

Análisis aerodinámico de la carrocería de un ómnibus usando la Dinámica de Fluidos Computacional

Aerodynamic analysis of a bus bodywork using Computational Fluid Dynamics

Santiago Amaury Santana Reyes^{1,*}, José Félix Morales Leslie², Alain Ariel de la Rosa Andino¹, Alexis Alvarez Cabrales¹

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

²Empresa Hidrogreen. Del Retoño #73, San Diego, Texcoco de Mora, Estado de México. México

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

Resumen

La transportación de personas es una actividad primordial en el desarrollo social y económico de los países, especialmente los que se encuentran en vías de desarrollo. El objetivo de esta investigación consistió en analizar el comportamiento aerodinámico de la carrocería del ómnibus DIANA modelo GD.01C, haciendo uso de la Dinámica de Fluidos Computacional. Para ello fue necesario obtener el modelo digital de la carrocería efectuando mediciones de forma directa e indirecta. Dentro de los principales resultados se destacan los patrones de flujo del aire alrededor de la carrocería los que revelaron que existen deficiencias aerodinámicas en su diseño; todo lo cual es corroborado al determinarse el coeficiente aerodinámico de resistencia por presión, que se encuentra alejado del rango reportado por la literatura especializada, al haberse obtenido un valor de 1,107. Finalmente, se concluye que existe la necesidad de rediseñar la estructura de la carrocería del ómnibus para mejorar su desempeño aerodinámico.

Palabras clave: Bus, Resistencia aerodinámica, Dinámica Computacional de Fluidos

Abstract

The people's transportation is a primordial activity in the social and economic development of the countries; especially those that are in ways of develop. The investigation objective consisted on evaluating the bodywork aerodynamic behavior of the bus DIANA model GD.01C, making use of the Computer Fluid Dynamics. For it was necessary to obtain the bodywork digital model making measures in a direct and indirect ways. Among the main results are the airflow patterns around the bodywork, which revealed that there are aerodynamic deficiencies in its design. All of which is corroborated when is determined the pressure resistance aerodynamic coefficient that is far from the range reported by the specialized literature, when having been obtained a value of 1,107. Finally, it is concluded that there is a need of redesign the bus bodywork structure to improve its aerodynamic performance.

Keywords: Bus, aerodynamic resistance, Computational Fluid Dynamics

1. Introducción

El transporte es una actividad del sector terciario, entendida como el desplazamiento de objetos o personas de un lugar a otro en un vehículo que utiliza una determinada infraestructura [1]. El transporte de pasajeros intermunicipal estatal en Cuba tiene como prioridad el encargo social [2], por lo tanto, esa es una de las principales razones por las que el país invierte recursos económicos en el desarrollo de infraestructura vial, tecnología e investigaciones asociadas al proceso de transportación.

Los vehículos deportivos utilitarios, camiones, furgones y autobuses son ejemplos de grandes vehículos terrestres que, a menudo, son criticados por ser altos consumidores de combustible. A causa del alza de los precios del combustible y a la tendencia mundial sobre el control de los gases de efecto invernadero, los ingenieros de la industria automotriz deben introducir diseños aerodinámicamente más eficientes en los vehículos antes mencionados [3]. 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 [4].

El progreso tecnológico, entre finales del siglo XIX y principios del siglo XX, ha traído el comienzo de una nueva generación de vehículos de carretera en los cuales se originaron acciones de diseño en relación con el fluido dentro del cual están inmersos [5]. 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 [6].

El ómnibus DIANA modelo GD.01C es un vehículo de mediano porte, especialmente diseñado y producido para ofrecer un servicio en zonas urbanas de transportación de pasajeros. Este modelo posee 2 puertas, su capacidad es de 43 pasajeros (25 sentados y 18 de pie). La carrocería de este ómnibus es de fabricación cubana, en la misma se ha evidenciado que su diseño tiene limitaciones de carácter aerodinámico.

