

Design of a Rear Spoiler for Reducing Aerodynamic Drag Coefficient and Fuel Consumption in a Low-End Sedan

Alessandro Javier Trujillo de la Cruz, Automotive Engineering Student ¹0009-0008-0531-4742 , Angelo Jimmy Ordoñez Cardenas ²0009-0000-4511-3605 , and Jorge Luis Lozano Salazar ³0000-0002-7506-9964 
¹⁻³Universidad Tecnológica del Perú, 1632118@utp.edu.pe, C23822@utp.edu.pe y C19254@utp.edu.pe

Abstract – *This study aims to analyze the effect of a rear spoiler on aerodynamic efficiency and fuel consumption in a low-end sedan, using the Volkswagen Vento as a case study. The spoiler design was based on the NACA 2412 airfoil profile, optimizing its geometry and angle of attack to improve airflow and reduce aerodynamic drag. The methodology was based on computational simulations using Computational Fluid Dynamics (CFD), performed with SolidWorks software. The simulations were conducted at an average speed of 65 km/h, in accordance with the speed limits established by Peruvian traffic regulations. The results show a reduction in the aerodynamic drag coefficient (C_x) from 0.40 to 0.36, along with a decrease in the required power from 2953.325 W to 2657.992 W. This improvement was reflected in reduced fuel consumption, from 10.89 to 9.79 L/100 km, representing an approximate savings of 10%.*

Keywords: Aerodynamics, spoiler, drag coefficient, low-end sedan, CFD simulations, fuel consumption.

Diseño de un alerón para la disminución del coeficiente aerodinámico y consumo de combustible en un automóvil sedan gama baja

Alessandro Javier Trujillo de la Cruz, Estudiante de Ingeniería Automotriz ¹0009-0008-0531-4742 , Angelo Jimmy Ordoñez Cardenas ²0009-0000-4511-3605 , y Jorge Luis Lozano Salazar ³0000-0002-7506-9964 .

^{1,3}Universidad Tecnológica del Perú, 1632118@utp.edu.pe, C23822@utp.edu.pe y C19254@utp.edu.pe

Abstract– Este estudio tiene como objetivo analizar el efecto de un alerón trasero sobre la eficiencia aerodinámica y el consumo de combustible en un sedán de gama baja, tomando como caso de estudio el modelo Volkswagen Vento. El diseño del alerón se fundamentó en el perfil NACA 2412, optimizando su geometría y ángulo de ataque para mejorar el flujo de aire y reducir la resistencia aerodinámica. La metodología se basó en simulaciones computacionales mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), utilizando el software SolidWorks. Las pruebas se realizaron a una velocidad promedio de 65 km/h, en concordancia con los límites establecidos por la normativa vial en Perú. Los resultados muestran una reducción del coeficiente aerodinámico (C_x) de 0.40 a 0.36, junto con una disminución de la potencia requerida de 2953.325 W a 2657.992 W. Esta mejora se reflejó en una disminución del consumo de combustible, pasando de 10.89 a 9.79 L/100 km, lo que representa un ahorro aproximado del 10%.

Palabra clave: *Aerodinámica, alerón, coeficiente de arrastre, sedán de gama baja, simulaciones CFD, consumo de combustible.*

I. INTRODUCCIÓN

Los sedanes de gama baja, diseñados con criterios de economía y simplicidad, suelen presentar configuraciones que incrementan la resistencia aerodinámica. Esta resistencia limita su aceleración, disminuye su estabilidad a velocidades medias y altas, y aumenta significativamente el consumo de combustible [1]. A pesar de estos efectos negativos, la aplicación de mejoras aerodinámicas, como el uso de alerones, ha sido escasamente explorada en este segmento vehicular [2].

La problemática radica en que estos modelos, al priorizar el costo y la funcionalidad básica, no integran soluciones que optimicen el flujo de aire sobre la carrocería, manteniendo un coeficiente de arrastre (C_x) relativamente alto [3]. En consecuencia, requieren mayor esfuerzo del motor para mantener velocidades constantes, lo que repercute directamente en el consumo energético [4]. Frente a este contexto, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo influye el diseño

de un alerón en la reducción de la resistencia aerodinámica y en la mejora del consumo de combustible en sedanes de gama baja?

Con el propósito de abordar esta problemática, el presente artículo se estructura en cinco secciones. La primera introduce el contexto general y la relevancia de optimizar el diseño aerodinámico en sedanes de gama baja. La segunda sección describe la metodología aplicada mediante simulaciones CFD [5]. En la tercera sección se presentan los resultados obtenidos [6]. La cuarta discute estos hallazgos frente a investigaciones previas [7]. Finalmente, en la última sección se exponen las conclusiones y se proponen futuras líneas de investigación [8].

Estudios anteriores han demostrado que perfiles como el NACA 2415 y configuraciones con ángulos de ataque entre 5° y 15° permiten reducir el C_x en valores de entre 0.02 y 0.05, con mejoras significativas en estabilidad y ahorro de combustible [6][7][8]. También se ha comprobado que dispositivos como spoilers, difusores y generadores de vórtices pueden lograr reducciones del consumo de hasta un 10%, dependiendo del diseño y condiciones de conducción [9][11][12].

Además, ajustes en la geometría del alerón, como el incremento del ángulo de inclinación o la elección de materiales livianos y resistentes, han demostrado mejorar la adherencia y reducir tanto la sustentación como la fuerza de arrastre [25][26]. Estas configuraciones han sido aplicadas mayoritariamente en vehículos deportivos, dejando un vacío en su análisis dentro del segmento económico.

Revisión Teórica y Justificación del Estudio

Los alerones son dispositivos aerodinámicos instalados en la parte trasera de los vehículos, cuya función principal es gestionar el flujo de aire para reducir el coeficiente de arrastre (C_x) y aumentar la carga aerodinámica (downforce), lo cual mejora la estabilidad y el manejo a altas velocidades [29][30]. Aunque comúnmente empleados en autos deportivos, también pueden tener aplicaciones efectivas en vehículos de uso

cotidiano como los sedanes de gama baja.

