



**UNIVERSIDAD  
DEL AZUAY**

Facultad de Ciencia y Tecnología

Escuela de Ingeniería Automotriz

**Revisión bibliográfica de la aerodinámica vehicular y su integración en el  
diseño de un prototipo.**

Trabajo de titulación previo a la obtención del grado académico de  
Ingeniero Automotriz

**Christian Andrés Sarmiento Criollo**

Director: Ing. Gustavo Álvarez-Coello

Cuenca-Ecuador

2026

## Dedicatoria

A mi madre, Diana, por ser el corazón de este logro. Por su amor, su fuerza y por haber estado presente incluso en los momentos más difíciles. Esta meta lleva mucho de su esfuerzo, de su paciencia y de la confianza que siempre depositó en mí.

A mi abuelo, Sergio, por ser un ejemplo de vida, sabiduría y perseverancia. Su presencia, sus palabras y su manera de acompañarme han dejado una huella profunda en este camino.

A mi padre, José Luis, y a mis abuelos, por formar parte de mi historia, de mi crecimiento y de las bases que me han permitido llegar hasta aquí.

A mi familia, porque este logro no representa únicamente el final de una etapa académica, sino también el reflejo de los valores, el cariño y la fortaleza que me han acompañado durante toda mi vida.

Con mucho cariño, les dedico este logro, porque de una u otra manera también les pertenece.

Christian Sarmiento

## Agradecimientos

Agradezco profundamente a mi familia, en especial a mi abuelo, el Dr. Sergio Vicente Criollo Pauta, por su apoyo, comprensión y acompañamiento durante todo mi proceso de formación académica. Su confianza, motivación y cariño han sido fundamentales para superar cada etapa y continuar avanzando hacia el cumplimiento de mis metas.

De manera especial, expreso mi más profundo agradecimiento a mi madre, Diana, por su esfuerzo, amor incondicional y apoyo constante. Gracias por ser mi guía y mi fortaleza, por acompañarme en cada etapa y por enseñarme, con tu ejemplo, el valor de la perseverancia, la responsabilidad y la dedicación. Este logro también es reflejo de tu entrega, sacrificio y confianza en mí a lo largo de mi vida

También expreso mi agradecimiento a mi padre, José Luis, por su apoyo y por haber formado parte de mi proceso de crecimiento personal y académico. Su presencia ha contribuido, de una u otra manera, a la culminación de esta etapa importante en mi vida.

También agradezco con mucho cariño a mis abuelos, quienes han sido parte esencial de mi formación personal y académica. Su apoyo, consejos y ejemplo han contribuido significativamente a mi crecimiento, motivándome a continuar avanzando hacia el cumplimiento de mis metas.

De igual manera, agradezco a cada uno de los docentes que formaron parte de mi formación académica, quienes, mediante sus conocimientos, enseñanzas y compromiso, contribuyeron al desarrollo de este proceso.

Agradezco al Ing. Gustavo Álvarez-Coello por su apoyo, orientación y confianza durante la realización de este trabajo de titulación.

A todos quienes, de una u otra manera, formaron parte de este camino, les expreso mi más sincera gratitud.

Christian Sarmiento

## Resumen

El presente trabajo analiza la aerodinámica vehicular mediante una revisión bibliográfica orientada a definir criterios integrables en el diseño preliminar de un prototipo de alta eficiencia. Para ello, se recopilaron y sistematizaron fuentes científicas, técnicas y bibliográficas relacionadas con los fundamentos de la mecánica de fluidos, el coeficiente de arrastre, la sustentación, la distribución de presiones, la separación del flujo, la formación de estela y el uso de herramientas como CFD y túneles de viento. El análisis permitió identificar que la eficiencia aerodinámica no depende únicamente del coeficiente de arrastre  $C_d$ , sino de su relación con el área frontal, el producto  $C_dA$ , la geometría frontal y posterior, el flujo inferior, las ruedas, los carenados, los apéndices aerodinámicos y las condiciones de operación del vehículo. Los resultados evidencian que las estrategias más relevantes para reducir el arrastre se concentran en controlar la separación del flujo, disminuir la estela posterior, reducir el área frontal, mejorar la continuidad superficial y optimizar elementos como ruedas, conductos de refrigeración y geometría posterior. Asimismo, se determinó que, en prototipos tipo Shell Eco-marathon, el diseño debe priorizar una carrocería compacta, cerrada, de baja área frontal y con forma longitudinal inspirada en una gota recortada, siempre considerando restricciones de seguridad, visibilidad, construcción y reglamento. Finalmente, se establecen recomendaciones técnicas para orientar el diseño aerodinámico preliminar del prototipo, priorizando la reducción del producto  $C_dA$ , la estabilidad y la viabilidad constructiva.

## Palabras clave

Aerodinámica; arrastre; eficiencia energética; prototipos; CFD

## Abstract

This study analyzes vehicle aerodynamics through a bibliographic review aimed at defining criteria that can be integrated into the preliminary design of a high-efficiency prototype. Scientific, technical, and bibliographic sources related to fluid mechanics, drag coefficient, lift, pressure distribution, flow separation, wake formation, and the use of tools such as CFD and wind tunnels were collected and systematized. The analysis identified that aerodynamic efficiency does not depend only on the drag coefficient  $C_d$ , but also on its relationship with frontal area, the  $C_dA$  product, front and rear geometry, underbody flow, wheels, fairings, aerodynamic appendages, and vehicle operating conditions. The results show that the most relevant strategies for reducing drag focus on controlling flow separation, decreasing the rear wake, reducing frontal area, improving surface continuity, and optimizing elements such as wheels, cooling ducts, and rear geometry. Likewise, it was determined that, in Shell Eco-marathon-type prototypes, the design should prioritize a compact, closed body with a low frontal area and a longitudinal shape inspired by a truncated teardrop, while considering safety, visibility, manufacturing, and regulatory constraints. Finally, technical recommendations are established to guide the preliminary aerodynamic design of the prototype, prioritizing the reduction of the  $C_dA$  product, stability, and construction feasibility.

## Keywords

Aerodynamics; drag; energy efficiency; prototypes; CFD.

## Contenido

<b>Dedicatoria</b> .....	ii
<b>Agradecimientos</b> .....	iii
<b>Resumen</b> .....	iv
<b>Palabras clave</b> .....	iv
<b>Abstract</b> .....	v
<b>Keywords</b> .....	v
<b>Introducción</b> .....	1
<b>Contexto</b> .....	1
<b>Problemática y justificación</b> .....	1
<b>Marco teórico y estado del arte</b> .....	1
<b>Objetivo general</b> .....	9
<b>Objetivos específicos</b> .....	9
<b>Alcance</b> .....	9
<b>Materiales y métodos</b> .....	10
<b>Procedimiento</b> .....	11
<b>Resultados</b> .....	43
<b>Conclusiones</b> .....	49
<b>Lista de Referencias</b> .....	50
<b>Apéndices</b> .....	52

## Índice de figuras

Figura 1. Representación de un vehículo de Fórmula 1 en un túnel de viento.....	2
Figura 2. Régimen laminar de un fluido alrededor de varios cuerpos .....	3
Figura 3. Diagrama de turbulencias.....	3
Figura 4. Fuerzas aerodinámicas .....	5
Figura 5. Coeficiente de arrastre de varios cuerpos .....	6
Figura 6. Prototipo Maxwell Shell Eco-marathon 2017 .....	6
Figura 7. Vehículo en un túnel de viento.....	8
Figura 8. Análisis CFD .....	9
Figura 9. Estela aerodinámica .....	11
Figura 10. Vórtices.....	13
Figura 11. Distribución de presiones .....	15
Figura 12. Fuerza de arrastre y sustentación en diferentes tipos de vehículos .....	16
Figura 13. Potencia requerida para un vehículo de pasajeros.....	16
Figura 14. Coeficientes de arrastre para distintos tipos de vehículos de pasajeros .....	18
Figura 15. Separación de flujo en la parte frontal del vehículo .....	19
Figura 16. Coeficiente de arrastre en función del ángulo del parabrisas .....	19
Figura 17. Influencia de la geometría frontal .....	20
Figura 18. Análisis comparativo de las estructuras de flujo .....	21

Figura 19. Análisis CFD del modelo DrivAer.....	22
Figura 20. Influencia de la geometría posterior .....	23
Figura 21. Efecto del punto de separación en la deposición de suciedad de la zona posterior ..	24
Figura 22. Influencia del alerón posterior en el coeficiente de arrastre y sustentación .....	25
Figura 23. Influencia del apéndice frontal en el coeficiente de arrastre y sustentación .....	26
Figura 24. Dimensiones del alerón frontal .....	27
Figura 25. Carenado .....	28
Figura 26. Modelo simplificado .....	28
Figura 27. Recirculación del flujo de aire en la cavidad de la rueda .....	29
Figura 28. Coeficiente de presión en rueda.....	30
Figura 29. Flujo de aire en el compartimiento del motor .....	31
Figura 30. Influencia del sistema de refrigeración en el coeficiente de arrastre .....	31
Figura 31. Flujo de aire a través del sistema de refrigeración .....	32
Figura 32. Influencia del ángulo de ataque en el coeficiente de arrastre y sustentación .....	33
Figura 33. Influencia de la altura del vehículo respecto al suelo en el coeficiente de arrastre y sustentación.....	34
Figura 34. Influencia de la carga en el coeficiente de arrastre y de sustentación .....	35
Figura 35. Influencia de las condiciones de operación en el coeficiente de arrastre .....	37
Figura 36. Optimización del cuerpo del vehículo en el coeficiente de arrastre .....	38
Figura 37. Efecto de la reducción del coeficiente de arrastre en el consumo de combustible ...	39
Figura 38. Prototipo de alta eficiencia.....	40
Figura 39. Diseño del prototipo.....	40
Figura 40. Análisis CFD de un prototipo de alta eficiencia.....	41
Figura 41. Análisis CFD del prototipo Si Pitung G4 .....	42
Figura 42. Prototipo Nebula .....	43

## Índice de tablas

Tabla 1. Contribución al coeficiente de arrastre por ubicación .....	12
Tabla 2. Coeficiente de presión .....	14
Tabla 3. Potencia requerida .....	17
Tabla 4. Resultados del coeficiente de arrastre.....	29
Tabla 5. Fundamentos aerodinámicos .....	44
Tabla 6. Recomendaciones.....	47
Tabla 7. Coeficiente de arrastre de distintos tipos de vehículos .....	52
Tabla 8. Coeficientes de arrastre y sustentación de distintos vehículos .....	55
Tabla 9. Coeficientes de arrastre de distintos vehículos .....	56
Tabla 10. Coeficientes de arrastre de distintos prototipos.....	61

# Introducción

## Contexto

La aerodinámica vehicular constituye un área fundamental en el diseño y desarrollo de automóviles modernos. A medida que la industria automotriz ha evolucionado, factores como la eficiencia energética, la seguridad y el confort han impulsado la necesidad de optimizar el comportamiento del flujo de aire alrededor de los vehículos. La resistencia aerodinámica influye directamente en el consumo de combustible y en la autonomía de los automóviles eléctricos, mientras que fenómenos como la sustentación y los momentos aerodinámicos inciden en la estabilidad y el control del vehículo, especialmente a altas velocidades (Mirmahdi & Khoubrou, 2021).

El diseño de la carrocería y el uso de elementos aerodinámicos auxiliares, tales como alerones, deflectores y difusores, permiten controlar el flujo de aire, reduciendo turbulencias y mejorando la adherencia al pavimento. En este sentido, comprender los principios básicos de la aerodinámica no solo permite alcanzar mayores niveles de eficiencia y seguridad, sino que también representa un factor clave en el desarrollo de vehículos sostenibles y competitivos en el mercado actual (Valencia & Lepin, 2024).

