes a la reducción del coeficiente CD; a partir de varias técnicas de control: mecanismos pasivos, activos y la combinación de estas; las cuales tienen como objetivo retardar o suprimir la separación del fluido en la zona trasera de los vehículos.

Mohamed-Kassim, et al. [16], de igual manera analizan las potencialidades del ahorro de combustible a partir del reacondicionamiento de dispositivos de reducción de la fuerza de arrastre en vehículos pesados en condiciones realistas de carretera. Estos autores, igualmente, consideran que el comportamiento aerodinámico del vehículo influye decididamente sobre el consumo de combustible del mismo.

A pesar de las consideraciones anteriores, Huch, et al. [17] plantea que, la forma de un vehículo terrestre no es determinada en primera instancia por la necesidad de generar un efecto aerodinámico específico, como por ejemplo los aviones que son diseñados para generar la fuerza de sustentación. Por el contrario, la forma de los vehículos terrestres se determina primeramente por el criterio de funcionalidad, economía y por último pero no menos importante, por la estética. Las características aerodinámicas no son usualmente generadas, son consecuencias del diseño de la carrocería.

En ese caso se encuentra el ómnibus DIANA modelo GD.01C, el cual presenta una geometría aerodinámicamente desfavorable de la carrocería, la cual es susceptible a mejoras. El objetivo de la presente investigación es establecer una propuesta de configuración geométrica en la carrocería del ómnibus DIANA modelo GD.01C, que permita la mejora del desempeño aerodinámico del vehículo y que, a su vez, implique la disminución del consumo de combustible.

2. Materiales y Métodos

El ómnibus DIANA modelo GD es un vehículo diseñado para la transportación de personas mediante vías urbanas. Generalmente es usado en los servicios de transporte público urbano e interurbano, con trayecto fijo (Ver figura 1). En su construcción se utiliza un bastidor YUTONG ZK6710CDE9A. Su capacidad es de 25 pasajeros sentados y 18 parados. Esta investigación se realizó en las áreas de la Empresa Provincial Integral de Transporte Granma situada en la Carretera Central de Cuba en el kilómetro 841.



Fig.1 Ómnibus DIANA modelo GD.01C

La configuración de la carrocería del modelo original del ómnibus evidencia la necesidad de dirigir las acciones de rediseño hacia la misma [18], en aras de reducir la resistencia aerodinámica del vehículo (R_a) y fomentar, por tanto, su funcionamiento adecuado.

Obtención del modelo CAD de la propuesta de diseño de la carrocería del ómnibus

Las dimensiones realizadas, en la investigación de Santana-Reyes, et al. [19], del ómnibus DIANA modelo GD.01C, permitieron obtener el modelo CAD del vehículo. En esta investigación se proponen cambios en la carrocería del ómnibus con la finalidad de mejorar su comportamiento aerodinámico partiendo de la realización de modificaciones a la carrocería del modelo original del vehículo. En ese sentido, un cambio importante es el abatimiento de la cara frontal al aumentar el ángulo hasta 36° (Ver Figura 2).

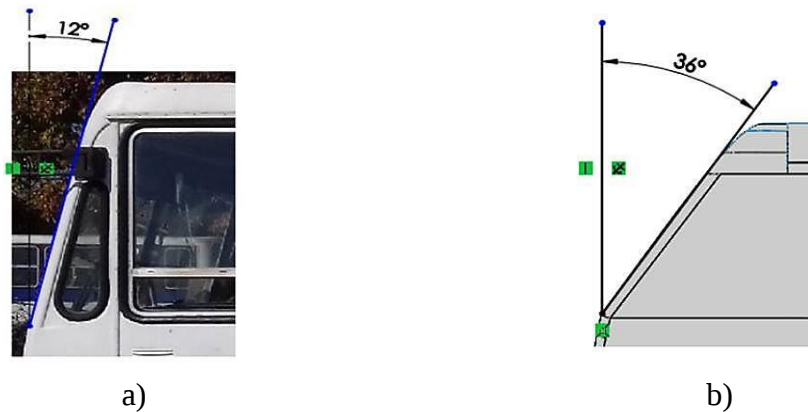


Fig.2 Ángulo de inclinación de la cara frontal; a) Modelo original y b) Modelo propuesto.