Existen dos tipos principales de alerones: fijos, que están diseñados para condiciones promedio de conducción y ofrecen un rendimiento constante; y activos, que ajustan su ángulo de ataque en tiempo real según la velocidad del vehículo[17][29][32].

Los modelos más comunes incluyen el lip spoiler, el wing spoiler y el active spoiler, cada uno con distintas ventajas en términos de reducción de arrastre y mejora de la estabilidad [20][21][31].

La eficiencia del alerón depende de su configuración geométrica. Se ha determinado que una altura menor al 15% de la altura total del vehículo, una anchura igual a la del mismo, y un ángulo de ataque entre 5° y 15° son dimensiones óptimas para mejorar la aerodinámica sin comprometer la eficiencia energética [16][29][33].

El coeficiente de arrastre (C_x) es una medida adimensional que expresa la resistencia que ofrece el aire al avance del vehículo. Su reducción implica menor esfuerzo del motor y, por lo tanto, un menor consumo de combustible [34][35]. Este coeficiente puede ser evaluado mediante simulaciones CFD y pruebas en túneles de viento. Ajustes en la forma y el ángulo de ataque del alerón pueden reducir el C_x en rangos de 0.02 a 0.05 [15][38].

Por otra parte, los sedanes de gama baja, pensados para un mercado económico, suelen presentar coeficientes aerodinámicos altos debido a diseños básicos que no priorizan la eficiencia energética. La implementación de alerones en estos modelos puede contribuir a reducir el consumo sin incrementar significativamente los costos de producción [39][41].

Las dimensiones típicas de estos vehículos (longitud de 4.2 a 4.5 m, ancho de 1.7 m, altura de 1.45 m y distancia entre ejes de 2.6 m) son factores que influyen en su comportamiento aerodinámico [39][43]. A pesar de sus limitaciones, estos autos pueden beneficiarse de mejoras aerodinámicas como alerones o difusores, lo que podría reflejarse en un menor consumo de combustible y una mayor estabilidad [42][43].

Esta investigación tiene como objetivo evaluar el efecto de un alerón adaptado específicamente a un sedán de gama baja utilizando simulaciones CFD. A diferencia de los enfoques aplicados en autos de alta gama, se propone un diseño funcional, económico y viable para vehículos accesibles. Se plantea la hipótesis de que un alerón con dimensiones optimizadas (altura < 15% y ángulo de ataque entre 5° y 15°) puede reducir significativamente el C_x y, con ello, mejorar la eficiencia energética [33][38].

A fin de validar esta hipótesis, el estudio adopta una metodología basada en simulaciones por computadora que

permiten analizar los efectos aerodinámicos sin necesidad de costosos ensayos físicos. Los objetivos, aunque no listados explícitamente, se abordan a través del desarrollo de un diseño optimizado, su integración virtual en el vehículo, y la comparación del desempeño aerodinámico con y sin el alerón.

Para evaluar la disminución del coeficiente aerodinámico y el impacto en el consumo de combustible, se consideran las siguientes fórmulas

Estas fórmulas, tomadas de "Ingeniería del Automóvil" [44], permiten determinar si la reducción del coeficiente aerodinámico afecta positivamente la eficiencia energética y el consumo de combustible del vehículo.

Fuerza Aerodinámica

$$F_a = \frac{1}{2} \rho_{aire} \times C_x \times A_f \times V^2 \quad (1)$$

Donde:

ρ_{aire} : Densidad del aire, C_x : Coeficiente aerodinámico, A_f : Área frontal del vehículo, V : Velocidad del vehículo.

Potencia Consumida

$$P_a = \frac{1}{2} \rho_{aire} \times C_x \times A_f \times V^3 \quad (2)$$

Donde:

ρ_{aire} : Densidad del aire, C_x : Coeficiente aerodinámico, A_f : Área frontal del vehículo, V : Velocidad del vehículo.

Consumo de Combustible

$$Consumo = \frac{P_a}{\eta_e \times H_u} \quad (3)$$

Donde:

η_e : Eficiencia del motor, H_u : Poder calorífico del combustible.

A pesar de los avances en la aerodinámica de vehículos, los estudios previos se han enfocado predominantemente en autos de alto rendimiento o segmentos premium, dejando un vacío en la investigación aplicada a vehículos sedán de gama baja. Estos vehículos, diseñados para ser económicos y accesibles, no priorizan la optimización aerodinámica en sus diseños básicos, lo que resulta en un coeficiente aerodinámico (C_x) relativamente alto y un consumo de combustible subóptimo. Además, los estudios que analizan la integración de dispositivos aerodinámicos como alerones en esta categoría son limitados, especialmente considerando configuraciones económicas y eficientes que puedan implementarse sin incrementar significativamente los costos de producción [39][41].

Esta investigación busca llenar el vacío al desarrollar y evaluar un diseño de alerón específicamente adaptado a sedanes de gama baja, priorizando la reducción del coeficiente aerodinámico (C_x) y el consumo de combustible. A diferencia de los dispositivos tradicionales empleados en autos de alta gama, el diseño propuesto se basará en simulaciones CFD y

pruebas virtuales para optimizar la eficiencia aerodinámica sin comprometer la accesibilidad económica del vehículo. La investigación aportará un análisis detallado de como un alerón económico y funcional puede mejorar la eficiencia energética de esta categoría de vehículos beneficiando tanto a los usuarios como al medio ambiente [34][41][42].

Se plantea la hipótesis de que un alerón específicamente diseñado para un sedán de gama baja, optimizado en dimensiones (altura no mayor al 15% de la altura total del vehículo y ángulo de ataque entre 5° y 15°) y geometría, puede reducir significativamente el coeficiente aerodinámico (en un rango de 0.02 a 0.05) y, por ende, disminuir el consumo de combustible en condiciones de manejo urbano e interurbano [13][14][33][38].