## Problemática y justificación

Una carrocería mal optimizada aerodinámicamente puede incrementar de manera significativa la resistencia al avance, lo que se traduce en mayor consumo de combustible, reducción de la autonomía en vehículos eléctricos, incremento de emisiones y disminución de la estabilidad del vehículo. Este problema es especialmente relevante en el contexto actual, donde los estándares ambientales son cada vez más estrictos y la competencia tecnológica exige vehículos más eficientes.

En el ámbito académico y de investigación, aún persiste la necesidad de integrar de forma sistemática los fundamentos teóricos de la aerodinámica, el diseño estructural de carrocerías y las metodologías de simulación computacional. La falta de este enfoque integral dificulta el desarrollo de propuestas viables que combinen eficiencia aerodinámica, factibilidad constructiva y seguridad estructural.

Además, permite aplicar de manera técnica principios teóricos de la mecánica de fluidos y de la aerodinámica vehicular al diseño práctico de carrocerías. Desde el punto de vista social, el estudio promueve la seguridad de los ocupantes al mejorar la estabilidad y el control del vehículo frente a perturbaciones aerodinámicas.

Desde un punto de vista ambiental aporta al desarrollo de vehículos más limpios y sostenibles al reducir la resistencia aerodinámica y, con ello, el consumo de combustibles fósiles y las emisiones. Por último, cabe recordar que económicamente es viable optimizar la aerodinámica de un vehículo ya que implica menores costos de operación y mayor competitividad para los fabricantes en un mercado global cada vez más exigente.

## Marco teórico y estado del arte

La aerodinámica ejerce su mayor influencia en los automóviles y camiones modernos a través de su contribución a la resistencia al avance (road load). Las fuerzas aerodinámicas que

actúan sobre un vehículo provienen de dos fuentes principales: la resistencia de forma (o de presión) y la fricción viscosa. Estas fuerzas interactúan con el vehículo generando resistencia (drag), sustentación o carga aerodinámica (lift o downforce), fuerzas laterales, momentos de balanceo, cabeceo y guiñada, además de ruido. Todos estos efectos influyen directamente en el consumo de combustible, el comportamiento dinámico y los niveles de ruido, vibración y aspereza (NVH) del vehículo (Gillespie, 2021).

La aerodinámica vehicular se fundamenta en los principios de la mecánica de fluidos, donde el aire es tratado como un fluido compresible y viscoso. Conceptos como la ecuación de Bernoulli, las ecuaciones de Navier–Stokes y la teoría de la capa límite explican fenómenos como la separación del flujo y la formación de turbulencias. El número de Reynolds es clave para determinar si el flujo alrededor del vehículo es laminar o turbulento, siendo este último predominante en condiciones reales de operación, como se muestra en la Figura 1.

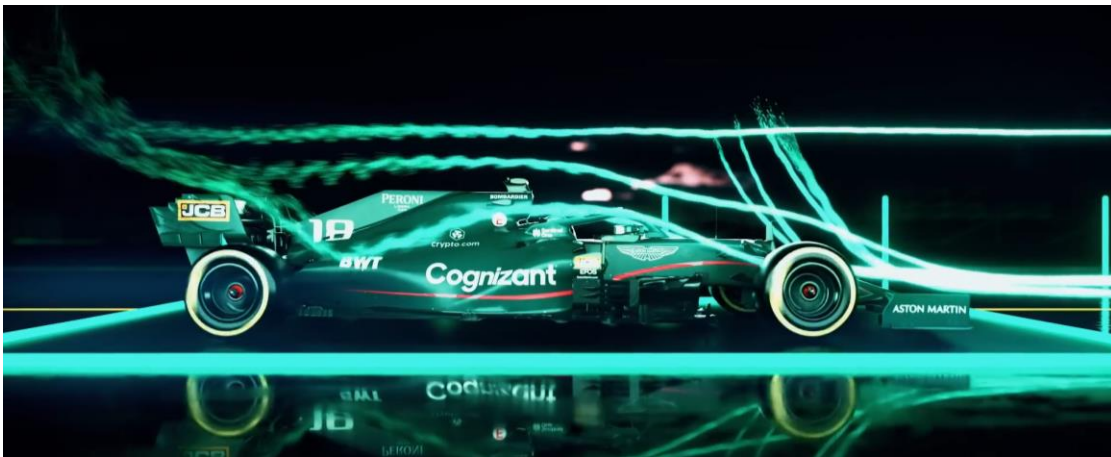


Figura 1. Representación de un vehículo de Fórmula 1 en un túnel de viento.  
Fuente: Aston Martin Aramco Formula One™ Team (2021).

En el caso del flujo a través de una tubería de sección circular, los estudios experimentales han determinado que el régimen laminar se presenta cuando el número de Reynolds ( $Re$ ) es inferior a 2300, mientras que el régimen turbulento se manifiesta para valores superiores a 4000. Dentro del rango comprendido entre 2300 y 4000 se identifica una zona de transición, en la cual el flujo puede comportarse de manera laminar o turbulenta según las condiciones del sistema. Factores como la rugosidad interna de la tubería, la estabilidad del flujo de entrada y la presencia de perturbaciones influyen significativamente en la determinación del régimen predominante (González & Castellano, 2014).

*Régimen laminar*  $\ll$  *Régimen crítico*  $\ll$  *Régimen turbulento*

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \tag{1}$$

En donde:

- $\rho$  = Densidad del aire
- $v$  = Velocidad
- $L$  = Longitud característica

$\mu$  = Viscosidad dinámica del fluido

El movimiento de los fluidos puede clasificarse principalmente en dos regímenes: laminar y turbulento, los cuales se diferencian por el comportamiento de las partículas que componen el flujo y por la influencia relativa de la viscosidad. En el régimen laminar, las partículas del fluido se desplazan siguiendo trayectorias ordenadas y paralelas, formando capas o láminas que se deslizan unas sobre otras sin producir una mezcla apreciable entre sí, como se muestra en la Figura 2. En este tipo de flujo, la viscosidad constituye el factor físico dominante, actuando como un elemento estabilizador que atenúa cualquier perturbación que pueda generar turbulencia (Fárez & Rockwood, 2009).

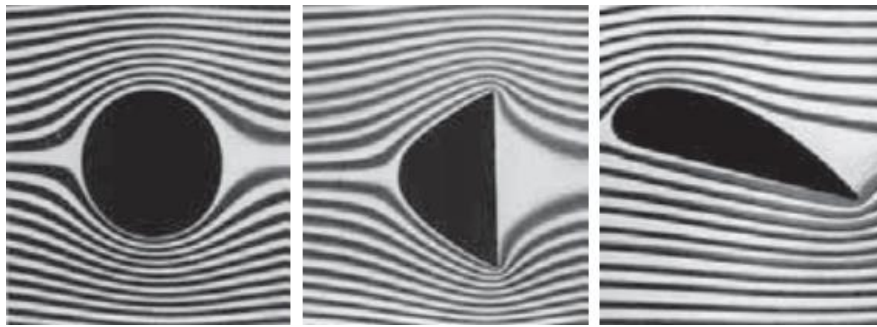


Figura 2. Régimen laminar de un fluido alrededor de varios cuerpos

Fuente: Hugh & Freedman. (2009). *Física universitaria volumen 1*.

Por otro lado, en el régimen turbulento, las partículas se mueven de manera irregular y desordenada, presentando variaciones continuas de velocidad y dirección, acompañadas de la formación de torbellinos, como se observa en la Figura 3. Este comportamiento se manifiesta generalmente cuando la velocidad del flujo aumenta y la acción viscosa deja de ser suficiente para mantener la estabilidad del movimiento. En estas condiciones, las capas de fluido pierden su uniformidad, generándose un marcado gradiente de velocidad, especialmente en las proximidades de las paredes sólidas, donde las partículas en contacto deben mantener velocidad nula debido a la condición de no deslizamiento (Fárez & Rockwood, 2009).

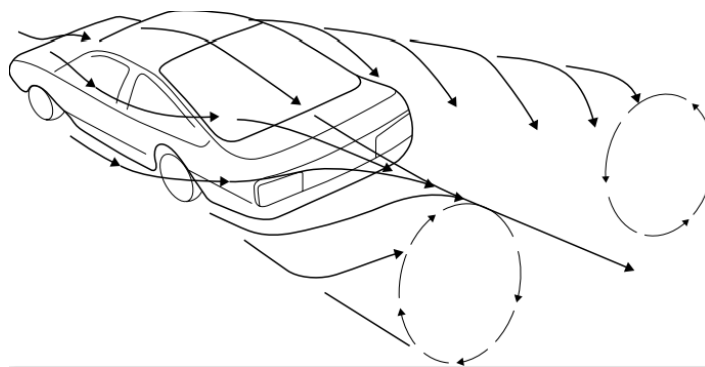


Figura 3. Diagrama de turbulencias

Fuente: Gillespie, T. D. (2021). *Fundamentals of Vehicle Dynamics Revised Edition*.

El flujo de aire ejerce tres fuerzas principales, como se muestra en la Figura 4: resistencia al avance (drag), sustentación (lift) y fuerza lateral (side force), a las que se suman tres

momentos: de guiñada (yaw), de cabeceo (pitch) y de balanceo (roll), los cuales condicionan la estabilidad direccional y dinámica del vehículo. Las fuerzas aerodinámicas se cuantifican mediante coeficientes adimensionales:  $C_D$  (coeficiente de arrastre), que mide la oposición al avance;  $C_L$  (coeficiente de sustentación), que cuantifica el efecto vertical; y  $C_S$  (coeficiente lateral), que evalúa la sensibilidad frente a vientos cruzados (Gillespie, 2021).

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

En donde:

$F_D$  = Resistencia al avance o fuerza de arrastre

$\rho$  = Densidad del aire

$C_D$  = Coeficiente de arrastre

$A$  = Área frontal del vehículo

$v$  = Velocidad

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L A v^2 \quad (3)$$

En donde:

$F_L$  = Sustentación

$\rho$  = Densidad del aire

$C_L$  = Coeficiente de sustentación

$A$  = Área de planta del vehículo

$v$  = Velocidad

$$F_S = \frac{1}{2} \rho C_S A v^2 \quad (4)$$

En donde:

$F_S$  = Fuerza lateral

$\rho$  = Densidad del aire

$C_S$  = Coeficiente lateral

$A$  = Área lateral del vehículo

$v$  = Velocidad

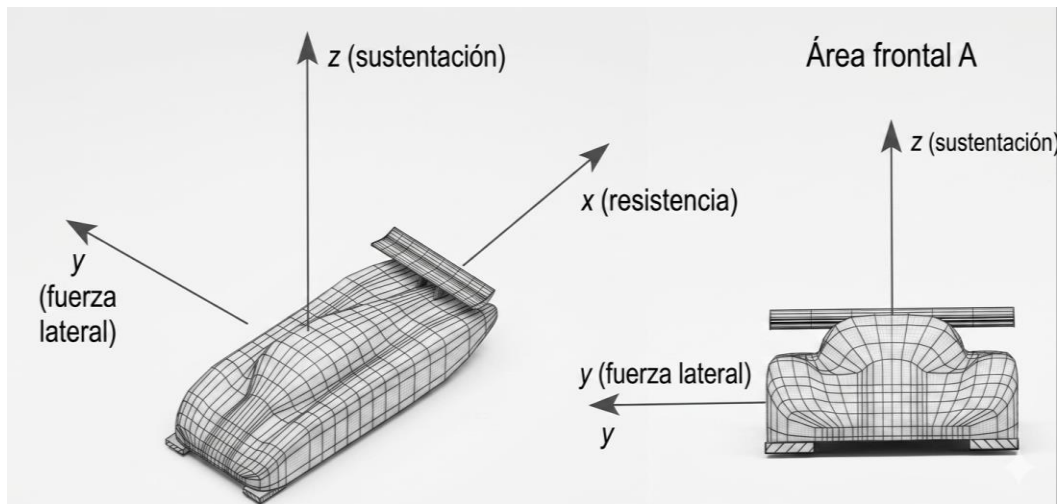


Figura 4. Fuerzas aerodinámicas

Fuente: Katz, (2006). *Race Car Aerodynamics Designing for Speed*

Estos coeficientes permiten comparar diseños de carrocerías y evaluar mejoras en eficiencia. El diseño de la carrocería impacta directamente en la magnitud de las fuerzas aerodinámicas: la zona frontal define la cantidad de aire que se desvía y determina la resistencia de presión; la parte inferior, mediante superficies planas o carenadas, reduce turbulencias y mejora el flujo; la zona posterior controla la formación de la estela y los vórtices, principales responsables del arrastre; y los apéndices aerodinámicos, como alerones, deflectores, faldones y difusores, incrementan el control del flujo, reducen la sustentación y mejoran la estabilidad (Gillespie, 2021).