Asimismo, se propone la reducción del área de la sección transversal en ambos lados de la zona superior (Ver Figura 3). De esta manera se reduce el área de contacto frontal del ómnibus con el flujo de aire. El área frontal del modelo original es de $6,78 \text{ m}^2$ mientras en el modelo propuesto, dicha área tiene un valor de $6,67 \text{ m}^2$.



Fig.3 Sección transversal del ómnibus; a) Modelo original y b) Área retirada en el modelo propuesto.

En la Figura 4a) se muestra el modelo CAD del ómnibus DIANA modelo GD.01C con los cambios aerodinámicos propuestos a la carrocería. Mientras que, en la Figura 4b) se presenta el modelo CAD del ómnibus original. Los cambios geométricos en la carrocería propuestos, no tienen una incidencia significativa sobre el proceso de fabricación y ensamblaje de la carrocería del ómnibus, pues estos no conllevan al empleo de elementos extras (como deflectores, alerones, parabrisas con geometría especial, entre otros) o a la reconfiguración total de los elementos estructurales de soporte de la carrocería.

Resistencia aerodinámica en vehículos automotores terrestres

La resistencia aerodinámica es generada por dos fuentes: una es el flujo de aire que circula alrededor de la carrocería del vehículo, y la otra es el flujo de aire que circula a través del sistema del radiador del motor y en el interior del vehículo. De las dos fuentes, la primera es la dominante, pues la misma ocupa más del 90 % del total de la resistencia aerodinámica de un vehículo. El flujo de aire externo genera una presión normal y tensiones cortantes en la carrocería de los vehículos [19].

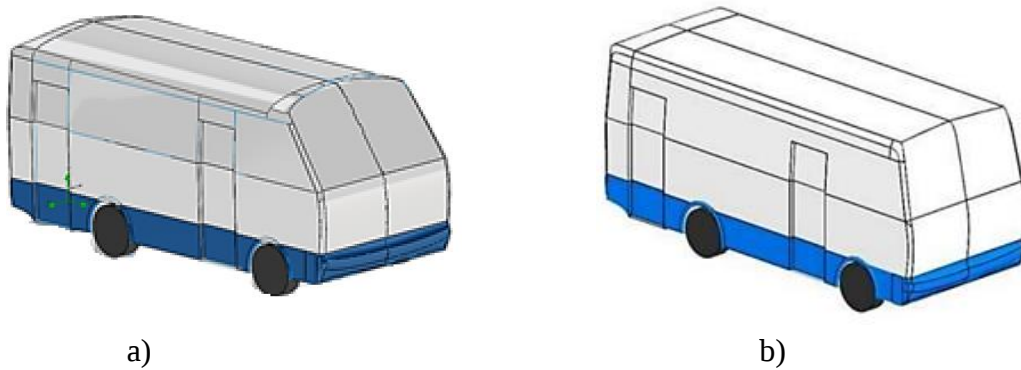


Fig.4 Modelo CAD del ómnibus DIANA modelo GD.01C; a) Modelo con los cambios aerodinámicos propuestos a la carrocería y b) Modelo original.

La resistencia aerodinámica (R_a) se expone en la Ecuación 1, dicha ecuación comprende dos componentes, comúnmente llamados fuerza de arrastre por presión (R_{ap}), determinada en la Ecuación 2 y fuerza de arrastre por fricción (R_{af}), determinada en la Ecuación 3 [20].

$$R_a = R_{ap} + R_{af} \quad (1)$$

$$R_{ap} = \frac{\rho \cdot C_{Dp} \cdot A_f \cdot V_r^2}{2} \quad (2)$$

Donde:

ρ = Densidad del aire (kg/m^3).

C_{Dp} = Coeficiente aerodinámico de resistencia por presión.

A_f = Área frontal del vehículo (m^2).

V_r = Velocidad del vehículo relativa al viento (km/h).

$$R_{af} = \frac{\rho \cdot C_{Df} \cdot 2A_l \cdot V_r^2}{2} \quad (3)$$

Siendo:

C_{Df} = Coeficiente aerodinámico de resistencia por fricción.

A_l = Área lateral y superior del vehículo (m^2).

La determinación de los coeficientes C_{Dp} y C_{Df} , en el ómnibus objeto de estudio, se presenta en la investigación de Santana-Reyes, et al. [18], los cuales fueron calculados a partir de la técnica CFD.