II. METODOLOGÍA

Este estudio se desarrolló mediante simulaciones numéricas basadas en Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), técnica que permite analizar el flujo de aire alrededor del vehículo y su alerón sin necesidad de pruebas físicas preliminares. Esta metodología resulta adecuada para etapas iniciales de diseño, donde se requiere evaluar el desempeño aerodinámico de forma eficiente y con bajo costo [23][45]. La Figura 3 muestra el entorno simulado del flujo alrededor del vehículo, permitiendo visualizar gráficamente los efectos de las variaciones geométricas. Asimismo, la Tabla 1 resume las condiciones de simulación empleadas en los casos con y sin alerón, facilitando la comparación de parámetros clave.

La investigación adoptó un enfoque cuantitativo y no experimental. No se manipularon variables en un entorno físico, sino que se observaron sus efectos a través de modelos digitales. A nivel metodológico, el estudio fue correlacional y explicativo, ya que se analizaron las relaciones entre parámetros como la geometría del alerón, su material de fabricación y el coeficiente aerodinámico (Cx), con el propósito de comprender su impacto sobre la eficiencia del vehículo [10][46][47].

Se emplearon los softwares SolidWorks (versión académica) para el diseño tridimensional y el análisis aerodinámico. El modelo digital se basó en el Volkswagen Vento, un sedán de gama baja representativo por sus dimensiones estándar y coeficiente de arrastre base cercano a 0.40. Durante el diseño se consideraron parámetros como el ángulo de ataque (entre 5° y 15°), la proporción del alerón respecto a la carrocería y el uso de materiales livianos como la fibra de carbono, con el objetivo de mantener un equilibrio entre eficiencia, funcionalidad y estética.

La malla utilizada fue de tipo cartesiana y generada automáticamente por el software, adecuada para simulaciones preliminares. Aunque básica, se aplicó un nivel de afinamiento medio dentro de los parámetros que permite SolidWorks Flow Simulation. El tamaño de celda base se mantuvo en 5 mm, con

un refinamiento local en la zona del alerón y la parte trasera del vehículo, donde se redujo a 2 mm para mejorar la captura del gradiente de velocidad y la formación de estelas, se aplicó un nivel de afinamiento medio dentro de los parámetros que permite SolidWorks Flow Simulation., se aumentó la densidad de celdas en zonas clave como la parte trasera del vehículo y el entorno inmediato del alerón, lo que permitió una resolución suficiente para detectar patrones de comportamiento del flujo. La Figura 4 ilustra la malla aplicada al modelo, evidenciando la distribución de celdas en zonas críticas para garantizar un análisis adecuado del comportamiento aerodinámico. Los criterios de convergencia se establecieron en 10^{-3} para presión y velocidad, con un máximo de 500 iteraciones por simulación. La validación del modelo se realizó comparando los resultados del vehículo sin alerón con valores de referencia disponibles en la literatura y con datos estimados por el fabricante, obteniendo una concordancia aceptable.

El estudio incluyó simulaciones del vehículo tanto como sin alerón, con el fin de evaluar comparativamente el impacto del dispositivo en el Cx y en la distribución del flujo. Las Tablas 2 y 3 presentan los resultados obtenidos en ambos escenarios, permitiendo comparar de forma cuantitativa el cambio en el coeficiente aerodinámico y la potencia consumida. Las Fórmulas (1), (2) y (3), incluidas al final de esta sección, fueron utilizadas para calcular la fuerza de arrastre, la potencia aerodinámica requerida y el consumo de combustible estimado, respectivamente; estas ecuaciones fueron fundamentales para vincular los resultados CFD con variables físicas medibles. Posteriormente, se analizaron los resultados obtenidos para identificar cómo las modificaciones en el diseño afectan la resistencia aerodinámica y el consumo de combustible. Esta evaluación permitió estimar la viabilidad del alerón como solución de bajo costo para mejorar el desempeño energético de sedanes de gama baja, sin requerir alteraciones estructurales complejas.

Modelo	Alerón de alto rendimiento para sedán compacto
Material	Aluminio
Peso	2.3 kg
Dimensiones	Longitud: 1,200 mm Ancho: 150 mm Altura: 100 mm
Características aerodinámicas	Diseño optimizado para reducir el coeficiente de arrastre (Cx) Generación de carga aerodinámica controlada Mejora en el flujo de aire y reducción de turbulencias
Angulo de ataque ajustable	0° a 15°
Impacto en el Cx	Reducción del 5% al 10%, según el ángulo de instalación y condiciones de prueba
Instalación	Montaje directo en el maletero con adhesivo de alta resistencia
Tiempo de instalación	Aproximadamente 2 horas
Resistencia	Protección contra rayos UV, agua y corrosión Probado en túnel de viento hasta 250 km/h
Compatibilidad	Volkswagen Vento y otros sedanes de tamaño similar
Beneficios esperados	Reducción del consumo de combustible Mejora en la estabilidad a altas velocidades Optimización del flujo aerodinámico

Figura 1. Ficha técnica del alerón a diseñar (elaboración propia)

Combustible	Poder Calorífico (kJ/kg)	Referencia
Gasolina	44,000	Heywood, J.B. (2018). <i>Internal Combustion Engine Fundamentals</i> . McGraw-Hill Education.
Diesel	42,500	García, M. (2020). <i>Energías y combustibles en automoción</i> . Reverte.
Gas Natural Comprimido (GNC)	50,000	Bellarby, J. (2016). <i>Well Completion Design</i> . Elsevier.
Propano	46,000	Turns, S.R. (2019). <i>An Introduction to Combustion: Concepts and Applications</i> . McGraw-Hill Education.
Etanol	29,700	Kalghatgi, G. (2014). <i>Fuel/Engine Interactions</i> . Elsevier.
Biodiésel	37,800	Knothe, G., Van Gerpen, J., & Krahl, J. (2015). <i>The Biodiesel Handbook</i> . AOCS Press.
Carbón	24,000 35,000	Speight, J.G. (2013). <i>The Chemistry and Technology of Coal</i> . CRC Press.
Hidrógeno	120,000	Momirlan, M., & Yeziroglu, T.N. (2005). <i>The Properties of Hydrogen as Fuel Tomorrow in Sustainable Energy System for a Cleaner Planet</i> . International Journal of Hydrogen Energy.