El coeficiente de arrastre  $C_D$  representa la resistencia aerodinámica de un cuerpo, la cual está determinada principalmente por su forma, como se muestra en la Figura 5. Cuanto menor es este valor, menor será la oposición al avance. La denominada forma de lágrima, caracterizada por un contorno redondeado en la parte frontal y una terminación cónica alargada en la parte posterior, presenta un valor de  $C_D$  de aproximadamente 0,007. No obstante, dicha configuración resulta poco eficiente desde el punto de vista práctico debido a su desfavorable relación entre volumen y espacio interior útil (Gillespie, 2021).

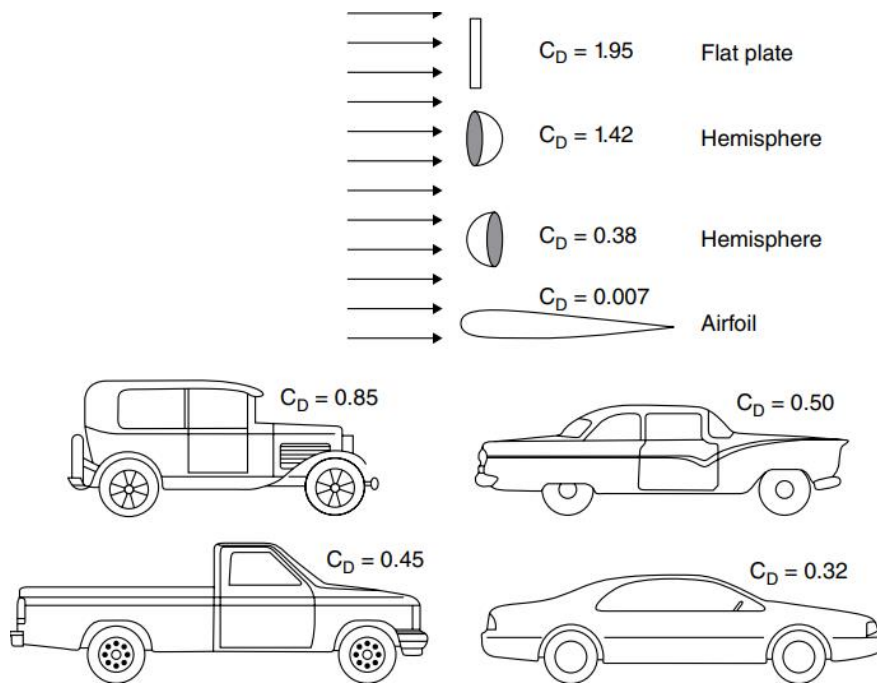


Figura 5. Coeficiente de arrastre de varios cuerpos

Fuente: Gillespie, T. D. (2021). *Fundamentals of Vehicle Dynamics Revised Edition*.

Este principio se observa principalmente en el diseño de prototipos, donde la comodidad interior se deja en segundo plano y el objetivo principal es optimizar la eficiencia energética. Un ejemplo representativo es la competencia Shell Eco-marathon, en la cual los equipos buscan alcanzar el menor coeficiente de arrastre posible  $C_D$  mediante el diseño de carrocerías que reproducen, en la medida de lo posible, la mencionada forma de lágrima, como se observa en la Figura 6.



Figura 6. Prototipo Maxwell Shell Eco-marathon 2017

Fuente: Grady et al., (2019). *A Study of Energy Losses in the World's Most Fuel-Efficient Vehicle*.

Shell Eco-marathon es una competencia internacional organizada por la empresa Shell, cuyo propósito principal es fomentar la innovación tecnológica, la eficiencia energética y la sostenibilidad en el ámbito de la movilidad. En este evento participan equipos conformados principalmente por estudiantes universitarios de ingeniería, diseño y tecnología, quienes deben

diseñar, construir y poner a prueba vehículos experimentales capaces de recorrer la mayor distancia posible empleando la menor cantidad de energía.

En el caso de los vehículos eléctricos, el enfoque principal se centra en maximizar la eficiencia energética del sistema de propulsión y minimizar las pérdidas mecánicas y aerodinámicas. Para lograrlo, los equipos deben abordar diferentes áreas de desarrollo tecnológico tales como la gestión energética, selección de materiales, sistemas de propulsión y el diseño aerodinámico.

La ecuación de Navier-Stokes sirve para modelar la aerodinámica de los vehículos ya que describe el movimiento de los fluidos viscosos mediante la aplicación de la segunda ley de Newton a un elemento diferencial de fluido. Estas ecuaciones relacionan la aceleración del fluido con las fuerzas que actúan sobre él, incluyendo el gradiente de presión, las fuerzas viscosas debidas a la fricción interna entre las partículas del fluido y las fuerzas externas como la gravedad (González & Castellano, 2015)

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (5)$$

En donde:

$\rho$  = Densidad

$u$  = Velocidad

$p$  = Presión

$\mu$  = Viscosidad dinámica

$f$  = Fuerzas externas

Matemáticamente, constituyen un sistema de ecuaciones diferenciales parciales no lineales que gobiernan la conservación de la cantidad de movimiento en un fluido. La inclusión del término viscoso permite modelar los efectos de fricción interna que no son considerados en las ecuaciones de Euler. Debido a su complejidad matemática, las soluciones analíticas solo pueden obtenerse en casos particulares, por lo que en la mayoría de aplicaciones prácticas se emplean métodos numéricos o computacionales para su resolución (González & Castellano, 2015).

Sin embargo, para garantizar la confiabilidad de los resultados obtenidos mediante simulaciones numéricas, es común complementar estos análisis con estudios experimentales. En este contexto, los túneles de viento constituyen una de las herramientas más utilizadas para el análisis aerodinámico.

Los túneles de viento son instalaciones experimentales utilizadas para estudiar el comportamiento del flujo de aire alrededor de un objeto en condiciones controladas. En estas instalaciones es posible regular variables como la velocidad, dirección y temperatura del aire, lo que permite realizar mediciones aerodinámicas precisas y repetibles. Durante las pruebas, el

modelo del vehículo permanece fijo dentro de la sección de ensayo mientras el aire se desplaza a través del túnel, simulando el movimiento relativo entre el vehículo y el flujo de aire, como se muestra en la Figura 7. En el desarrollo de vehículos, los túneles de viento se utilizan frecuentemente con modelos a escala para evaluar el diseño aerodinámico, permitiendo analizar parámetros como el coeficiente de arrastre, las fuerzas aerodinámicas y la distribución de presiones sobre la carrocería (Obidi, 2014).



*Figura 7. Vehículo en un túnel de viento*

*Fuente: Fu, (2023). Aerodynamics and Drag of a Car*

Debido a su complejidad tecnológica y a los elevados costos asociados a su construcción y operación, los túneles de viento de gran escala suelen encontrarse principalmente en grandes fabricantes de automóviles o en centros especializados de investigación. En la actualidad, el desarrollo aerodinámico de los vehículos también se apoya en herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), las cuales permiten analizar numéricamente el flujo de aire alrededor del automóvil. Estas simulaciones contribuyen a reducir costos y a acelerar el proceso de optimización del diseño. No obstante, debido a que los modelos computacionales pueden presentar diferencias respecto a las condiciones reales de operación, los resultados obtenidos mediante CFD suelen validarse experimentalmente mediante pruebas en túneles de viento (Fu, 2023).

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una herramienta utilizada para la simulación del comportamiento de los fluidos y de los procesos de transferencia de calor. Su funcionamiento se basa en la aplicación de métodos numéricos y algoritmos computacionales para resolver las ecuaciones fundamentales que describen la conservación de la masa, el momento y la energía dentro de un fluido (Barazal et al., 2002).

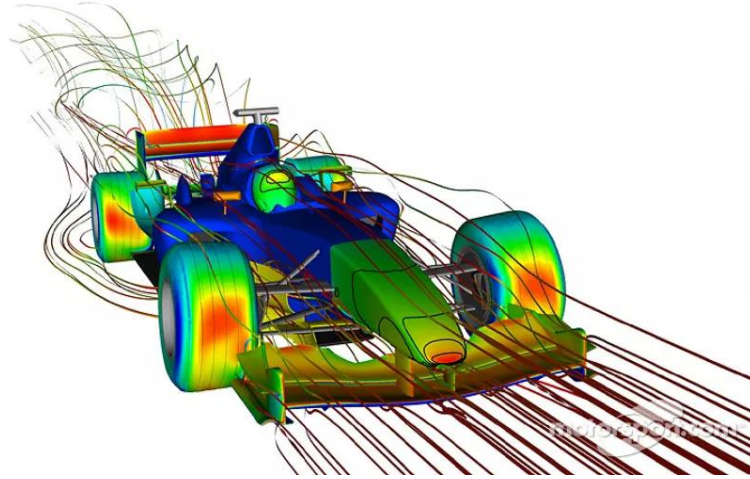


Figura 8. Análisis CFD

Fuente: Nugnes, F. (2025), Túneles de viento: cómo un láser está cambiando las simulaciones, Motorsport.

Mediante estas técnicas es posible analizar de manera detallada el campo de velocidades, presiones y temperaturas del flujo, como se muestra en la Figura 8, permitiendo obtener información que en muchos casos no puede ser medida directamente mediante métodos experimentales. Además, la CFD facilita la visualización de estructuras transitorias y fenómenos complejos del flujo, lo que permite evaluar y analizar modificaciones en el diseño antes de la construcción o implementación del proyecto (Barazal et al., 2002).

### **Objetivo general**

Analizar la aerodinámica vehicular mediante una revisión bibliográfica para definir criterios integrables en el diseño de un prototipo.

### **Objetivos específicos**

- Identificar los fundamentos teóricos y parámetros clave de la aerodinámica vehicular.
- Revisar estudios y desarrollos relevantes de la industria vinculados al diseño aerodinámico.
- Sintetizar metodologías y criterios de diseño aplicables a prototipos.
- Establecer recomendaciones basadas en la literatura para orientar el diseño aerodinámico del prototipo.

### **Alcance**

El presente estudio se limita a la revisión y análisis bibliográfico de los principios, parámetros y estrategias aerodinámicas aplicadas a vehículos terrestres, mediante la recopilación y sistematización de literatura científica, técnica y de la industria automotriz. A partir de esta información secundaria, se analizan configuraciones orientadas a la reducción del arrastre y al mejor desempeño aerodinámico, con el fin de extraer criterios y lineamientos aplicables al diseño preliminar de un prototipo. El alcance no incluye simulaciones computacionales, ensayos experimentales ni validaciones prácticas, concentrándose exclusivamente en la integración teórica y documental del conocimiento disponible.