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés Computational Fluid Dynamics) es una herramienta útil para poder resolver problemas basados en el movimiento de un fluido, ya que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes que rigen la dinámica de fluidos [7]. En la industria automotriz son ampliamente utilizados el túnel de viento y el CFD para determinar el efecto de la fuerza de arrastre sobre los vehículos. Sin embargo, debido a la competitividad del mercado, el alto costo monetario de experimentación y el consumo de tiempo entre otras limitaciones, se convierte el CFD en la herramienta que presenta ventajas, en el sentido antes descrito, sobre la experimentación tradicional [8].

Existen autores como Buljac [9], quienes desarrollan una metodología de análisis de un automóvil BMW E38 haciendo uso de un modelo de geometría CAD (del inglés Computer Aid Design), al cual se le establecen modificaciones en la zona trasera con el fin de mejorar el comportamiento aerodinámico del vehículo. En su estudio los autores destacan la importancia de las adecuaciones geométricas en los vehículos para el aumento de la estabilidad durante la conducción. Así mismo, Vignesh, S, Vikas Shridhar Gangad [10] analizan, haciendo uso del CFD, los contornos de presión en la carrocería de un vehículo, lo cual permite optimizar la inclinación de los parabrisas frontales y traseros en aras de disminuir el coeficiente de arrastre.

Los modelos CAD a pesar de ser simplificados, para reducir el costo computacional del ensayo, presentan la posibilidad de ser variados en función de los requerimientos de diseño. En este sentido Bayindirli, C., Y. E. Akansu [11] modelan en un ambiente CAD un prototipo de vehículo articulado

a través del empleo de un escáner óptico tridimensional, lo cual permitió realizar un estudio, a partir de la herramienta de CFD, para determinar su comportamiento aerodinámico.

Todas estas investigaciones han estado dirigidas al estudio del comportamiento aerodinámico de vehículos terrestres de transporte automotor, lo cual demuestra el interés y actualidad del tema, además de la viabilidad de la herramienta de CFD en la solución de los problemas analizados.

El objetivo de la investigación es analizar el comportamiento aerodinámico de la carrocería del ómnibus DIANA modelo GD.01C, haciendo uso de la herramienta CFD, lo cual posibilitará la determinación de sus coeficientes de resistencia aerodinámica. Teniendo en consideración los aspectos relacionados anteriormente es que la presente investigación tiene como objetivo evaluar el comportamiento aerodinámico de la carrocería del ómnibus DIANA modelo GD.01C, haciendo uso de la herramienta CFD. Lo cual posibilitará la determinación de sus coeficientes de resistencia aerodinámica, para establecer una propuesta de rediseño en la estructura de su carrocería, permitiendo así la existencia de menores índices de consumo de combustible por unidad de transporte.

2. Materiales y Métodos

Estudio de flujo a partir del CFD

El sistema de ecuaciones, que rige la simulación de fluidos laminar y turbulento en el complemento FlowSimulation del programa informático SolidWorks 2016, es el de Navier-Stokes, dichas ecuaciones, según Blazek, J [12], describen el flujo de masa, momento y energía a través del límite de un volumen en un espacio dado.

El método de discretización empleado es el de volúmenes finitos, técnica que consiste en dividir el dominio computacional en volúmenes elementales, estando cada nodo de la malla en circuito, lo cual asegura la continuidad del flujo entre nodos. La discretización espacial es obtenida siguiendo un procedimiento de interpolación tetraédrica [13].

Fuerza de resistencia aerodinámica de los vehículos

El flujo de aire externo genera una presión normal y tensiones cortantes en la carrocería de los vehículos. La resistencia aerodinámica (R_a) descrita en la ecuación (1) 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) [14] y [15].

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

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

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

Donde:

ρ = Densidad del aire.

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

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

A_f = Área frontal del vehículo (6,958 m²).

A_l = Área lateral y superior del vehículo (47,039 m²).

V_r = Velocidad del vehículo relativa al viento.