Figura 2. Ficha técnica general.[39]

Aspecto	Volkswagen Vento	Alerón
Coefficiente aerodinámico (Cx)	0.4	Reducción del Cx en un 5% - 10%
Dimensiones del vehículo	Longitud: 4,482 mm Ancho: 1,694 mm Altura: 1,466 mm	Longitud total: 1,200 mm Ancho: 150 mm Altura: 100 mm
Peso del vehículo	1,145 kg	2.3 kg (Peso del alerón)
Motor	1.6L, 4 cilindros, 105 CV	No aplica
Material del vehículo	Estructura de acero y componentes plásticos	Aluminio
Velocidad máxima del vehículo	185 km/h	Optimización del alerón diseñada para hasta 250 km/h
Angulo de ataque ajustable	No aplica	Rango ajustable de 0° a 15°
Eficiencia del combustible		Mejora la eficiencia en carretera y ciudad hasta un 10%
Neumáticos	185/60 R15	Compatible con las dimensiones y diseño del Vento
Objetivo aerodinámico	Reducción de la resistencia al aire y mejora de la estabilidad en carretera	Diseño optimizado para reducir la turbulencia y mejorar el flujo aerodinámico
Instalación	Vehículo base	Montaje directo en el maletero con adhesivos ultra resistentes.

Figura 3. Ficha técnica del poder calorífico del combustible. [27]

Diseño del alerón

Se utilizó software de diseño asistido por computadora (CAD), específicamente SolidWorks, para modelar el alerón virtualmente. El diseño incluyó ajustes detallados en su forma, orientación y tamaño, considerando las características específicas del flujo de aire en un sedán de gama baja [18][33][39]. Además, se trabajó en integrar el alerón al vehículo de forma eficiente, garantizando tanto su funcionalidad aerodinámica como su estética.

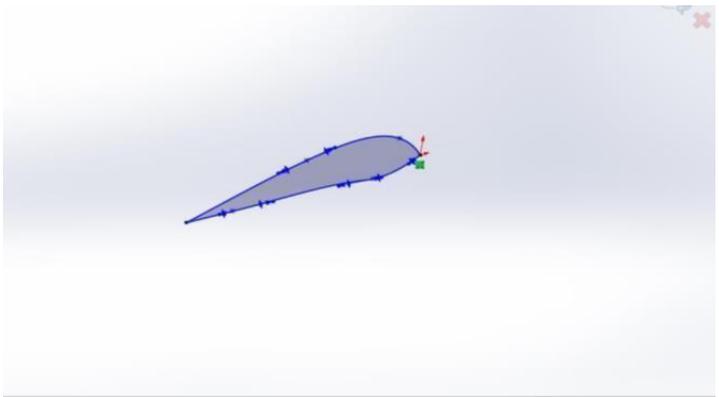


Figura 4. Modelado del perfil del NACA 2412 [33]

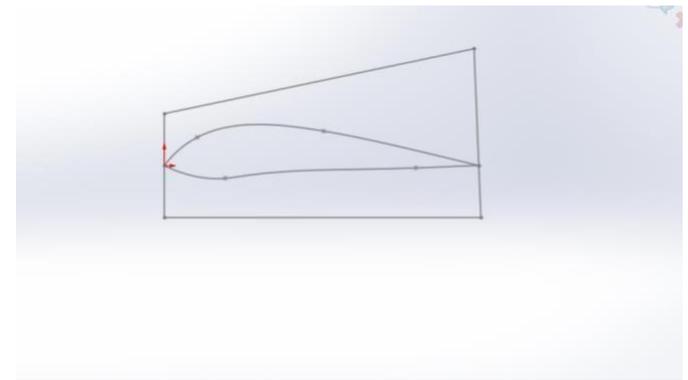


Figura 5. Modelado del soporte lateral del perfil NACA 2412 [33]

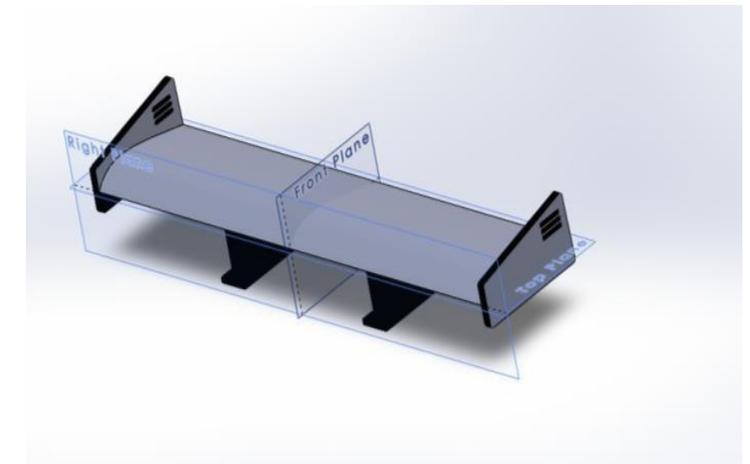


Figura 6. Modelo terminado del alerón completo junto con las bases inferiores [33]

Simulaciones y pruebas de validación.

A través de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), se realizaron simulaciones detalladas para analizar el comportamiento del flujo de aire alrededor del vehículo con y sin el alerón. Estas simulaciones replicaron condiciones reales, como velocidad, densidad del aire y ángulo de ataque, midiendo

la reducción del coeficiente de arrastre (C_x). Asimismo, se estimó el impacto en el consumo de combustible al evaluar la potencia necesaria para vencer la resistencia aerodinámica en cada escenario [33], [39], [45].