## Materiales y métodos

El estudio se desarrollará bajo un enfoque cualitativo y descriptivo, empleando una revisión bibliográfica sistemática y un análisis comparativo de información técnica proveniente de fuentes académicas y científicas relacionadas con la aerodinámica vehicular y la eficiencia energética. Este enfoque permitirá establecer la relación entre los parámetros aerodinámicos y el consumo energético en vehículos de distintos tipos, incluyendo prototipos de movilidad sostenible.

### Revisión bibliográfica sistemática

Se utilizarán fuentes académicas y técnicas obtenidas de bases de datos especializadas como ScienceDirect, Scopus, SpringerLink, Google Scholar y repositorios institucionales.

También se consultarán libros de texto sobre dinámica de fluidos, aerodinámica automotriz y diseño de vehículos sostenibles. Además, se considerarán artículos científicos, informes técnicos y documentos emitidos por la competencia Shell Eco-Marathon, en los que se aborden innovaciones aerodinámicas aplicadas a prototipos eléctricos y de bajo consumo.

La metodología se estructurará en cuatro etapas principales, fundamentadas en procedimientos utilizados en revisiones bibliográficas científicas (Snyder, 2019).

Se realizará una búsqueda de literatura empleando palabras clave como aerodinámica vehicular, coeficiente de arrastre ( $C_D$ ), eficiencia energética, movilidad sostenible y prototipos eléctricos.

La búsqueda seguirá los criterios propuestos por Snyder (2019), quien establece que la revisión sistemática permite sintetizar el conocimiento existente mediante la selección, evaluación y análisis crítico de la literatura relevante.

### Selección y clasificación de la información

Los documentos identificados serán evaluados según criterios de relevancia, actualidad y rigor metodológico.

Se aplicarán criterios de inclusión (pertinencia temática, publicaciones científicas revisadas por pares) y exclusión (fuentes no verificadas o de carácter divulgativo).

La información seleccionada se organizará en tres categorías:

- a) fundamentos teóricos de la aerodinámica vehicular;
- b) casos de vehículos de producción, deportivos y eléctricos;
- c) prototipos de movilidad sostenible (como los de la Shell Eco-Marathon).

### Análisis comparativo

Se analizarán los casos seleccionados considerando parámetros como el coeficiente de arrastre ( $C_D$ ), el área frontal, la potencia requerida y el consumo energético.

Este procedimiento permitirá establecer comparaciones entre distintas soluciones aerodinámicas y su impacto en la eficiencia energética, siguiendo el enfoque comparativo propuesto por Creswell (2009) para estudios descriptivos.

## Síntesis y discusión de resultados

Se elaborará una síntesis integradora de los hallazgos más relevantes, destacando las estrategias de diseño aerodinámico que hayan mostrado mejoras en la eficiencia energética.

A partir del análisis comparativo se identificarán tendencias, limitaciones y recomendaciones que orienten futuras investigaciones en movilidad sostenible.

## Procedimiento

La resistencia aerodinámica de un vehículo se origina principalmente por el flujo de aire que rodea la carrocería y, en menor medida, por el aire que atraviesa los sistemas de refrigeración, calefacción y ventilación. En automóviles de pasajeros, el flujo externo es el factor predominante, ya que representa más del 90 % de la resistencia aerodinámica total. Esta resistencia externa se debe a dos efectos principales los cuales son la resistencia por presión y la fricción superficial. La primera aparece por la distribución de presiones normales sobre la carrocería, especialmente en zonas donde el flujo se separa y se forma la estela como se observa en la Figura 9; mientras que la segunda se produce por los esfuerzos cortantes dentro de la capa límite próxima a la superficie del vehículo (Wong, 2022).

La estela aerodinámica que se forma constituye una de las regiones más importantes en el análisis del comportamiento aerodinámico de vehículos. Esta se forma como consecuencia de la separación del flujo en la parte posterior del automóvil, fenómeno que ocurre cuando el aire deja de seguir la geometría de la superficie debido a pérdidas de energía en la capa límite. Como resultado, se genera una zona caracterizada por flujo altamente turbulento, con presencia de vórtices y fluctuaciones de velocidad y presión, lo que se define como una estela no estacionaria (Katz, 2006).

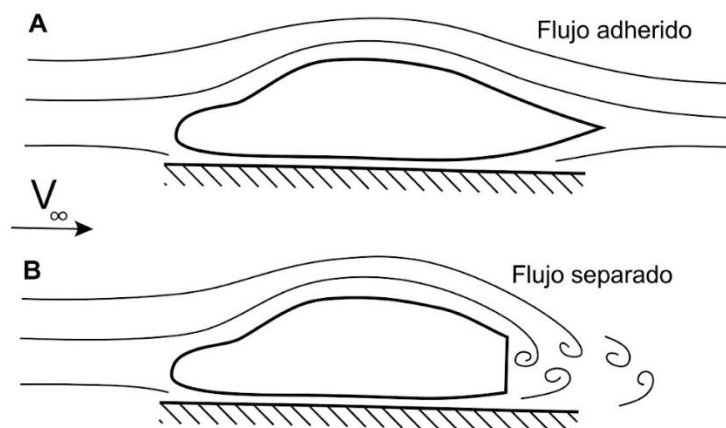


Figura 9. Estela aerodinámica

Fuente: Katz, (2006). *Race Car Aerodynamics Designing for Speed*

Desde el punto de vista físico, la estela se asocia a una región de baja presión detrás del vehículo, producto de la incapacidad del flujo para recomponerse tras la separación. Esta

diferencia de presión entre la parte frontal y posterior del vehículo constituye la resistencia por presión (Katz, 2006).

Además, Wong (2022) menciona que, en vehículos de pasajeros con acabados superficiales convencionales, la resistencia por presión es la más importante, pues constituye más del 90 % de la resistencia aerodinámica externa. Sin embargo, la fricción superficial puede ser más relevante en vehículos largos, como autobuses o conjuntos tractor-remolque. A continuación, se presenta la Tabla 1, la contribución de diferentes fuentes al coeficiente de arrastre ( $\Delta C_d$ )

*Tabla 1. Contribución al coeficiente de arrastre por ubicación*

*Fuente: Katz, (2006). Race Car Aerodynamics Designing for Speed*

<b>Ubicación / Origen del arrastre</b>	<b><math>\Delta C_d</math></b>
1. Fricción superficial	0.04–0.05
2. Arrastre por enfriamiento	0.00–0.06
3. Flujo interno, ventilación	0.00–0.05
4. Arrastre de forma (separación del flujo)	0.00–0.45
5. Arrastre inducido por sustentación	0.00–0.60

Además, las pérdidas de momento en la estela y la generación de vórtices no deben entenderse como resistencias adicionales, sino como manifestaciones de los mismos mecanismos de presión y fricción.

De acuerdo con Katz (2006), la presencia de vórtices dentro de la estela permite comprender con mayor detalle el comportamiento tridimensional y no estacionario del flujo separado. Un vórtice puede definirse como una estructura del flujo en la que las partículas de aire giran alrededor de un eje, acumulando momento angular.

Estas estructuras aparecen principalmente en regiones donde existen fuertes gradientes de presión, bordes geométricos o zonas de separación del flujo. En el caso de los vehículos, pueden formarse alrededor de los pasos de rueda, en la parte posterior de la carrocería y en los extremos de superficies aerodinámicas, como alerones o apéndices aerodinámicos.

En superficies como los alerones, la diferencia de presión entre sus caras produce vórtices de estela o trailing vórtices, como se muestra en la Figura 10A. Estos suelen aparecer como pares contrarrotantes que se desarrollan en la región posterior a la separación del flujo del vehículo.

Dichos vórtices inducen movimientos secundarios en el flujo, como corrientes ascendentes (upwash) y descendentes (downwash). Como consecuencia, modifican la distribución de presiones e influyen tanto en el arrastre como en la generación de carga aerodinámica negativa o downforce.

Asimismo, los vórtices tienden a persistir en el flujo y no aparecen ni desaparecen de forma abrupta. Por el contrario, se desarrollan como líneas continuas, lo cual explica su permanencia dentro de la estela y su influencia en el comportamiento aerodinámico del vehículo.

La interacción entre vórtices puede generar fenómenos específicos, como el vortex roll-up, tal como se aprecia en la Figura 10B. Este ocurre cuando dos vórtices con el mismo sentido de rotación tienden a enrollarse entre sí debido a las velocidades inducidas que producen.

Además, cuando un vórtice interactúa con una superficie cercana, puede aumentar localmente la velocidad del aire y reducir la presión. Este fenómeno genera una succión inducida que puede aprovecharse para controlar la separación del flujo o mejorar la carga aerodinámica.

Sin embargo, los vórtices también pueden volverse inestables y experimentar ruptura o vortex breakdown, este comportamiento se aprecia en la Figura 10C. En este proceso, la estructura coherente del vórtice se descompone en remolinos de menor escala, reduciendo su capacidad para inducir succión o controlar el flujo (Katz, 2006).

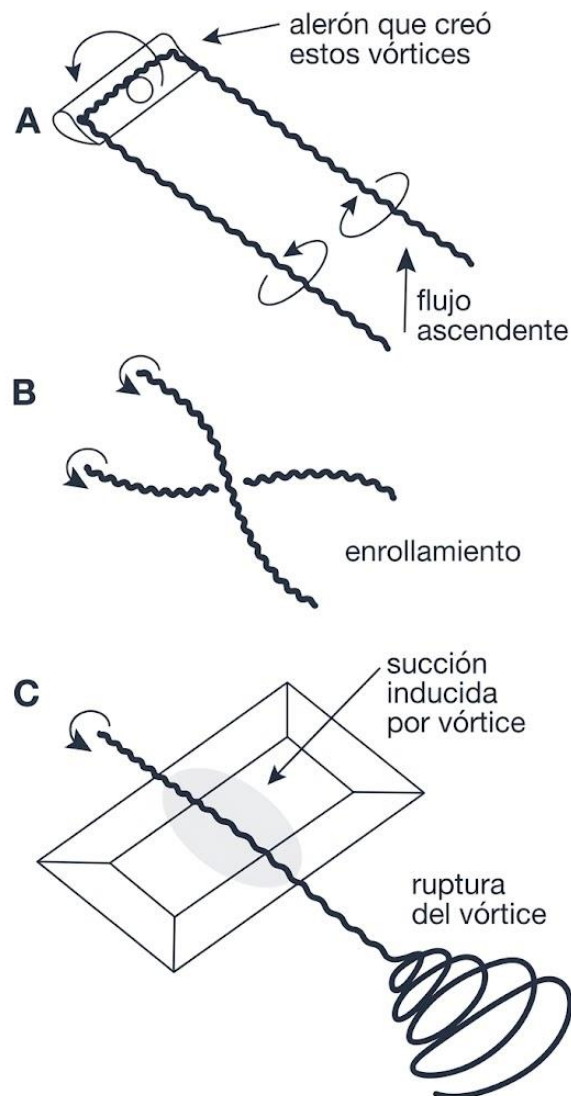


Figura 10. Vórtices

Fuente: Katz, (2006). *Race Car Aerodynamics Designing for Speed*

En conjunto, estos fenómenos muestran que el comportamiento de la estela y de los vórtices está directamente relacionado con la distribución de presiones sobre la carrocería. Para comprender de forma más clara los efectos aerodinámicos descritos, es necesario analizar cómo

la geometría del vehículo y las variaciones de velocidad del flujo influyen en dicha distribución de presiones.

Gillespie (2021) menciona que la distribución de presión sobre la carrocería de un automóvil está directamente relacionada con la geometría del vehículo y con los cambios de velocidad que experimenta el flujo de aire al desplazarse sobre sus superficies. En términos generales, las presiones pueden ser positivas o negativas respecto a la presión ambiente medida a cierta distancia del vehículo.