Consumo de combustible vinculado al rendimiento aerodinámico del vehículo

Se consideran para el cálculo del consumo de combustible del ómnibus DIANA modelo GD.01C una serie de ecuaciones, propuestas por Çengel, et al. [20], a partir de las cuales es posible determinar el combustible consumido. La Ecuación 4 caracteriza el trabajo realizado por la máquina automotriz para vencer la fuerza de resistencia aerodinámica.

$$W_a = R_a \cdot D_{rec} \quad (4)$$

Donde:

D_{rec} = Relación entre la distancia recorrida y el tiempo (km/año).

La Ecuación 5 caracteriza la potencia consumida por la máquina automotriz, asociada a la resistencia aerodinámica.

$$N_{cons} = \frac{W_a}{\eta_{motor}} \quad (5)$$

Siendo:

η_{motor} = Rendimiento del motor.

La cantidad de combustible consumido se expresa en la Ecuación 6.

$$C_{comb} = \frac{N_{cons}/P_{cal}}{\rho_{comb}} \quad (6)$$

Donde:

P_{cal} = Poder calorífico del combustible (kJ/kg).

ρ_{comb} = Densidad del combustible (kg/L).

Modelo matemático para la simulación numérica por CFD

La simulación numérica, a partir del CFD, del flujo de aire alrededor de la carrocería del ómnibus tiene como basamento físico-matemático el sistema de ecuaciones de Navier-Stokes, dichas ecuaciones, según Blazek [21], describen el flujo de masa, momento y energía a través del límite de un volumen en un espacio dado. El balance de masa se describe según la Ecuación 7.

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(u)}{\partial x} + \frac{\partial(pv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho)}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

Donde:

t = Tiempo (s).

x = Distancia (m).

ρ = Densidad (kg/m³).

U = Velocidad (m/s).

El balance de momento se describe de acuerdo a la Ecuación 8.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j U_i) = \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial \rho}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + \rho g_i \quad (8)$$

Siendo:

μ = Velocidad cinemática (m²/s)

g = Aceleración de la gravedad (m/s²).

El balance de la energía se determina a partir de la Ecuación 9.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho C_p U_j T) = \frac{\partial \rho}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + Q \quad (9)$$

Donde:

C_p = Calor específico (J/K).

T = Temperatura (°C).

λ = Conductividad térmica (W/(m·°K))

Q = Magnitud de la fuente de calor (°C).

Condiciones de frontera y definición del mallado en la simulación por CFD

Las condiciones de frontera en la simulación, por el CFD, del flujo externo en la carrocería con propuesta de diseño modificada es igual al establecido en la investigación de Santana-Reyes, et al. [18], para de esta forma establecer un análisis comparativo del comportamiento aerodinámico del ómnibus DIANA modelo GD.01C, atendiendo a la configuración geométrica de la carrocería original y a una tipología de carrocería con modificaciones.

- El análisis se realiza a velocidades desde 60 km/h hasta 100 km/h con paso de 10 km/h.
- La densidad del aire es constante con un valor de 1,164 kg/m³ a una temperatura de 30 °C y la presión es de 1 atm.
- El número de Reynolds, que caracteriza el flujo de aire alrededor del vehículo, se encuentra entre 7,05·10⁶ y 1,18·10⁷; según las velocidades analizadas y teniendo como referencia dimensional la longitud total de la carrocería (6 763,41 mm).
- La trayectoria del desplazamiento del vehículo es en línea recta.
- El valor de energía cinética y su tasa de disipación se describe a partir del modelo k-ε; para el flujo externo es de 0,1 % con una longitud de 0,35 m.

El dominio computacional define el volumen que será analizado numéricamente, en el cual se encuentra el modelo CAD del ómnibus DIANA modelo GD.01C, las dimensiones de dicho dominio se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Dimensiones del dominio computacional del ómnibus a partir del sistema de coordenadas particular

Coordenadas	Dimensiones (mm)
X	8 000
-X	6 000
Y	3 000
-Y	200
Z	2 000
-Z	2 000

La malla empleada por el complemento FlowSimulation del programa informático SolidWorks 2018 es volumétrica (ver Figura 5). El dominio computacional es dividido en partes por los planos de la malla.