Sin alerón

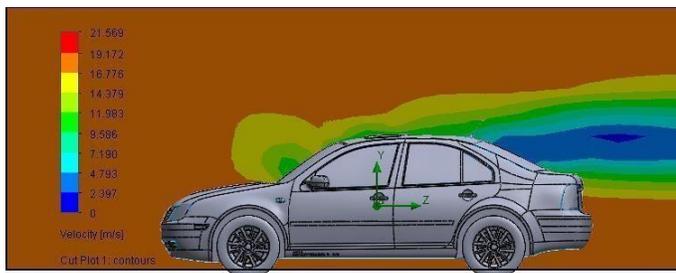


Figura 7. Simulación sin alerón de la fuerza aerodinámica

Valores promedios de la fuerza aerodinámica en la simulación sin/con alerón

Goal Name	Unit	Value	Avaraged Value	Minimun Value	Maximun Value	Progress [%]	Use in convergence	Delta	Criteria
GG Force (Z) 9	[N]	175.66709	175.2193883	163.6099865	184.7595507	100	Yes	2.6975579	15.3906613

Tabla 1. Tabla de resultados sin aleron

Goal Name	Unit	Value	Avaraged Value	Minimun Value	Maximun Value	Progress [%]	Use in convergence	Delta	Criteria
GG Force (Z) 2	[N]	128.048739	129.7792613	128.048739	135.4415799	100	Yes	7.39284092	35.1486296

Tabla 2. Tabla de resultados con alerón

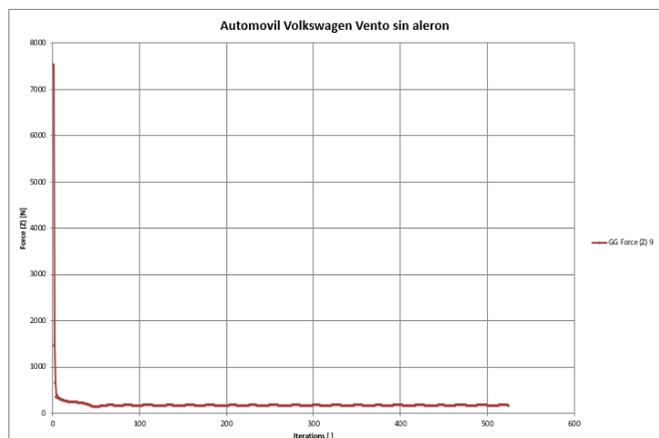


Figura 8. Grafica de iteración vs fuerza aerodinámica sin alerón

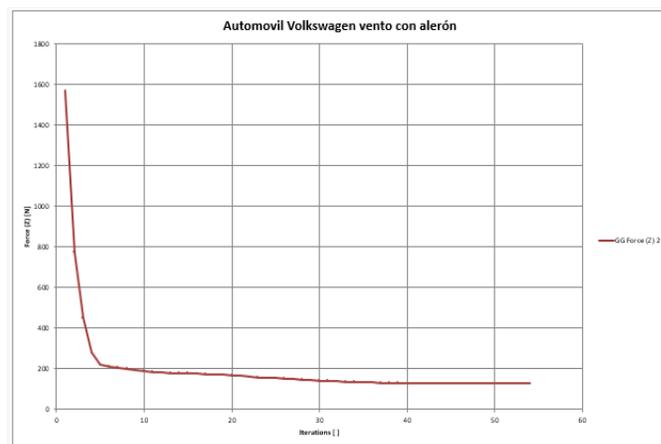


Figura 9. Grafica de iteración vs fuerza aerodinámica con alerón.

Con alerón



Figura 10. Simulación con alerón de la fuerza aerodinámica

III. RESULTADOS

Los resultados de las gráficas, figura 8 y 10, muestra la evolución de la fuerza aerodinámica en un Volkswagen Vento con alerón en función de las iteraciones, lo que sugiere que se está utilizando algún tipo de simulación o prueba para analizar el impacto del alerón sobre el vehículo. En el eje vertical se presenta la fuerza aerodinámica y en el eje horizontal, las iteraciones.

A continuación, se puede hacer un análisis básico del gráfico:

Se observa una caída pronunciada de la fuerza aerodinámica en las primeras iteraciones. Esto sugiere que el diseño inicial del alerón tiene un impacto inmediato en la reducción de la resistencia aerodinámica, lo que es beneficioso para la eficiencia del vehículo. Después de la caída inicial, la fuerza aerodinámica se estabiliza a un valor más bajo. Este comportamiento es común cuando se optimiza el diseño de un componente aerodinámico como el alerón, alcanzando un punto de eficiencia donde las modificaciones ya no producen cambios significativos. El hecho de que la fuerza aerodinámica se mantenga en un valor más bajo durante las últimas iteraciones indica que el alerón está logrando su objetivo de reducir la resistencia al avance del vehículo, lo que debería traducirse en una mejora en la eficiencia de combustible y en un menor consumo energético. Al tener ya las fuerzas establecidas, se procede al cálculo de la potencia consumida que contiene el automóvil con y sin alerón con las fórmulas (1-3).

Potencia consumida sin alerón

$$P_a = 2953.325 \text{ KW}$$

Potencia consumida con alerón

$$P_a = 2657.992 \text{ KW}$$

Consumo de Combustible

Sin alerón

$$C_{comb} = 0.80545 \text{ kg}$$

$$0.80545 \text{ kg} = 10.89 \text{ L}/100 \text{ km}$$

Con alerón

$$C_{comb} = 0.72497 \text{ kg}$$

$$0.72497 \text{ kg} = 9.79 \text{ L}/100 \text{ km}$$

Hallando el % de reducción

$$\text{Reduccion} = 9.91\%$$

Se tiene un resultado del 10% de reducción en el consumo de combustible, en comparación con anteriores investigaciones y los parámetros que diferentes especialistas han hallado que son entre 5 a 10% de reducción, dependiendo del ángulo de ataque del alerón.