Cuando el flujo se desacelera, la presión tiende a aumentar; mientras que, cuando el aire se acelera para seguir la curvatura de la carrocería, la presión disminuye, este principio se refleja en la Tabla 2.

*Tabla 2. Coeficiente de presión*

*Fuente: Katz, (2006). Race Car Aerodynamics Designing for Speed*

Ubicación	Velocidad	Cp
Punto de estancamiento	0	1.0
Sobre el vehículo	Si ( $V < V_{\infty}$ )	0 a 1.0
Sobre el vehículo	Si ( $V > V_{\infty}$ )	Negativo

De acuerdo con Katz (2006), este comportamiento puede explicarse a partir de la forma de la superficie. Cuando el flujo se encuentra con una geometría cóncava, tiende a reducir su velocidad y se genera una zona de mayor presión. Por el contrario, al pasar sobre una superficie convexa, el flujo se acelera y se produce una disminución de presión. Este principio permite interpretar las variaciones del coeficiente de presión a lo largo de la línea central de un automóvil.

En la zona frontal del vehículo se forma un punto de estancamiento, donde la velocidad local del aire disminuye prácticamente hasta cero y la presión alcanza valores positivos elevados. Posteriormente, el flujo se acelera sobre el capó, generando una región de presión negativa. Sin embargo, en el borde frontal del capó puede aparecer un gradiente de presión adverso, capaz de favorecer la separación de la capa límite y aumentar la resistencia aerodinámica. Por esta razón, el diseño de la línea frontal del capó resulta importante para evitar desprendimientos prematuros del flujo y reducir penalizaciones por arrastre (Gillespie, 2021).

Cerca de la base del parabrisas y la zona del capó, el flujo debe desviarse hacia arriba, lo que produce una región de alta presión y baja velocidad, como se muestra en la Figura 11. Según Gillespie (2021), esta condición ha sido aprovechada en numerosos vehículos para ubicar tomas de aire destinadas a los sistemas de climatización o admisión del motor. Además, la menor velocidad local del flujo en esta zona contribuye a reducir la acción de las fuerzas aerodinámicas sobre los limpiaparabrisas, evitando que se separen de la superficie del parabrisas durante la marcha.

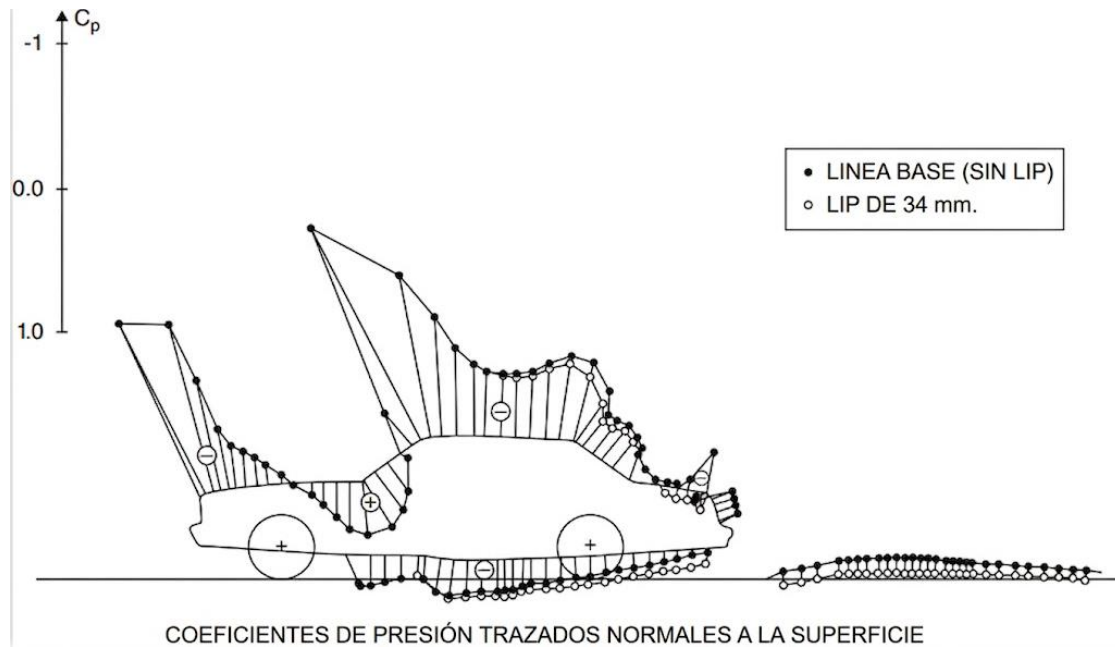


Figura 11. Distribución de presiones

Fuente: Gillespie, T. D. (2021). *Fundamentals of Vehicle Dynamics Revised Edition*.

Sobre el techo, el flujo vuelve a acelerarse para seguir el contorno superior de la carrocería, por lo que la presión disminuye nuevamente, esto se muestra en la Figura 11. Esta zona de baja presión puede extenderse hacia la geometría posterior, especialmente cuando existe una curvatura continua en la parte trasera del vehículo. En esta región, el flujo tiende a enfrentar una recuperación de presión, es decir, un aumento de presión en la dirección del flujo, lo cual puede generar un gradiente de presión desfavorable y favorecer la separación de la capa límite (Katz, 2006).

La diferencia entre gradientes de presión favorables y desfavorables es fundamental para comprender el comportamiento de la capa límite. Un gradiente favorable se presenta cuando la presión disminuye en la dirección del flujo, lo que normalmente está asociado con una aceleración del aire y favorece que el flujo permanezca adherido a la superficie. En cambio, un gradiente desfavorable ocurre cuando la presión aumenta en la dirección del flujo, reduciendo la energía del aire cercano a la pared y aumentando la posibilidad de engrosamiento de la capa límite, transición a flujo turbulento o separación del flujo (Katz, 2006).

En la parte posterior del vehículo, la separación del flujo es uno de los fenómenos más críticos, ya que impide que la presión se recupere hasta valores similares a los del punto de estancamiento frontal. Como consecuencia, se genera una región de baja presión detrás del vehículo, asociada con la formación de la estela aerodinámica. Esta diferencia de presión entre la zona frontal y posterior contribuye directamente a la resistencia por presión, una de las principales componentes del arrastre aerodinámico (Katz, 2006).

El tamaño de la zona de separación influye directamente en la resistencia aerodinámica, mientras que la desviación descendente del flujo detrás del vehículo afecta la sustentación trasera. En general, como se muestra en la Figura 12, al reducir el área de separación, puede aumentar la sustentación posterior debido a la disminución de presión generada por el flujo desviado hacia abajo (Gillespie, 2021).

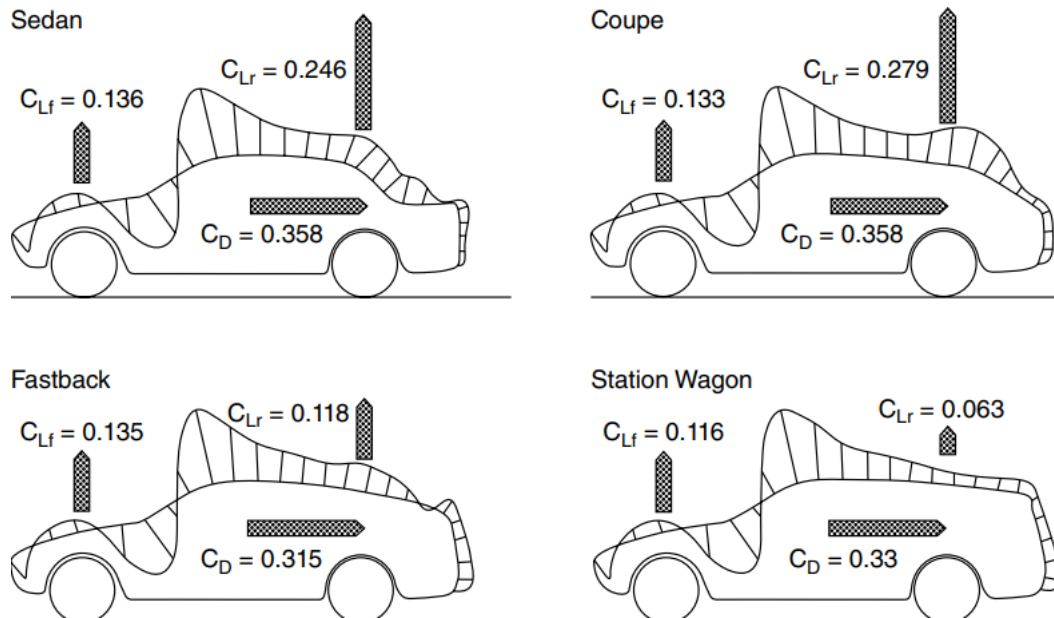


Figura 12. Fuerza de arrastre y sustentación en diferentes tipos de vehículos

Fuente: Gillespie, T. D. (2021). *Fundamentals of Vehicle Dynamics Revised Edition*.

En este contexto, resulta evidente que las fuerzas aerodinámicas no solo condicionan el comportamiento del flujo, sino que también tienen un impacto directo sobre el consumo energético de los vehículos. Según Wong (2022) para un automóvil de pasajeros típico que circula a velocidades superiores a aproximadamente 80 km/h, la potencia requerida para vencer la resistencia aerodinámica supera a la necesaria para contrarrestar tanto la resistencia a la rodadura de los neumáticos como las pérdidas en la transmisión. Este comportamiento puede apreciarse con mayor claridad en la Figura 13.

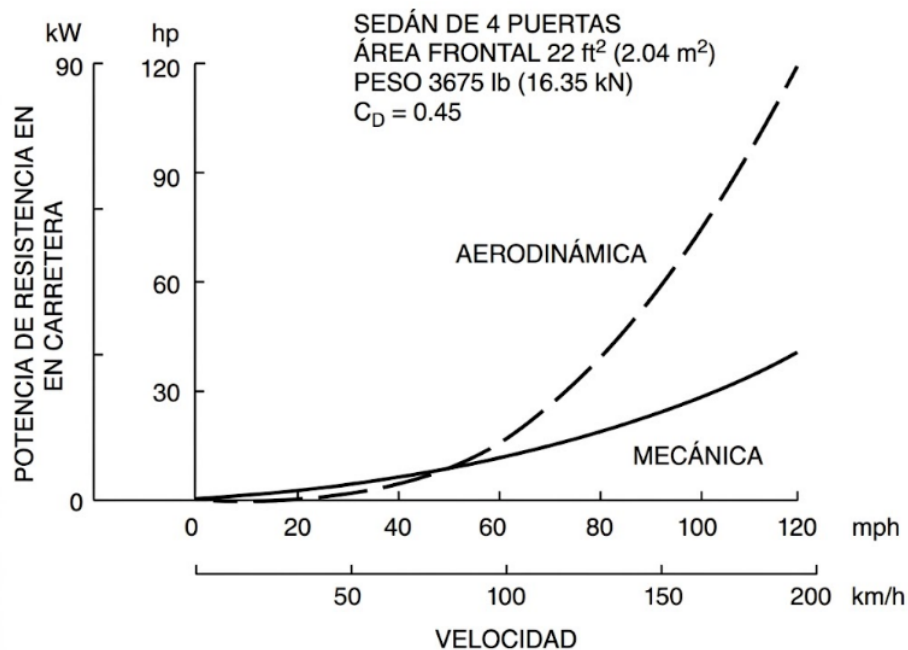


Figura 13. Potencia requerida para un vehículo de pasajeros

Fuente: Wong, (2022). *Theory of Ground Vehicles*.