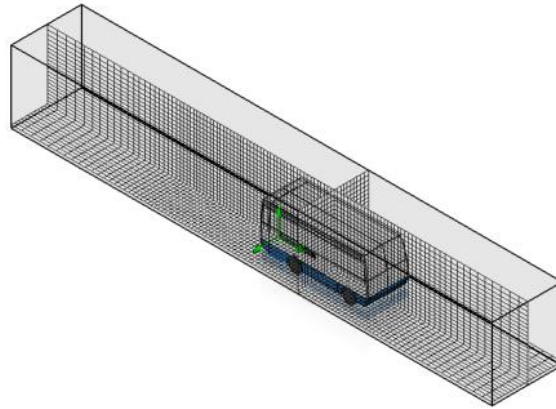


Fig.5 Mallado volumétrico del dominio computacional.

3. Resultados y Discusión

En la Figura 6 se observa que existe formación de torbellinos en las regiones adyacentes a la carrocería, especialmente en la zona trasera, cuando el vehículo se desplaza a una velocidad constante de 90 km/h (El comportamiento antes descrito es similar en todas las evaluaciones realizadas a distintas velocidades de desplazamiento). El máximo valor de las presiones es de 102 212,62 Pa, la presión media en la superficie frontal tiene un valor de 101 769,56 Pa.



Fig.6 Patrón de flujo de aire alrededor de la carrocería del ómnibus del modelo original a una velocidad de desplazamiento de 90 km/h

En el modelo con modificaciones en la carrocería (Ver Figura 7) se aprecia la disminución de la formación de estos torbellinos, tanto en las zonas aledañas a las ruedas delanteras como en la zona trasera del ómnibus, lo cual es indicativo de un mejor desempeño aerodinámico por parte de este modelo, a una velocidad de desplazamiento constante de 90 km/h.

El valor máximo de las presiones es de 102 213,72 Pa en la cara frontal, asimismo, debido a la acción conjugada del abatimiento de la cara frontal y de la disminución de la sección transversal, con respecto al modelo original, se obtiene un valor de presión media de 101 650,17 Pa, lo cual constituye un indicador efectivo de la reducción de la R_a . Aunque existe un ligero aumento de la presión máxima, con respecto al modelo original, este fenómeno está dado por la reducción del área frontal de contacto inicial directo con la masa de aire.



Fig.7 Patrón de flujo de aire alrededor de la carrocería del ómnibus del modelo con modificaciones a una velocidad de desplazamiento de 90 km/h

En la Tabla 2 se muestra el comportamiento de la fuerza de arrastre por presión (R_{ap}), la cual incide en el área proyectada de la cara frontal del vehículo, y de la fuerza de arrastre por fricción (R_{af}); ambas fuerzas fueron determinadas a partir de la técnica CFD, teniendo en cuenta la velocidad de traslación del ómnibus DIANA modelo GD.01C, atendiendo a la configuración de la carrocería original y a la configuración propuesta en esta investigación.

Es posible apreciar el carácter directamente proporcional de la velocidad de traslación del vehículo y de las fuerzas R_{ap} y R_{af} . Igualmente, se destaca el aumento de la diferencia, entre ambos modelos de la carrocería del vehículo, a medida que aumenta la velocidad de traslación.

Tabla 2. Relación de la velocidad con respecto a la R_{ap} y R_{af} de los modelos de la carrocería

Velocidad de traslación (km/h)	R_{ap} del modelo original (N)	R_{ap} del modelo modificado (N)	Diferencia del R_{ap} entre los modelos (N)	R_{af} de ambos modelos (N)
60	1 245,809	999,10	252,899	6,37
70	1 696,194	1351,605	344,589	8,74
80	2 213, 767	1 722,356	491,411	11,35
90	2 801,250	2 181,128	620,122	15,10
100	3 455,948	2 692,150	763,798	17,25

Es importante destacar que la modificación de la carrocería del ómnibus no tuvo influencia en los valores de la R_{af} , debido a que esta magnitud presenta una alta dependencia de la rugosidad superficial del material, el cual en esta investigación no fue variado y presenta el valor detectado en la investigación de Santana-Reyes, et al. [18] para este tipo de ómnibus.