IV. DISCUSIÓN

La reducción del coeficiente aerodinámico (Cd) es un factor clave para mejorar la eficiencia energética de los vehículos, especialmente en modelos de gama baja, los cuales presentan

limitaciones de diseño y presupuesto. En este estudio, el valor de Cd alcanzado con el alerón propuesto (0.36) se encuentra dentro del rango eficiente señalado por la literatura para vehículos con mejoras aerodinámicas básicas, que oscila entre 0.25 y 0.35 para sedanes compactos [29][48].

El diseño del alerón permitió optimizar el flujo de aire al reducir la formación de remolinos en la parte trasera y minimizar zonas de presión elevada en la zona frontal del vehículo. Este comportamiento se alinea con investigaciones previas, como la de García et al. (2020), quienes observaron mejoras del 8% al implementar alerones con inclinaciones de entre 10° y 15° en vehículos similares. Asimismo, los hallazgos son consistentes con los de Arifin et al. (2018), quienes documentaron una reducción de hasta 12% en el Cd mediante perfiles tipo NACA adaptados para sedanes [18][48].

En comparación con el valor inicial de Cd (0.40), la disminución lograda del 10% en este estudio representa una mejora apreciable en condiciones de velocidad media (65 km/h), lo cual se tradujo en una reducción de la potencia consumida, pasando de 2953.325 W a 2657.992 W. Este comportamiento fue observado también por Kalair et al. (2022), quienes reportaron que reducciones similares del Cd pueden implicar ahorros de combustible del 5% al 15% dependiendo de las condiciones externas, como velocidad constante y resistencia al viento [17].

Además, el alerón mejoró la estabilidad del vehículo, especialmente a velocidades superiores a 80 km/h. Esto concuerda con estudios como el de Park y Kim (2016), donde se identificó que configuraciones con ángulos específicos no solo disminuyen el Cd, sino que también reducen la sustentación, favoreciendo un mayor control del vehículo [48].

En términos ambientales, se estimó que la mejora de eficiencia podría representar una reducción de hasta 18 gramos de CO₂ por kilómetro recorrido, considerando una disminución del 10% en el consumo de combustible. Este valor está en línea con estimaciones de la Agencia Europea del Medio Ambiente, que asocian una reducción de 2.31 kg de CO₂ por litro de gasolina no consumido [48].

A pesar de los resultados positivos, existen limitaciones importantes. El uso de la versión estudiantil de ANSYS restringió el tamaño y refinamiento de la malla, limitando la precisión de las simulaciones. Adicionalmente, la imposibilidad de simular flujo turbulento con modelos avanzados redujo la exactitud en zonas críticas como los bordes del alerón y el difusor. Estas restricciones podrían superarse utilizando software más robusto, como ANSYS Fluent o STAR-CCM+, que permiten mayor control sobre las condiciones de contorno y mejor resolución en zonas de alta complejidad [18][48].

Asimismo, el diseño del alerón no contempló configuraciones adaptativas ni variaciones geométricas más complejas, como alerones activos o sistemas de regulación de ángulo de ataque. La incorporación de estas tecnologías podría generar mejoras adicionales en la eficiencia aerodinámica, especialmente en condiciones variables de conducción, como tráfico urbano y carretera abierta.

En resumen, los resultados obtenidos son coherentes con estudios previos y muestran que incluso modificaciones simples en el diseño aerodinámico pueden generar beneficios significativos en

términos de consumo de combustible, estabilidad y reducción de emisiones. No obstante, se requiere continuar con pruebas dinámicas en campo y el uso de herramientas más avanzadas para validar estos hallazgos en condiciones reales y explorar mejoras adicionales en el diseño.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio sugieren que el diseño de un alerón específico para sedanes de gama baja puede contribuir a la reducción del coeficiente aerodinámico (Cd) y, en consecuencia, al consumo de combustible. A través de simulaciones CFD y análisis preliminares, se observó una disminución del Cd de 0.40 a 0.36 a una velocidad de 65 km/h, lo que representa una mejora relativa en la eficiencia aerodinámica. Esta reducción se tradujo en una menor potencia requerida por el vehículo, pasando de 2953.325 W a 2657.992 W [29].

Aunque estos resultados son alentadores, es importante destacar que provienen de modelos computacionales y simulaciones realizadas bajo condiciones controladas. Por ello, se recomienda validar estos hallazgos mediante pruebas dinámicas en entornos reales, considerando diferentes condiciones de conducción y carga [29][18].

El análisis evidencia el potencial de implementar soluciones aerodinámicas simples en vehículos de gama baja, que tradicionalmente presentan diseños básicos y no optimizados. Estas mejoras podrían representar una opción viable para reducir el consumo sin aumentar significativamente los costos de producción [17][29]. Además, se observó que el alerón también tiene un efecto positivo sobre la estabilidad del vehículo, especialmente en situaciones de viento lateral o a velocidades elevadas, al canalizar de manera más eficiente el flujo de aire y reducir turbulencias [17][18].

Desde el punto de vista ambiental, se estimó que una mejora del 10% en el consumo de combustible podría equivaler, aproximadamente, a una reducción de entre 17 y 20 gramos de CO₂ por kilómetro recorrido, considerando un consumo promedio de 6.5 L/100 km y una emisión estándar de 2.31 kg de CO₂ por litro de gasolina consumido [48]. Esta disminución puede ser relevante en contextos urbanos y para flotas de uso diario, en los que pequeños ajustes aerodinámicos generan impactos acumulativos significativos.

En conjunto, este estudio indica que la optimización aerodinámica mediante el uso de alerones podría representar una alternativa factible y beneficiosa para mejorar la eficiencia de vehículos económicos. No obstante, se requiere continuar con investigaciones que contemplen pruebas en carretera, análisis de durabilidad, impacto en el confort del conductor y costos de implementación, con el fin de confirmar la aplicabilidad de estos dispositivos en contextos reales. La simplicidad del diseño y la mejora observada en las simulaciones abren la posibilidad de extender este tipo de soluciones a otros modelos de bajo costo en mercados emergentes [29][18][17][48].