Según Das & Riyad (2017) comprender la resistencia aerodinámica y la sustentación es crucial para el rendimiento y la seguridad del vehículo, ya que el 65 % de la potencia a altas velocidades se consume para superar la resistencia. En base en este concepto, en la Tabla 3 se presenta una aproximación de la potencia necesaria para vencer la resistencia aerodinámica en distintos tipos de vehículos de pasajeros, considerando una velocidad de 60 km/h (37 mph), representativa de la conducción urbana, y de 120 km/h (75 mph), característica de la conducción en carretera.

Se evidencia que la velocidad influye de manera directa y significativa en la potencia requerida para superar dicha resistencia. Esto se explica porque, en la ecuación de la resistencia aerodinámica, la velocidad constituye un parámetro determinante al estar elevada al cuadrado. En consecuencia, a medida que aumenta la velocidad de circulación del vehículo, la potencia necesaria para vencer la resistencia aerodinámica se incrementa de forma considerable (Katz, 2006).

*Tabla 3. Potencia requerida*

*Fuente: Wong, (2022). Theory of Ground Vehicles.*

Tipo de vehículo de pasajeros	Potencia requerida para vencer la resistencia aerodinámica			
	Velocidad a 60 km/h		(Velocidad a 120 km/h)	
	kW	hp	kW	hp
Subcompacto	1.69–2.31	2.27–3.10	13.49–18.47	18.09–24.77
Compacto	1.36–2.07	1.82–2.78	10.88–16.55	14.59–22.19
Mediano	1.43–2.36	1.92–3.16	11.48–18.90	15.39–25.35
Familiar (Station wagon)	1.68–2.36	2.25–3.16	13.48–18.90	18.08–25.35
Van	1.70–3.18	2.28–4.26	13.61–25.41	18.25–34.08
Convertible:				
Cerrado	1.54–2.37	2.07–3.18	12.32–18.97	16.52–25.44
Abierto	1.83–2.98	2.45–4.00	14.61–23.82	19.59–31.94
Utilitario deportivo (SUV)	2.05–4.91	2.75–6.58	16.38–39.30	21.97–52.70
Deportivo	1.26–2.50	1.69–3.35	10.11–19.96	13.56–26.77
De lujo	1.49–2.63	2.00–3.53	11.90–21.04	15.96–28.22

La velocidad constituye un factor determinante en la resistencia aerodinámica. Gillespie (2021) menciona que, a altas velocidades, incluso un pequeño incremento en la velocidad del vehículo se traduce en un aumento significativo de la potencia requerida, lo que conlleva una penalización directa en el consumo de combustible; sin embargo, no deben pasarse por alto otros parámetros igualmente relevantes, como el área frontal del vehículo y el coeficiente de resistencia aerodinámica. Este último depende fundamentalmente de la geometría del vehículo y se define como una función de diversos factores de diseño y condiciones de operación.

En particular, las formas de la parte frontal, trasera e inferior de la carrocería influyen de manera significativa en el comportamiento aerodinámico. Asimismo, elementos como las ruedas y sus alojamientos, los canalones del techo, los rebajes de las ventanas, los espejos exteriores y los guardabarros generan perturbaciones en el flujo de aire, afectando de forma apreciable el valor del coeficiente de resistencia aerodinámica. En base a ello, en la Figura 14 se presenta una aproximación del coeficiente de arrastre en distintos tipos de vehículos de pasajeros.










		Coeficiente de resistencia aerodinámica $C_D$	Área frontal	
			m <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup>
	Subcompacto	0.29 – 0.37	2.05 – 2.20	22.07 – 23.68
	Compacto	0.22 – 0.32	2.18 – 2.28	23.47 – 24.54
	Mediano	0.23 – 0.35	2.20 – 2.38	23.68 – 25.62
	Familiar	0.27 – 0.35	2.20 – 2.38	23.68 – 25.62
	Van	0.25 – 0.35	2.40 – 3.20	25.83 – 34.45
	Descapotable			
	-cerrado	0.28 – 0.38	1.94 – 2.20	20.88 – 23.68
	-abierto	0.35 – 0.50	1.84 – 2.10	19.81 – 22.61
	Todo Terreno Utilitario (SUV)	0.29 – 0.55	2.49 – 3.15	26.80 – 33.91
	Deportivo	0.27 – 0.40	1.65 – 2.20	17.76 – 23.68
	Lujo	0.23 – 0.35	2.28 – 2.65	24.54 – 28.53

Figura 14. Coeficientes de arrastre para distintos tipos de vehículos de pasajeros

Fuente: Wong, (2022). *Theory of Ground Vehicles*.

(Gillespie, 2021) menciona que más allá de la forma global del vehículo, el coeficiente de arrastre también depende de detalles geométricos y de la incorporación de apéndices aerodinámicos, como alerones frontales y posteriores. En la zona delantera, el diseño del extremo frontal, la altura de la línea del capó y el ángulo del parabrisas influyen directamente en la distribución de presiones y en la ubicación del punto de estancamiento, el cual determina cómo se divide el flujo por encima y por debajo de la carrocería.

El ángulo del parabrisas influye directamente en la resistencia aerodinámica, ya que orienta el flujo de aire hacia el techo del vehículo como se muestra en la Figura 16. En general, una mayor inclinación del parabrisas, es decir, un ángulo más suave, puede contribuir a reducir el arrastre; sin embargo, también puede generar mayores cargas térmicas por radiación solar y mayores exigencias de fabricación para evitar distorsiones ópticas (Gillespie, 2021).

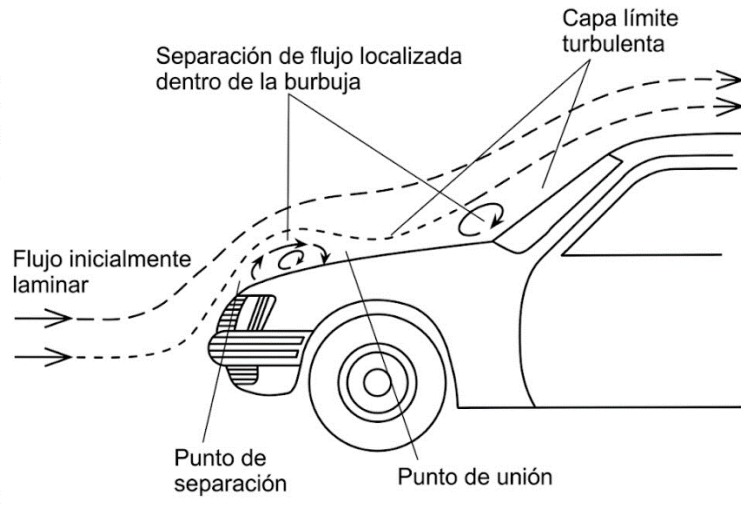


Figura 15. Separación de flujo en la parte frontal del vehículo

Fuente: Katz, (2006). *Race Car Aerodynamics Designing for Speed*

Como se observa en la Figura 15, la variación del ángulo del parabrisas modifica la distribución de presión y velocidad en la zona frontal. Un parabrisas más vertical genera una región de alta presión y menor velocidad del aire, mientras que uno más inclinado favorece una transición más suave del flujo hacia el techo. En este sentido, Fu (2023) ha reportado que un ligero cambio en el ángulo del parabrisas delantero puede reducir aproximadamente un 3 % el coeficiente de resistencia aerodinámica.

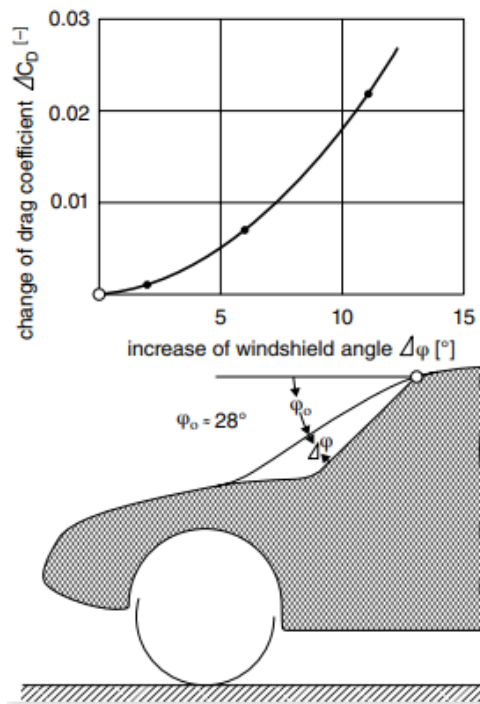


Figura 16. Coeficiente de arrastre en función del ángulo del parabrisas

Fuente: Gillespie, T. D. (2021). *Fundamentals of Vehicle Dynamics Revised Edition*.

Desde el punto de vista aerodinámico, es conveniente mantener el punto de estancamiento en una posición baja del perfil frontal, ya que esto favorece la reducción del arrastre. Para ello, se recomienda evitar formas abruptas o aristas marcadas, sustituyéndolas por superficies suavemente redondeadas que permitan una mejor conducción del flujo de aire. Este comportamiento se evidencia en la Figura 17, donde se muestra cómo la geometría frontal y el tratamiento de los bordes pueden influir en el coeficiente de arrastre total.

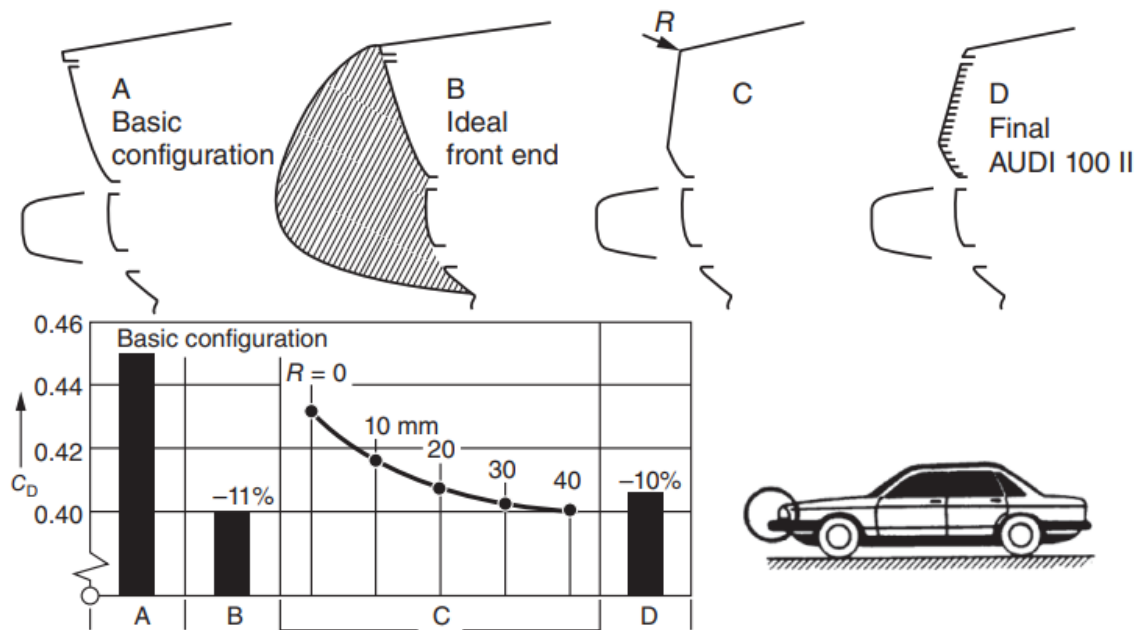


Figura 17. Influencia de la geometría frontal

Fuente: Wong, (2022). *Theory of Ground Vehicles*.

La figura presenta un análisis comparativo en el que se evidencia la influencia de la geometría del extremo frontal de un vehículo sobre su coeficiente de arrastre ( $C_d$ ). En ella se exponen cuatro configuraciones correspondientes a un mismo vehículo: la configuración A, que representa una forma básica; la configuración B, un perfil ideal; la configuración C, un perfil geométrico con curvatura variable en el borde delantero; y la configuración D, que corresponde a la versión final aplicada a un vehículo de producción, en este caso el Audi 100 II.