En la Tabla 3 se presenta los valores de R_a , obtenidos a partir de la Ecuación 1, de ambos modelos del ómnibus DIANA ante distintas velocidades de desplazamiento, siendo apreciable la diferencia existente entre dichos modelos.

Tabla 3 Valores de R_a de los modelos de la carrocería del vehículo estudiado

Velocidad de traslación (km/h)	R_a del modelo original (N)	R_a del modelo modificado (N)	Diferencia entre los modelos (N)
60	1 252,179	1 005,470	246,709
70	1 704,934	1 360,345	344,589
80	2 225,117	1 733,706	491,411
90	2 816,350	2 196,228	620,122
100	3 473,198	2 709,400	763,798

Validación de los resultados

El tamaño de la celda del dominio computacional es reducido a la mitad en el estudio del modelo de la carrocería modificada del ómnibus, atendiendo a las consideraciones propuestas por Santana-Reyes, et al. [18]. El error relativo entre los valores de presión máxima sobre el modelo modificado fue de 0,68 %, este comportamiento confirma que los resultados presentados son válidos y razonables, pues no sufrieron cambios significativos al reducir el tamaño de los elementos en el mallado. La convergencia del mallado fue realizada a partir de los resultados obtenidos de la presión máxima en el ómnibus cuando este se desplaza a 90 km/h, aunque es importante destacar que las evaluaciones realizadas a diferentes velocidades de desplazamiento no presentan diferencias en los resultados que superen el 5 %.

Relación entre la resistencia aerodinámica y el consumo de combustible

El consumo de combustible se establece a partir del recorrido de ida y retorno del ómnibus desde la ciudad de Bayamo hasta la sede central de la Universidad de Granma, la cual se encuentra a 17,5 km de distancia. En esta investigación se asume que la distancia recorrida por el ómnibus es de 10 000 km/año.

El combustible empleado por el ómnibus es el diésel, que de acuerdo con Tompkins, et al. [22] las propiedades genéricas más destacadas están: el poder calorífico (42,89 MJ/kg) y la densidad (845 kg/m³). En el análisis del consumo de combustible diésel del ómnibus se toma en consideración que, el rendimiento del motor es de 40 %, este valor se encuentra dentro del rango referido por Huilca-Álvarez, et al. [23], para el rendimiento de los motores térmicos de combustión interna que funcionan con combustible diésel.

En las Tablas 4 y Tabla 5 se presenta el trabajo realizado, la energía y la cantidad de combustible consumidos por la máquina automotriz estudiada para vencer la fuerza de resistencia aerodinámica con ambas tipologías de carrocería analizadas.

Tabla 4. Trabajo realizado, energía y cantidad de combustible consumidos por el ómnibus DIANA con el modelo de carrocería original

Velocidad de traslación (km/h)	Resistencia aerodinámica (N)	Energía consumida (W)	Combustible consumido (L/año)
60	1 252,179	992,0	51,788
70	1 704,934	1 351	70,520
80	2 225,117	1 763	92,035
90	2 816,350	2 231	116,481
100	3 473,198	2 752	143,653

En el análisis de los resultados realizado es apreciable que, a medida que aumenta la velocidad de traslación existe un aumento de la resistencia aerodinámica del vehículo, independientemente de la configuración geométrica de la carrocería, por lo cual se produce un incremento de la energía y del combustible consumido.

Por otro lado, existe una evidente diferencia en la respuesta aerodinámica del vehículo con geometría de la carrocería modificada con respecto al vehículo con el modelo de carrocería original; en este último se observan mayores valores de consumo de trabajo, energía y combustible. Este comportamiento es originado por la desfavorable configuración geométrica de la carrocería del modelo original, la cual debe desplazar una mayor masa de aire, en relación con el modelo del ómnibus con la carrocería modificada, en función de lograr el movimiento del vehículo.