Coefficientes aerodinámicos de resistencia

El coeficiente C_{Dp} está influenciado significativamente por la configuración de la carrocería del vehículo. Un adecuado coeficiente C_{Dp} en los ómnibus debe oscilar en un rango de entre 0,5 hasta 0,8 [14]. Este coeficiente depende en mayor medida de la forma total del vehículo, de la calidad y continuidad de la superficie y la suavidad de sus formas. Así mismo, es el factor determinante en la caracterización aerodinámica de los vehículos terrestres. Mientras que, la resistencia aerodinámica de arrastre por fricción puede llegar a ser significativa en vehículos largos como ómnibus o tractor-trailer, el coeficiente C_{Df} , caracteriza la acción de la rugosidad superficial sobre el fluido [14] y [16].

Obtención del modelo CAD del ómnibus DIANA modelo GD.01C

El modelo CAD del ómnibus DIANA (ver Figura 1a) se obtiene haciendo uso del software profesional de diseño mecánico SolidWorks 2016. El modelo CAD está simplificado, se asume que las ventanillas están totalmente cerradas y no habrá pérdidas por accesorios internos y externos del vehículo.

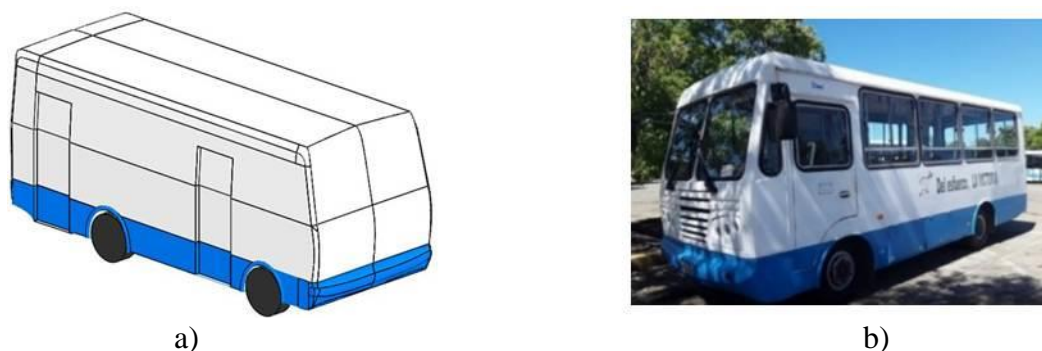


Fig.1 Ómnibus DIANA modelo GD.01C; a) Modelo CAD del ómnibus y b) Ómnibus en explotación

Las mediciones se realizaron en ómnibus en explotación (ver Figura 1b), las mismas fueron realizadas tanto de manera directa con el uso de instrumentos de medición (Figura 2a y Figura 2b); como de manera indirecta, empleando para ello el tratamiento de imágenes digitales en un ambiente CAD.



Fig.2 Mediciones realizadas a la carrocería del ómnibus DIANA modelo GD.01C; a) Medición con goniómetro digital y b) Medición con cinta métrica

Rugosidad superficial de la carrocería del ómnibus

En el análisis de flujo externo, realizado con la herramienta de CFD, sobre el ómnibus es la determinación de la rugosidad superficial de la carrocería. Con ese propósito, se emplea un

rugosímetro digital portátil marca RT200 para medir en varias zonas la rugosidad superficial de la carrocería (ver Figura 3).

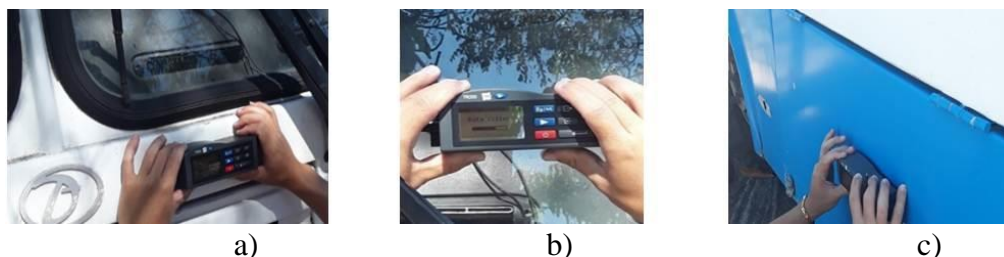


Fig.3 Mediciones de la rugosidad superficial de la carrocería del ómnibus; a) Zona frontal, b) Ventanillas de vidrio y c) Zona lateral

En la Tabla 1 se muestra el promedio de los valores de rugosidad superficial por zonas de la carrocería, obtenidos a partir de la medición en 10 ómnibus, todo lo cual permite aplicar un valor promedio de rugosidad superficial global al modelo CAD del ómnibus, el cual es empleado en el análisis por el CFD.