Las configuraciones difieren principalmente en la forma del borde de ataque del vehículo. En el primer caso, se observa una geometría abrupta con aristas pronunciadas. En la configuración B, se presenta una transición suave y continua, lo que da como resultado un perfil aerodinámico ideal. Por su parte, en la configuración C se analiza el efecto de una variación progresiva de la curvatura ( $R$ ), evidenciando cómo estas pequeñas modificaciones influyen en el comportamiento del flujo de aire. La configuración D muestra la solución real implementada por el fabricante, la cual, en comparación con la configuración base A, alcanza reducciones del coeficiente de arrastre de aproximadamente un 10 %.

Este comportamiento puede explicarse a partir de los principios de la mecánica de fluidos, en particular de la interacción entre la capa límite y la geometría del vehículo. En la configuración con bordes abruptos (A), el flujo de aire experimenta una separación temprana, generando zonas de recirculación que incrementan la presión de arrastre.

En contraste, al emplear superficies más suaves y con mayores radios de curvatura, como se observa en las configuraciones B y C, el flujo de aire se mantiene adherido al cuerpo del vehículo durante una mayor extensión. Esto reduce la separación del flujo y, en consecuencia, disminuye la estela turbulenta detrás del vehículo. Como resultado, se atenúa la diferencia de presión entre la parte frontal y la posterior, lo que conlleva una reducción del coeficiente de arrastre.

Un ejemplo de este fenómeno puede observarse con mayor claridad en la Figura 18, donde se presenta un análisis comparativo de las estructuras de flujo y del coeficiente de resistencia aerodinámica para diferentes configuraciones de la parte trasera del vehículo. En cada caso, se ilustran las líneas de flujo y las zonas de recirculación en la región posterior, evidenciando diferencias significativas en la estructura de la estela.

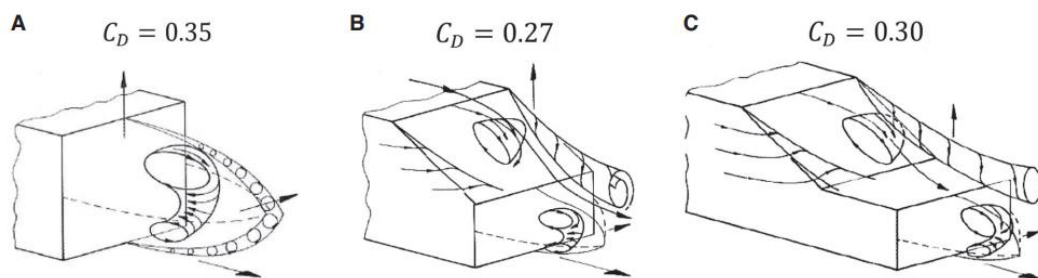


Figura 18. Análisis comparativo de las estructuras de flujo

Fuente: Zhang et al., (2026). A survey on generative methods in automotive aerodynamic shape optimization

Las variaciones en el coeficiente de arrastre se deben principalmente al comportamiento del flujo en la región posterior del vehículo. En el caso A, la separación del flujo ocurre de manera abrupta en el borde trasero, lo que genera una estela amplia y altamente turbulenta, incrementando la resistencia por presión.

En el modelo B, la inclinación progresiva de la superficie trasera permite que el flujo permanezca adherido durante una mayor longitud, reduciendo la intensidad de la separación y, en consecuencia, tanto el tamaño de la estela como el coeficiente de arrastre ( $C_d$ ).

Por otra parte, el modelo C presenta un comportamiento intermedio, en el cual parte del flujo sigue la superficie inclinada; sin embargo, aún se produce separación en la transición final.

Una aplicación más práctica de estos conceptos puede observarse en la Figura 19, donde se ilustra el modelo DrivAer. Según Zhang et al., (2026), este ha sido desarrollado como una representación geométrica más realista de vehículos de pasajeros modernos, tomando como referencia modelos comerciales como el BMW Serie 3 y el Audi A4.

A diferencia de los modelos simplificados utilizados anteriormente, el modelo DrivAer presenta una mayor fidelidad geométrica, lo que permite establecer una mejor transición entre la investigación teórica y su aplicación práctica en la industria automotriz.

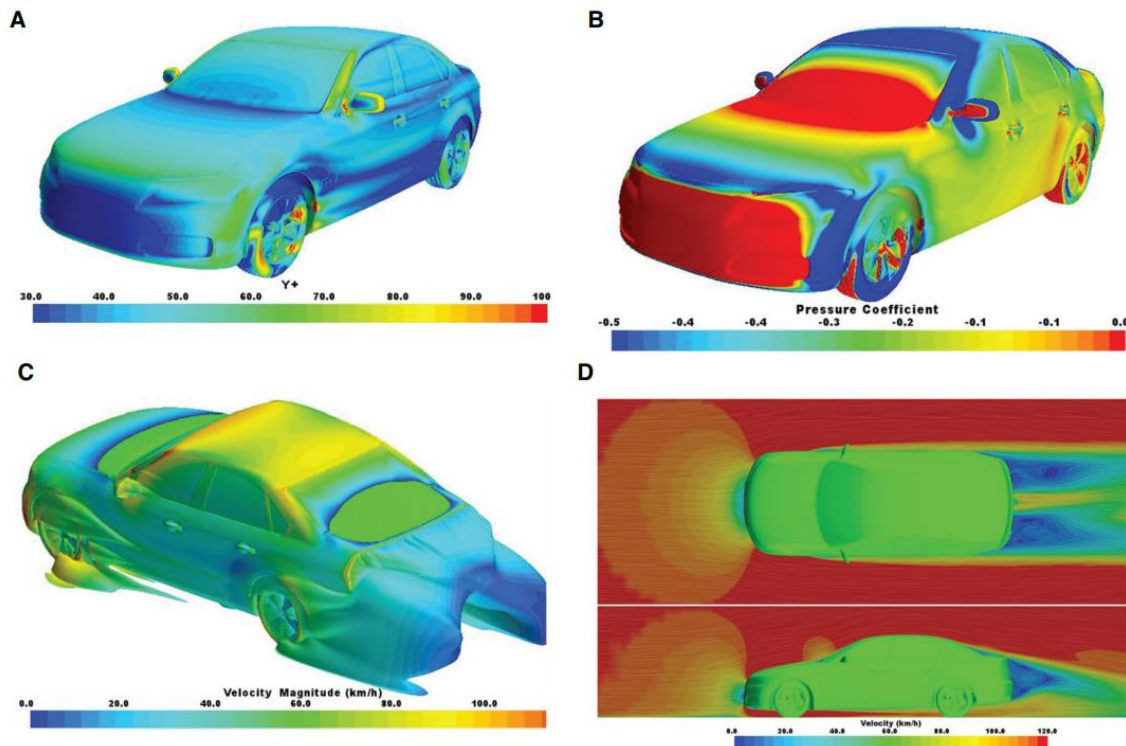


Figura 19. Análisis CFD del modelo DrivAer

Fuente: Zhang et al., (2026). *A survey on generative methods in automotive aerodynamic shape optimization*

La Figura 19 ilustra cómo en la parte frontal, el flujo se desacelera al impactar contra la carrocería, generando una zona de alta presión. Posteriormente, el flujo se acelera sobre el capó y el techo, reduciendo la presión en estas regiones.

En la parte trasera, debido a la geometría del vehículo, el flujo no logra mantenerse completamente adherido, produciéndose separación y formando una estela turbulenta, lo que incrementa la resistencia por presión.

Según Gillespie (2021) flujo de aire que circula por los laterales del vehículo tiende a dirigirse hacia la zona trasera de baja presión, donde se combina con el flujo proveniente del techo y genera vórtices en la estela. Por ello, la geometría del extremo posterior influye directamente en las fuerzas aerodinámicas, ya que condicionan el punto de separación del flujo. Aunque la separación es inevitable, reducir el área de flujo separado permite disminuir la resistencia aerodinámica.

Teóricamente, la forma más eficiente corresponde a una geometría tipo gota, con una parte trasera que se estrecha progresivamente mediante ángulos suaves, generalmente de 15° o menores (Gillespie, 2021).

La geometría del extremo posterior del vehículo resulta en un aspecto clave en la reducción del coeficiente de arrastre (Cd). Esta no solo afecta la resistencia aerodinámica, sino que también incide directamente en el coeficiente de sustentación (Cl), el cual resulta fundamental para mantener la estabilidad dinámica del vehículo, especialmente a altas velocidades.

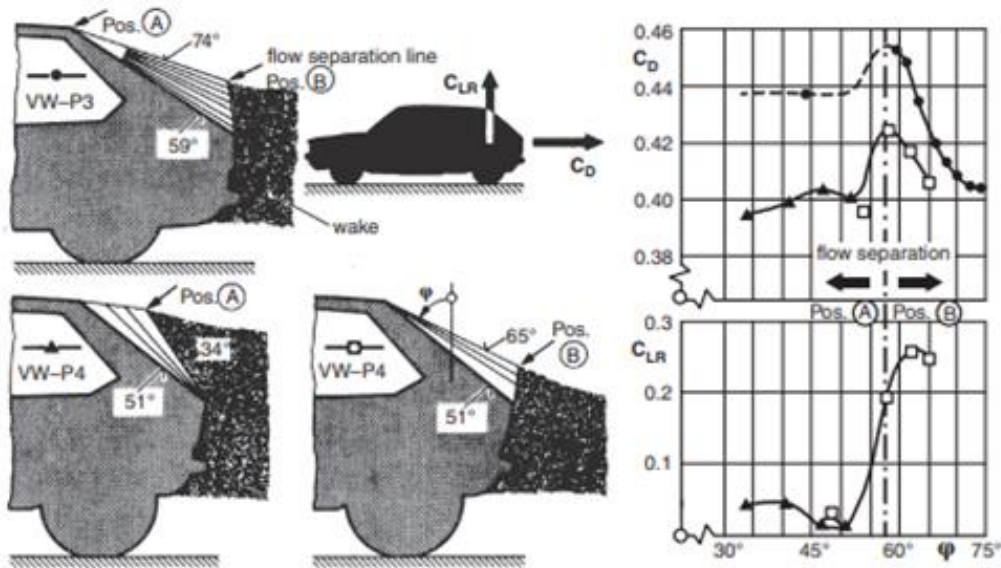


Figura 20. Influencia de la geometría posterior

Fuente: Wong, (2022). *Theory of Ground Vehicles*.

En la Figura 20 se presenta un análisis de las configuraciones del ángulo de inclinación de la parte trasera del vehículo y su efecto sobre la separación del flujo y la formación de la estela aerodinámica.

Se presentan distintas configuraciones geométricas del extremo posterior, caracterizadas por ángulos de inclinación comprendidos entre 30° y 75°. A partir de este análisis, se identifican dos posiciones clave asociadas a cambios significativos en el comportamiento del flujo. En la figura se pueden observar los patrones de flujo, incluyendo la línea de separación y la región de la estela, así como la variación tanto del coeficiente de arrastre ( $C_d$ ) como del coeficiente de sustentación ( $C_l$ ), ambos en función del ángulo de inclinación.

Asimismo, se evidencia que el coeficiente de arrastre ( $C_d$ ) no presenta una variación monótona, ya que experimenta un incremento significativo en un rango intermedio de ángulos, seguido de una posterior disminución.

El comportamiento aerodinámico del extremo posterior está estrechamente relacionado con la separación del flujo. Para ángulos de inclinación pequeños, el flujo tiende a permanecer adherido a la superficie, lo que genera una estela relativamente reducida. A medida que dicho ángulo aumenta, se alcanza una condición crítica en la que el flujo comienza a separarse de forma inestable, dando lugar a una estela más amplia y turbulenta, lo que, en consecuencia, incrementa el coeficiente de arrastre ( $C_d$ ).