Tabla 5. Trabajo realizado, la energía y la cantidad de combustible consumidos por el ómnibus DIANA con el modelo de carrocería modificada

Velocidad de traslación (km/h)	Resistencia aerodinámica (N)	Energía consumida (W)	Combustible consumido (L/año)
60	1 005,470	796,553	41,589
70	1 360,345	1 078	56,273
80	1 733,706	1 373	71,712
90	2 196,228	1 740	90,843
100	2 709,400	2 146	112,073

Determinación del coeficiente C_{Dp}

El coeficiente C_{Dp} constituye el elemento de mayor importancia en el análisis de la influencia de la configuración geométrica de la carrocería de los vehículos sobre su comportamiento aerodinámico. Con la Ecuación 10, que surge a partir del despeje de la Ecuación 2, es posible determinar el valor del coeficiente C_{Dp} en ambos modelos.

$$\begin{Bmatrix} C_{Dp} \\ C_{Dp} \\ C_{Dp} \\ C_{Dp} \\ C_{Dp} \end{Bmatrix} = 2 \cdot \begin{Bmatrix} Rap_{60} \\ Rap_{70} \\ Rap_{80} \\ Rap_{90} \\ Rap_{100} \end{Bmatrix} \div \rho \cdot A_f \cdot \begin{Bmatrix} v_{60}^2 \\ v_{70}^2 \\ v_{80}^2 \\ v_{90}^2 \\ v_{100}^2 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

En la Tabla 6 se presenta la relación entre la velocidad de desplazamiento del ómnibus y el coeficiente C_{Dp} para el modelo con la carrocería original y el modelo con la carrocería modificada. El promedio de los valores determinados del coeficiente C_{Dp} es de 1,1072 y de 0,9088 para la carrocería con el modelo original y para la carrocería con el modelo propuesto respectivamente.

Tabla 6. Relación entre la velocidad de desplazamiento del ómnibus y el coeficiente C_{Dp} de ambos modelos de carrocería

Velocidad de desplazamiento (km/h)	C_{Dp} del modelo original	C_{Dp} del modelo modificado
60	1,108	0,926
70	1,108	0,921
80	1,107	0,898
90	1,107	0,898
100	1,106	0,898

Es posible apreciar que la velocidad de traslación tiene poca incidencia en el coeficiente C_{Dp} ; no obstante, se observa que la configuración geométrica de la carrocería influye sobre el valor de dicho coeficiente. Este último planteamiento es corroborado por Wong [19] y Szczepaniak, et al. [24], quienes soportan su metodología de cálculo de la R_a en los vehículos automotores, a partir de la construcción de monogramas que relacionan la configuración geométrica de la carrocería con el coeficiente C_{Dp} . Asimismo, Castillo, et al. [13] confirma la marcada influencia que tiene la configuración geométrica de la carrocería del vehículo automotor terrestre sobre el coeficiente C_{Dp} , tanto para vehículos de gran envergadura, como para, según Vignesh, et al. [14], vehículos ligeros. En la Tabla 7 se presenta la relación entre la velocidad de desplazamiento y el consumo de combustible anual de los modelos del vehículo analizados.

Tabla 7. Relación entre la velocidad de desplazamiento del ómnibus y el consumo de combustible de ambos modelos de carrocería

Velocidad de desplazamiento (km/h)	Consumo de combustible del modelo original (L/año)	Consumo de combustible del modelo modificado (L/año)	Diferencia (L/año)
60	51,788	41,589	10,199
70	70,520	56,273	14,247
80	92,035	71,712	20,323
90	116,481	90,843	25,638
100	143,653	112,073	31,580

En la Figura 8 se muestra la relación existente entre el consumo de combustible, producto de la necesidad de vencer la R_a y la velocidad de traslación del vehículo automotor. Se observa que, existe una marcada diferencia en el consumo de combustible del ómnibus con el modelo de carrocería original (mayor consumo) y el ómnibus con el modelo de carrocería propuesto (menor consumo), dicha diferencia se acrecienta a medida que aumenta la velocidad de traslación.