Tabla 1. Promedio de la rugosidad superficial del ómnibus

Material de las zonas de la carrocería	Promedio de rugosidad superficial de la carrocería (μm)
Ventanilla de vidrio	0,005
Carrocería metálica	0,98
Carrocería de material compuesto	0,76
Juntas de ventanillas	1,23
Promedio de la rugosidad superficial global	0,74

Condiciones de frontera en la simulación por CFD

En el análisis por el CFD de flujo externo sobre la carrocería del ómnibus se establecieron una serie de condiciones, como:

- 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 $7,05 \cdot 10^6$ y $1,18 \cdot 10^7$; 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 energía cinética turbulenta y su tasa de disipación, con el modelo k- ϵ para el flujo externo es de 0,1% con una longitud de 0,35 m.

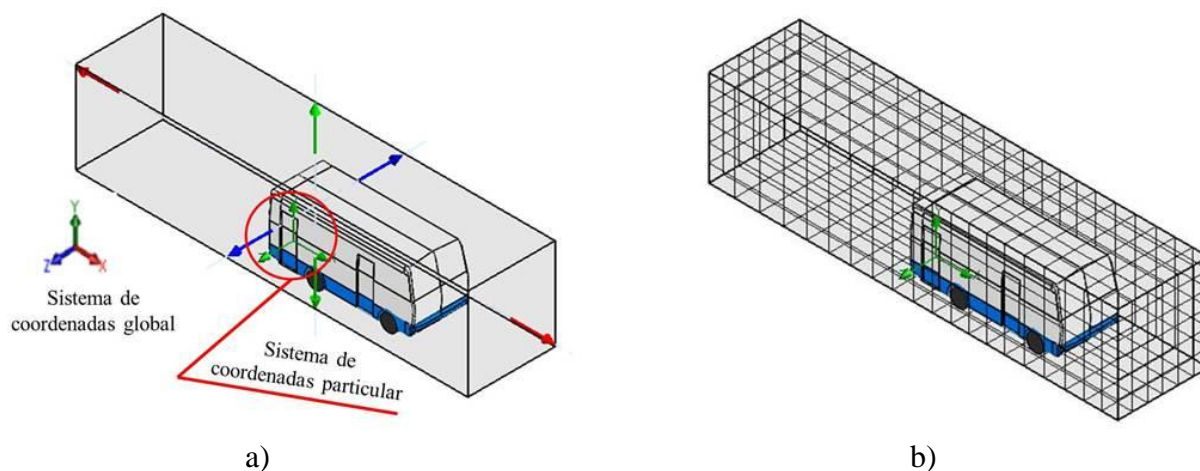
Definición y mallado del dominio computacional

El dominio computacional define el volumen que será analizado numéricamente, en el cual debe estar incluido el modelo CAD del vehículo (ver Fig. 4a), sus dimensiones se muestran en la Tabla 2.

La malla empleada por el complemento FlowSimulation del programa informático SolidWorks 2016 es volumétrica (ver Figura 4b). El dominio computacional es dividido en partes por los planos de la malla, la cual está constituida por paralelepípedos rectangulares (celdas) con caras ortogonales a los ejes del sistema de coordenadas, consistente con las características de una malla estructurada.