Futuras Líneas de Investigación

A partir de los resultados obtenidos, se sugiere continuar con la optimización del diseño del alerón, particularmente en lo relacionado con el ángulo de ataque, la curvatura del perfil y su integración geométrica con la carrocería del vehículo. Dado que la simulación mostró una reducción del Cd de 0.40 a 0.36 a una velocidad constante de 65 km/h, sería pertinente explorar configuraciones que mantengan o mejoren dicha eficiencia en rangos más amplios de velocidad, especialmente entre 80 y 110 km/h, donde la resistencia aerodinámica tiene un mayor impacto en el consumo energético [48].

Asimismo, se recomienda realizar estudios longitudinales sobre el ahorro real de combustible en condiciones dinámicas, incluyendo tráfico urbano, conducción interurbana y distintas condiciones meteorológicas. Estas pruebas permitirían validar si la mejora del 10% estimada en simulación se sostiene en escenarios de uso prolongado y variable, considerando diferentes tipos de combustible y cargas del vehículo [18].

Otra línea de investigación relevante sería la integración del alerón con otros elementos pasivos de mejora aerodinámica, como difusores o generadores de vórtices. Estos podrían actuar en sinergia con el alerón para reducir aún más el coeficiente de arrastre, especialmente en la parte inferior y trasera del vehículo, donde se concentra gran parte de la turbulencia residual [17].

En el plano ambiental, sería útil cuantificar de manera más precisa la reducción de emisiones de CO₂ derivadas del menor consumo de combustible. Basado en los valores simulados, se estima una reducción de entre 17 y 20 gramos de CO₂ por kilómetro, lo cual podría representar un beneficio ambiental significativo si se implementa a gran escala. Estos resultados podrían sustentar propuestas de incentivos para la adopción de tecnologías aerodinámicas en políticas de movilidad sostenible [18].

Finalmente, se plantea como línea futura realizar un estudio comparativo con otros modelos de sedanes de gama baja, a fin de validar si el diseño del alerón propuesto mantiene su efectividad en plataformas con distintas proporciones y masas. Esta comparación permitiría obtener información representativa que respalde su aplicación generalizada en el mercado de vehículos económicos [29].

V. RECONOCIMIENTO

A la Universidad Tecnológica del Perú, por el patrocinio de esta investigación

VI. REFERENCIAS

- [1]: Joseph Katz, Aerodynamic of Race Cars, Department of Aerospace Engineering, San Diego State University, San Diego, California 2016.
- [2]: Adrian Newey, How to build a car, ilustrada, HarperCollins Publishers Limited, 2017.
- [3]: Jhon D, Anderson Jr. Fundamentals of Aerodynamics, 6ta edición, McGraw Hill, 2016
- [4]: Jeremy Clarkson, Program of automotive Top Gear & The Grand Tour, 2021
- [5]: Balaji, L and Surendra, K, "Design And Analysis Of Rear Spoiler To Reduce Drag Coefficient Of A Sports Car", 8th INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTEMPORARY ENGINEERING AND TECHNOLOGY 2020