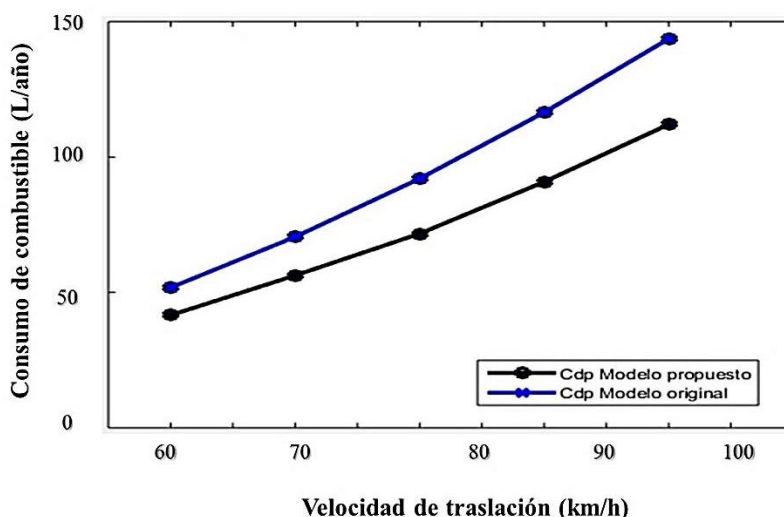


Fig.8 Relación entre el consumo de combustible del vehículo automotor y la velocidad de traslación para vencer la R_a

El valor promedio del consumo de combustible anualmente, atendiendo a las velocidades de desplazamiento, para el modelo con la carrocería original es de 94,895 L/año; mientras que para el modelo con la carrocería modificada es de 74,498 L/año. En este punto es apreciable el gasto en que se incurre producto de un diseño aerodinámico poco favorable de la carrocería del ómnibus y la necesidad que existe de implementar los cambios a la carrocería propuestos.

4. Conclusiones

Se estableció una propuesta de configuración geométrica en la carrocería del ómnibus DIANA modelo GD.01C, que posibilita el mejor desempeño aerodinámico del vehículo, pues se constata la reducción de las regiones de turbulencia en el patrón de flujo alrededor de la carrocería modificada. El modelo original del ómnibus tiene un desempeño aerodinámicamente desfavorable, respecto al modelo propuesto en esta investigación, pues este último presenta un mejor valor del coeficiente aerodinámico de resistencia por presión promedio (0,9088). El consumo de combustible asociado a la fuerza de resistencia aerodinámica del modelo del ómnibus con la carrocería original es de 94,895 L/año; mientras que para el modelo con la carrocería modificada es de 74,498 L/año.

Referencias

1. Douglas, J. F., Gasiorek, J. M., Swaffield, J. A., Jack, L. B., *Fluid Mechanics*. 2005. Inglaterra: Pearson Education Limited. ISBN: 978-0-13-129293-2.
2. Mantilla-González, J. M., Roncancio-Gomez, J., Galeano-Urueña, C. H., *Desempeño y emisiones de un motor de combustión interna con combustible dual Diesel-Gas natural*. Ingeniería Energética, 2015. **36**(1): p. 27-37.
3. Colectivo de Autores. *Biodiesel. Produccion y Uso*, 2021. Editorial Pastos y Forrajes ISBN: 978-959-7138-48-8.
4. Ehsani, M., Ahmadi, A., Fadaei, D., *Modeling of vehicle fuel consumption and carbon dioxide emission in road transport*. Renewable Energy Reviews, 2016. **53**: p. 1638-1648. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.062>
5. Sivaraj, G., Parammasivam, K. M., Suganya, G., *Reduction of aerodynamic drag force for reducing fuel consumption in road vehicle using basebleed*. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2018. **11**(6): p. 1489-1495. DOI: <https://doi.org/10.18869/acadpub.jafm.73.249.29115>