Tabla 2. Dimensiones del dominio computacional del ómnibus a partir del sistema de coordenadas particular

Coordenadas	Dimensiones (m)
X	8
-X	6
Y	3
-Y	0,2
Z	2
-Z	2

**Fig.4** Modelo CAD del ómnibus, a) Dominio computacional y b) Mallado del dominio computacional

3. Resultados y Discusión

Comportamiento aerodinámico de la carrocería del ómnibus

El comportamiento de las presiones sobre la carrocería del ómnibus, de acuerdo al análisis por CFD, se muestra en la Figura 5, con una velocidad de desplazamiento de 90 km/h. Es posible observar que las presiones son máximas en la región frontal del vehículo con un valor de 102 212,62 Pa. Mientras que, los valores mínimos de las presiones se encuentran en la zona cercana al tren de rodaje delantero y en la zona posterior con un valor de 100 628,07 Pa.

El patrón de flujo alrededor de la carrocería reveló que existe separación de las capas del aire en los bordes de la parte frontal del ómnibus. Siendo las capas adyacentes a la carrocería, en la zona lateral, de bajas presiones en comparación con la cara frontal, lo cual está asociado al desprendimiento de las capas superiores e inferiores del aire, producto a la existencia de cambios abruptos de la geometría en las esquinas que generan la formación de torbellinos.

Las deficiencias aerodinámicas de la carrocería muestran que existe una gran resistencia al avance causada mayormente, por la presión que actúa de manera perpendicular sobre la cara frontal y al tamaño de la región de turbulencia, localizada en las zonas lateral, superior y posterior.

En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos del comportamiento de las presiones y de las fuerzas que actúan sobre la carrocería. Se aprecia que al aumentar la velocidad de traslación del vehículo crecen de manera lineal y sostenida los valores de presión máxima, de la fuerza de arrastre por presión y de la fuerza de arrastre por fricción; mientras que la presión mínima disminuye. Esto

último está asociado a la existencia de una mayor área de turbulencia generada a partir del aumento de la velocidad.

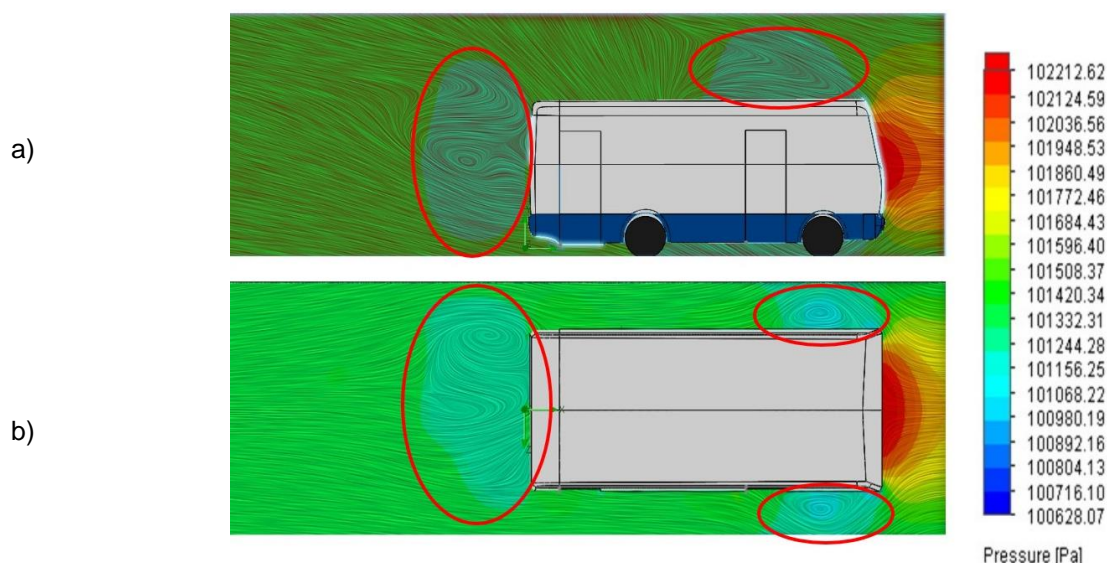


Fig.5 Patrón de flujo de aire alrededor de la carrocería del ómnibus, a) Vista lateral y b) Vista superior

Tabla 3. Relación de las velocidades respecto a las presiones máximas, mínimas y fuerza de arrastre por presión y por fricción