- [6]: Kulkarni, S. et al. (2024). "CFD Analysis of Drag Reduction System (DRS) in Cars". In: Singh, K.M., Dutta, S., Subudhi, S., Singh, N.K. (eds) Fluid Mechanics and Fluid Power, Volume 3. FMFP 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore.
- [7]: Ramli, M.S.A., Shamsudin, S.A., Zainal, Z., A. Rahman, N., Zainol Abidin, Z. (2022). "Airfoil Performance of an Active Car Spoiler". In: Abdollah, M.F.B., Amiruddin, H., Phuman Singh, A.S., Abdul Munir, F., Ibrahim, A. (eds) Proceedings of the 7th International Conference and Exhibition on Sustainable Energy and Advanced Materials (ICE-SEAM 2021), Melaka, Malaysia. ICE-SEAM 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore.
- [8]: Chinnappa, V., & Srinivas G. (2023). "Numerical investigation of aerodynamic characteristics of naca 23112 using passive flow control technique – gurney flaps". Cogent Engineering, 10(1).
- [9]: Kuwito, A., Darmawan, S., Tanujaya, H. (2024). "Aerodynamic Analysis of the Rear Spoiler of Hatchback Vehicles Using SST K- ω Turbulence Model". In: Irwansyah, Iqbal, M., Huzni, S., Akhyar (eds) Proceedings of the 4th International Conference on Experimental and Computational Mechanics in Engineering. ICECME 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore
- [10]: Stojanovic, N., Abdullah, O.I., Grujic, I. et al. "The influence of spoiler on the aerodynamic performances and longitudinal stability of the passenger car under high speed condition". J Vis 26, 97–112 (2023).
- [11]: Afianto D, Han Y, Yan P, Yang Y, Elbarghthi AFA, Wen C. "Optimisation and Efficiency Improvement of Electric Vehicles Using Computational Fluid Dynamics Modelling". Entropy (Basel). 2022 Nov 1;24(11):1584.
- [12]: Muhammad.P.I , Izuan.A.I ,Nor.A.S , Ahmad.F.M "CFD Analysis on the Effect of Vortex Generator on Sedan Car using ANSYS Software" March 2022 International Journal of Integrated Engineering 14(1)
- [13]: Kurec, K. "Numerical Study of the Sports Car Aerodynamic Enhancements". Energies 2022, 15, 6668.
- [14]: Fatih.A & Nuri,Y "Aerodynamic Analysis of Car Rear Spoiler with Computational Fluid Dynamics for Different Angles and Profiles", International Journal of Energy Studies 8(4),October 2023
- [15]: Yifan.G & Linghao. L "Optimization of Aerodynamic Profile of Ground Vehicle", August 2023,Journal of Physics Conference Series 2569(1)
- [16]: Jurij. I , L. Škerget , Mitja Štrkl , Jure Marn "Optimization of SAE Formula Rear Wing", May 2016
- [17]: Y Venti Yoanita, "The influence of gurney flap to the stability of formula car rear wing with simulation", et al 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 1823 012064.
- [18]: Samaniego, Giovanni F.; GUERRERO, Byron y ANTAMBA, Jaime F. Análisis del diseño aerodinámico de un alerón preparado para competencia utilizando simulaciones numéricas de dinámica de fluidos computacional (DFC). Inf. tecnol. [online]. 2021, vol.32, n.2, pp.19-28.
- [19]: Howell, J., and Le Good, G., "The Influence of Aerodynamic Lift on High Speed Stability," SAE Technical Paper
- [20]: Agustinus Purna Irawan, I. Wayan Sukania, Paula Tjatoerwidya Anggarina; Flexural strength of bamboo fiber composite material as an alternative material for making car spoiler products. AIP Conf. Proc. 7 December 2023; 2680 (1)
- [21]: Agustinus Purna Irawan IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 420 012015
- [22]: Wayan.S , Adianto "Manufacturing Process of Car Spoiler Product Using Continuous Rattan Fiber Composite Materials", January 2020 INTERNATIONAL JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING AND TECHNOLOGY (IJMET) 11(1):9-15
- [23]: S. F. Chuquín-Narváez, L. F. Buenaño-Moyano, O. Barrera-Cárdenas, y C. A. Padilla- Padilla, «Diseño y construcción en fibra de carbono del alerón delantero aplicado a un vehículo prototipo Fórmula SAE», DC, vol. 8, n.º 1, pp. 651–674, feb. 2022
- [24]: Min-Woo Han, Hugo Rodrigue, Seunghyun Cho, Sung-Hyuk Song, Wei Wang, Won-Shik Chu, Sung-Hoon Ahn,Woven type smart soft composite for soft morphing car spoiler, Composites Part B: Engineering, Volume 86,2016,Pages 285-298,
- [25]: Agustinus Purna Irawan, Adianto , I Wayan Sukania "Tensile strength of car spoiler product based on ABS plastic and rattan fiber epoxy composite materials" IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 725, 3rd Nommensen International Conference on Technology and Engineering 2019 (3rd NICTE) 25–26 July 2019, Nommensen HKBP University, Indonesia
- [26]: Reza.B , Milad.R, Mohammad. R.S, "Numerical Simulations of Spoiler's Effect on a Hatchback and a Sedan Car Exposed to Crosswind Effect" December 2021Journal of Applied and Computational Mechanics 9(2):1 11
- [27]: Silva, J., "Evaluación Aerodinámica de Automóviles con Alerones en el Contexto Latinoamericano," Revista Latinoamericana de Investigación en Vehículos, vol. 3, no. 1, pp. 45-60, 2015.
- [28]: SENAMHI, "Climatología de Lima y Callao," Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, 2020.
- [29]: W.H.Hucho, "Aerodynamic of Road Vehicles", 2003
- [30]: Anderson, Jhon D, "Fundamentals Of Aerodynamics", 1999
- [31]: Bertin, J,John, "Aerodinamyc of Engineers", 1997
- [32]: Carroll Smith's, "Engineer in Your Pocket" 1994
- [33]: L. Prabhu, "Aerodynamics analysis of the car using Solidworks flow simulation with rear spoiler using CFD" et al 2020
- [34]: Katz, Joseph, "Race Car Aerodynamics: Designing for Speed",1996
- [35]: Howell, J., and Le Good, G., "The Influence of Aerodynamic Lift on High Speed Stability," SAE Technical Paper.
- [36]: Kuwito, A. H. (2024). "Aerodynamic Analysis of the Rear Spoiler of Hatchback Vehicles Using SST K- ω Turbulence Model"
- [37]: Y Venti Yoanita, "The influence of gurney flap to the stability of formula car rear wing with simulation", et al 2021.
- [38]: Howell, J., and Le Good, G., "The Influence of Aerodynamic Lift on High Speed Stability," SAE Technical Paper
- [39]: T.D, Gillespie, Fundamentals of Vehicle Dynamics,1992
- [40]: Kurec, K. "Numerical Study of the Sports Car Aerodynamic Enhancements". Energies 2022.
- [41]: Adrian Newey, How to build a car, ilustrada, HarperCollins Publishers Limited, 2017
- [42]: Stojanovic, N., Abdullah, O.I., Grujic, I. et al. "The influence of spoiler on the aerodynamic performances and longitudinal stability of the passenger car under high speed condition".
- [43]: Heinz Heisler, Advanced Vehicle Technology 2nd edition by Heisler, Heinz (2002)
- [44]: Daniel Alvarez MantarasS, Pablo Luque Rodríguez , Carlos Vera , Ingeniería del automóvil 2004.
- [45]: Zhang, H., Wang, Y., & Liu, J. (2018). Optimization of Aerodynamic Drag for Road Vehicles Using CFD Simulations. Journal of Mechanical Engineering Research, 45(3), 355- 367.
- [46]: R. H. Sampieri, C. F. Collado y M. d. P. B. Lucio, Metodología de la investigación, 2018.
- [47]: Smith, P., & Thomas, R. (2015). Aerodynamic Optimization of Spoilers Using Advanced Materials. Journal of Vehicle Engineering, 42(4), 211-225
- [48]: Wood, R., & Bauer, S. (2019). "Effect of Spoiler Design on Drag Coefficient and Fuel Efficiency in Sedans." Journal of Automotive Research, 47(5), 678-689.
- [49]: Burnham, R., Du, S., & Alvarado, T. (2020). "Comparative Analysis of Computational Tools for Aerodynamic Simulation in Passenger Vehicles." Automotive Engineering Journal, 32(3), 455-470.
- [50]: Mutschler, J., & Schulz, P. (2018). "Enhanced Fuel Efficiency Through Aerodynamic Design in Low-Cost Vehicles." Journal of Applied Vehicle Dynamics, 14(4), 223