6. Fraija, I., *Estudio de la aerodinámica en los vehículos*. Prospectiva, 2006. **4**(2): p. 66-70.
7. Bellman, M., Agarwal, R., Naber, J., Chusak, L., *Reducing energy consumption of ground vehicles by active flow control*. in *4th International Conference on Energy Sustainability*, Phoenix, Arizona, Estados Unidos de América 2010. 1-9.
8. Arias-Paz, M., *Manual de automóviles*. 2004. Madrid, España: Cie Inversiones Editoriales Dossat 2000 S.L. ISBN: 84-89656-58-4.
9. Quintino-Palhares, M., Gonçalves, V. H. P., Rodrigues, M. S. A., Palhares, J. H. Q., Huebner, R., Souza, P.G.D., *Simulação numérica da influência de um mecanismo passivo de controle de arrasto sobre a aerodinâmica do corpo de Ahmed com traseira quadrada em escala industrial*. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, 2020. **24**(2): p. 15-32.
10. Cheli, F., Corradi, R., Sabbioni, E., Tomasini, G., *Wind tunnel tests on heavy road vehicles: Cross wind induced loads-Part 1*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2011. **99**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2011.07.009>
11. Ljungskog, E., Sebben, S., Broniewicz, A., *Inclusion of the physical wind tunnel in vehicle CFD simulations for improved prediction quality*. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2020. **197**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.104055>
12. Remache-Coyago, A., Tipanluisa-Sarchi, L., Salvador-Jiménez, J., Erazo-Laverde, W., *Análisis aerodinámico regional mediante CFD de un semirremolque cisterna para transporte de cemento*. Aporte Santiaguino, 2015. **8**(2): p. 193-206. DOI: <https://doi.org/10.32911/as.2015.v8.n2.225>
13. Castillo, A., Tenicota, A., Nuela, S., *Comportamiento aerodinámico en la reducción del arrastre mediante la variación de accesorios en un tractocamión*. 3C Tecnología, 2020. **9**(4): p. 17-43.
14. Vignesh, S., Gangad, V.S., Maheswarreddy, V.J., Krishna, A., Mukkamala, Y.S., *Windscreen angle and Hood inclination optimization for drag reduction in cars*. Procedia Manufacturing, 2019. **30**: p. 685-692. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.062>
15. Mukut, A.N.M.M.I., Abedin, M.Z., *Review on aerodynamic drag reduction of vehicles*. International Journal of Engineering Materials and Manufacture, 2019. **4**(1): p. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.26776/ijemm.04.01.2019.01>
16. Mohamed-Kassim, Z., Filippone, A., *Fuel savings on a heavy vehicle via aerodynamic drag reduction*. Transportation Research, 2010: p. 275-284. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2010.02.010>
17. Huch, W.-H., Sovran, G., *Aerodynamics of road vehicles*. Annual Review of Fluid Mechanics, 1993. **25**(1): p. 485-537.
18. Santana-Reyes, S.A., Morales-Leslie, J.F., De La Rosa-Andino, A.A., Alvarez-Cabral, A., *Análisis aerodinámico de la carrocería de un ómnibus usando la Dinámica de Fluidos Computacional*. Revista Cubana de Ingeniería, 2020. **XI**(1): p. 57-65.
19. Wong, J. Y., *Theory of ground vehicles*. 2001. New York: John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 0-471-35461-9.
20. Çengel, Y., Cimbala, J., *Fluid mechanics: fundamentals and applications*. 2017. New York: McGraw-Hill Education. ISBN: 978-1-259-69653-4.
21. Blazek, J., *Computational Fluid Dynamics: Principles and applications*. 2001. Kidlington, UK.: Elsevier Science, Ltd. ISBN: 008-0430090.
22. Tompkins, B.T., Song, H., Bittle, J.A., Jacobs, T.J., *Efficiency considerations for the use of blended biofuel in diesel engines*. Applied Energy, 2012. **98**: p. 209-218. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.025>
23. Huilca-Álvarez, A., Haro-Acosta, S., *Análisis de la eficiencia de un motor diésel, mediante el estudio estadístico de fallos de filtros de combustible*. Ciencia Digital, 2019. **3**(3): p. 431-445. DOI: <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i3.660>
24. Szczepaniak, C., Aragón-Marrero, R., *Teoría del automóvil*. 1992. La Habana: Pueblo y Educación.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Grupo de Soluciones Ingenieriles Asistidas por Computadora (SIAC) del Departamento de Ingeniería Mecánica perteneciente a la Universidad de Granma y a la Unidad Empresarial de Base Ómnibus Urbanos Bayamo

Conflicto de Intereses

Los autores declaramos que no existe conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Santiago Amaury Santana-Reyes. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0059-0990>

Participó en el diseño de la investigación, en el análisis numérico, la recopilación e interpretación de los datos y en la redacción y edición del manuscrito.

José Félix Morales-Leslie. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9442-4394>

Participó en el diseño de la investigación, la recopilación e interpretación y en la edición del manuscrito.

Yusimit Karina Zamora-Hernández. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1762-1087>

Participó en el diseño de la investigación, introducción y análisis de los resultados. Redacción del manuscrito.

Yoandrys Morales-Tamayo. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4222-6449>

Participó en el diseño de la investigación, revisión bibliográfica y análisis de los resultados.