Velocidad (km/h)	Presión máxima (Pa)	Presión mínima (Pa)	Fuerza de arrastre por presión (N)	Fuerza de arrastre por fricción (N)
60	101 726,74	101 116,82	1 245,81	6,37
70	101 870,30	101 041,96	1 696,19	8,74
80	102 035,09	100 952,79	2 213,77	11,35
90	102 212,62	100 628,07	2 801,25	15,10
100	102 433,79	100 546,03	3 455,95	17,25

Los coeficientes C_{Dp} y C_{Df} se calculan según el despeje de las ecuaciones 2 y 3, respectivamente. La herramienta de CFD permitió determinar la magnitud de la fuerza de arrastre por presión y por fricción.

$$\begin{Bmatrix} C_{Dp60} \\ C_{Dp70} \\ C_{Dp80} \\ C_{Dp90} \\ C_{Dp100} \end{Bmatrix} = 2 \cdot \begin{Bmatrix} R_{ap60} \\ R_{ap70} \\ R_{ap80} \\ R_{ap90} \\ R_{ap100} \end{Bmatrix} \div \rho \cdot A_f \cdot \begin{Bmatrix} V_{60}^2 \\ V_{70}^2 \\ V_{80}^2 \\ V_{90}^2 \\ V_{100}^2 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{Bmatrix} C_{Df60} \\ C_{Df70} \\ C_{Df80} \\ C_{Df90} \\ C_{Df100} \end{Bmatrix} = 2 \cdot \begin{Bmatrix} R_{af60} \\ R_{af70} \\ R_{af80} \\ R_{pf90} \\ R_{af100} \end{Bmatrix} \div \rho \cdot A_f \cdot \begin{Bmatrix} V_{60}^2 \\ V_{70}^2 \\ V_{80}^2 \\ V_{90}^2 \\ V_{100}^2 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

En la tabla 4 se muestra la relación entre la velocidad de desplazamiento del ómnibus y los coeficientes C_{Dp} y C_{Df} . Ante todas las velocidades de desplazamiento el valor del coeficiente C_{Dp} se mantiene prácticamente constante, siendo el promedio de dicho valor de 1,107; el cual se encuentra alejado del rango aceptado por la literatura especializada para los ómnibus.

Tabla 4. Relación entre la velocidad de desplazamiento del ómnibus y los coeficientes C_{Dp} y C_{Df}

Velocidad (km/h)	Coeficiente C_{Dp}	Coeficiente C_{Df}
60	1,108	$8,371 \cdot 10^{-4}$
70	1,108	$8,442 \cdot 10^{-4}$
80	1,107	$8,394 \cdot 10^{-4}$
90	1,107	$8,242 \cdot 10^{-4}$
100	1,106	$8,307 \cdot 10^{-4}$

Mientras que, el valor del coeficiente C_{Df} presenta ligeras variaciones ante las distintas velocidades de desplazamiento analizadas y tiene como valor promedio $8,351 \cdot 10^{-4}$; el cual representa el 0,075 % del valor del coeficiente C_{Dp} . Lo anteriormente planteado indica que la resistencia aerodinámica que ofrece el ómnibus producto a la fricción entre la carrocería y el flujo de aire es relativamente pequeña, debido al buen acabado superficial de la misma.

Por tanto, se evidencia la necesidad de dirigir las acciones de rediseño hacia la estructura de la carrocería del ómnibus atendiendo, principalmente, a la realización de cambios de formas que no impliquen una modificación de importancia en los procesos de fabricación y de ensamblaje. Los cambios de mayor viabilidad son: la reducción del área de la sección frontal en la zona superior, el aumento de los biseles de transición entre la cara frontal y las caras laterales, así como la disminución del ángulo en la cara frontal. Por otro lado, la incorporación de dispositivos auxiliares para reducir la resistencia aerodinámica, a través de la acción del control de la separación del fluido alrededor del ómnibus, es una solución tecnológicamente posible y económicamente viable.

Validación de los resultados

El tamaño de los elementos de la malla tiene una evidente influencia en los resultados de las simulaciones numéricas. Al ejecutar las simulaciones por CFD, la precisión de los resultados se incrementa al diseñar un mallado considerablemente denso, sin embargo, también aumenta la duración del cálculo [17].

Para validar la precisión de los resultados se redujo el tamaño de la celda a la mitad y se obtuvieron los valores de la presión máxima para cada caso, el error obtenido fue de 0,61%. Entonces, es posible afirmar que los resultados obtenidos 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.

4. Conclusiones

A partir del análisis por el CFD se determinó que la carrocería del ómnibus DIANA modelo GD.01C presenta una gran resistencia al avance y varias regiones de turbulencia, lo cual constituyen evidentes deficiencias aerodinámicas. El coeficiente aerodinámico de resistencia por presión (C_{Dp}) del ómnibus DIANA modelo GD.01C, se encuentra fuera del rango aceptado por la literatura especializada para el diseño de ómnibus. El coeficiente aerodinámico de resistencia por fricción (C_{Df}) no influye significativamente en la resistencia aerodinámica al desplazamiento del ómnibus DIANA modelo GD.01C.

Referencias

1. Gomez, R., et al., *Cálculo y evaluación de los costos de calidad, efecto útil en los procesos de transportación*. Revista Avanzada Científica, 2015. **18**(1): p. 1-14.
2. Dominico, L., et al., *Análisis del movimiento de pasajeros en la ruta 447 Morón-Ciego de Ávila*. Journal of Transport Literature, 2015. **9**(4): p. 20-24.
3. Wahba, E.M., et al., *Aerodynamic drag reduction for ground vehicles using lateral guide vanes*. CFD Letters, 2012. **4**(2): p. 68-79.
4. Fraija, I., *Estudio de la aerodinámica en los vehículos*. Prospectiva, 2006. **4**(2): p. 66-70.
5. Solari, G., *Wind Science and Engineering. Origins, Developments, Fundamentals and Advancements* 2019. Springer Nature, Switzerland.
6. Arias-Paz, M., *Manual de automóviles*. Editoriales Dossat, Madrid. ISBN: 84-89656-58-4.
7. Martínez, R. et al., *Efecto geométrico de los perfiles aerodinámicos en una micro turbina eólica Darrieus tipo H*. 2017. <https://docplayer.es/73779655-Efecto-geometrico-de-los-perfiles-aerodinamicos-en-una-micro-turbina-eolica-darrieus-tipo-h.html>
8. Chaurasiya, V., et al., *Aerodynamic analysis of vehicle using CFD*. International Journal of Recent Trends in Engineering & Research, 2017. **3**(3): p. 131-137.
9. Buljac, A., et al., *Automobile aerodynamics influenced by airfoil-shaped rear wing*. International Journal of Automotive Technology, 2016. **17**(3): p. 377-385.
10. Vignesh, S., et al., *Windscreen angle and Hood inclination optimization for drag reduction in cars*. Procedia Manufacturing, 2019. **30**: p. 685-692.
11. Bayindirli, C., et al., *The numerical investigation of aerodynamic structures of truck and trailer combinations*. International Journal of Automotive Engineering and Technologies, 2015. **4**(3): p. 139-145.
12. Blazek, J., *Computational Fluid Dynamics: Principles and applications* 2001. Elsevier Science, Kidlington, UK.
13. Driss, Z., et al., *Numerical simulation and experimental validation of the turbulent flow around a small incurved Savonius wind rotor*. Energy, 2014. **74**: p. 506-517.
14. Wong, J.Y., *Theory of ground vehicles* 2001. John Wiley & Sons, New York.
15. Çengel, Y., et al., *Fluid mechanics: fundamentals and applications* 2017. McGraw-Hill Education, New York.
16. Young, D., et al., *A brief introduction to fluid mechanics* 2011. John Wiley & Sons, E.E.U.U.
17. Romantchik, E., et al., *Análisis del flujo de aire de los extractores de invernadero usando la simulación por CFD*. Ingeniería Investigación y Tecnología, 2019. **20**(1): p. 1-14.

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 existen conflictos de intereses.