Para ángulos de inclinación mayores, la separación del flujo ocurre de manera más temprana y definida; sin embargo, se forma una estela más estable, lo que puede reducir el arrastre en comparación con el caso crítico.

Estas modificaciones, orientadas a la reducción del coeficiente de arrastre ( $C_d$ ), también afectan al coeficiente de sustentación ( $C_l$ ), ya que alteran la distribución de presiones ejercidas sobre la carrocería. En consecuencia, cualquier variación en el coeficiente de sustentación influye directamente en la estabilidad del vehículo (Gillespie, 2021).

Dentro del proceso de optimización aerodinámica, esta zona presenta una influencia directa en la formación de la estela y, por ende, en la resistencia por presión. Una configuración inadecuada puede incrementar de manera significativa el arrastre y, en consecuencia, el consumo energético del vehículo.

Es por ello que la optimización de esta geometría resulta fundamental, ya que permite reducir el coeficiente de arrastre ( $C_d$ ) y controlar el coeficiente de sustentación ( $C_l$ ), mejorando tanto la eficiencia como la estabilidad del vehículo. En el contexto del desarrollo de prototipos de alta eficiencia, es crucial realizar una adecuada selección del ángulo y de la forma del extremo posterior, con el fin de maximizar el rendimiento aerodinámico.

Gillespie (2021) menciona que otra consideración relevante en el diseño aerodinámico de la parte trasera es la posible acumulación de suciedad en la luneta y en las luces posteriores. La elevada turbulencia en la zona de separación incorpora humedad y partículas de suciedad levantadas por los neumáticos desde la superficie de la carretera. Si esta región de separación abarca dichas áreas, es probable que la suciedad se deposite sobre ellas, afectando negativamente la visibilidad.

Este fenómeno se puede observar en la Figura 21, donde se presenta una comparación del patrón de deposición de suciedad en la zona posterior para dos configuraciones de carrocería.

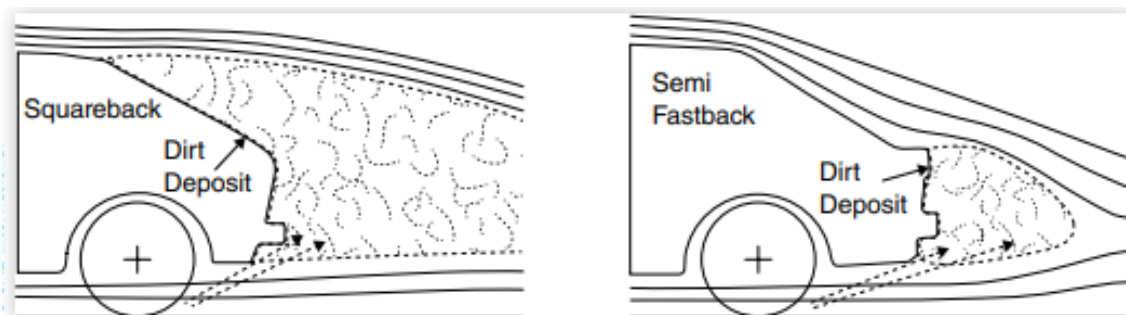


Figura 21. Efecto del punto de separación en la deposición de suciedad de la zona posterior

Fuente: Gillespie, T. D. (2021). *Fundamentals of Vehicle Dynamics Revised Edition*.

En el caso del squareback, la separación del flujo ocurre de manera abrupta, generando una estela amplia, caracterizada por baja presión y flujo recirculante. Esta condición favorece la acumulación de partículas de polvo y suciedad, las cuales tienden a depositarse sobre la superficie trasera.

En contraste, la configuración semi-fastback permite que parte del flujo siga la superficie inclinada antes de separarse, lo que reduce la intensidad de la recirculación y, en consecuencia, disminuye la cantidad de partículas que se depositan en la región posterior del vehículo. (Gillespie, 2021)

Además del diseño de la geometría de la parte posterior, otro elemento crucial que afecta al comportamiento del flujo y a la formación de la estela son los alerones posteriores. En este sentido, (Zhou et al., 2025) señalan que ampliar la zona de apertura del alerón puede reducir la velocidad y la intensidad del flujo de aire en los vórtices de arrastre, disminuyendo así los vórtices de separación en la región posterior del modelo.

Por lo tanto, estos dispositivos resultan altamente relevantes en el diseño de la geometría posterior de cualquier vehículo. En la Figura 22 se puede observar cómo distintas dimensiones de alerones posteriores influyen tanto en el coeficiente de arrastre ( $C_d$ ) como en el coeficiente de sustentación ( $C_l$ ) del vehículo.

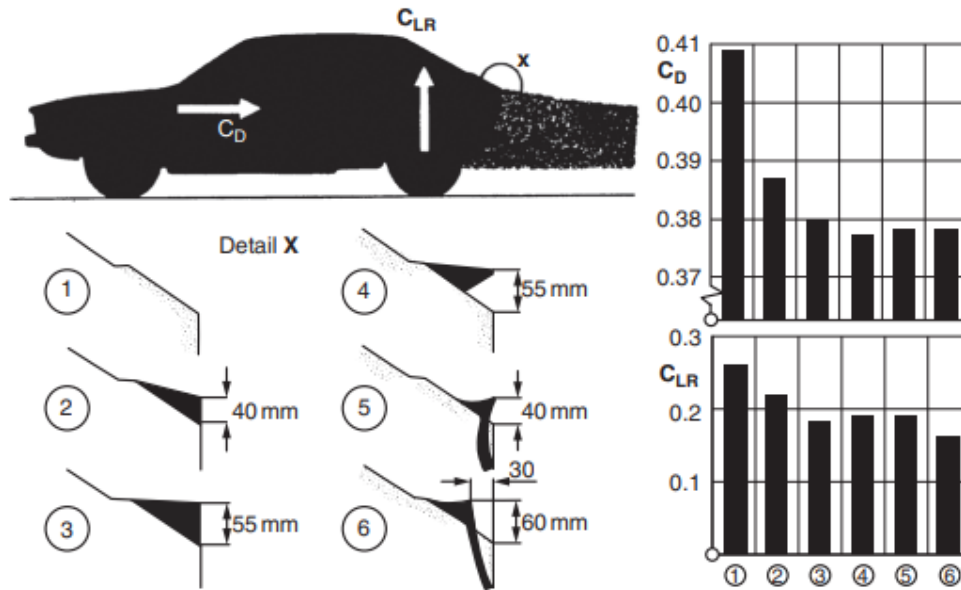


Figura 22. Influencia del alerón posterior en el coeficiente de arrastre y sustentación

Fuente: Wong, (2022). Theory of Ground Vehicles.

La Figura 22 muestra un vehículo con la ubicación del alerón en la zona posterior, en la cual se proponen seis configuraciones geométricas diferentes. Estas variaciones consisten en modificaciones en la longitud, la inclinación y la posición del alerón, con dimensiones características comprendidas entre 30 mm y 60 mm.

La incorporación de un alerón modifica las condiciones de desprendimiento del flujo en la región posterior del vehículo. Específicamente, este dispositivo actúa como un elemento de control de la capa límite, alterando la distribución de presiones en la parte trasera y reduciendo la intensidad de la recirculación en la estela.

En este contexto, (Das & Riyad, 2017) señalan que los alerones traseros redirigen eficazmente el flujo de aire y contribuyen a incrementar la sustentación negativa. Asimismo, destacan que mantener un coeficiente de sustentación bajo resulta crucial para garantizar la estabilidad de los vehículos que operan a altas velocidades.

De la misma manera que los alerones traseros, los elementos ubicados en la parte inferior frontal del vehículo también influyen en el coeficiente de arrastre ( $C_d$ ) y en el coeficiente de sustentación ( $C_l$ ), al igual que los demás apéndices aerodinámicos mencionados previamente. Un ejemplo de ello se observa en la Figura 23.

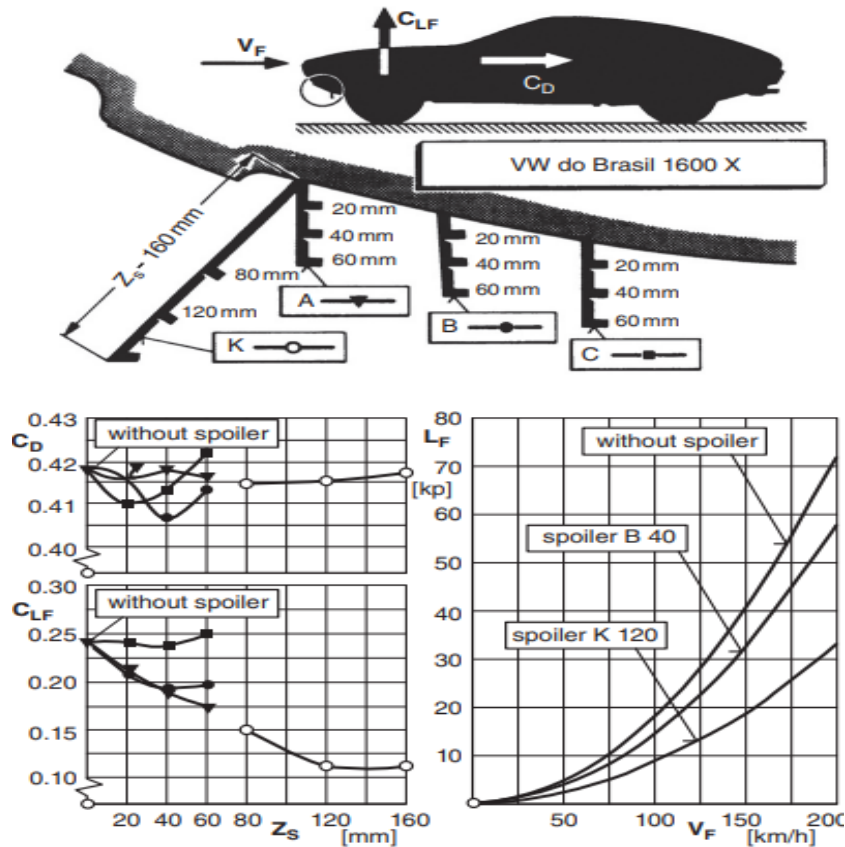


Figura 23. Influencia del apéndice frontal en el coeficiente de arrastre y sustentación

Fuente: Wong, (2022). *Theory of Ground Vehicles*.

La figura presenta un vehículo de referencia con distintas configuraciones de alerones delanteros, caracterizadas por variaciones en su geometría y en la altura respecto al suelo, comprendidas entre 20 mm, 40 mm y 60 mm, así como por una extensión en sentido longitudinal. En este análisis se identifican cuatro configuraciones, denominadas A, B, C y K.

Este comportamiento se explica por la modificación del flujo de aire en la región inferior del vehículo. En ausencia de un alerón delantero, una cantidad significativa de aire ingresa por debajo de la carrocería, lo que genera zonas de baja presión; en consecuencia, se incrementa el coeficiente de sustentación ( $C_L$ ) y, adicionalmente, el coeficiente de arrastre ( $C_D$ ).

La incorporación de un alerón delantero constituye una estrategia de control del flujo en la región frontal del vehículo, cuyo efecto principal es la modificación de las condiciones de entrada del aire hacia la parte inferior del vehículo. Este dispositivo actúa como un elemento de desviación y, en ciertos diseños, de bloqueo parcial del flujo incidente, reduciendo el caudal que penetra bajo la carrocería. Como consecuencia, disminuye la aceleración del flujo en dicha región y se incrementa la presión estática media en el piso del vehículo, lo que se traduce en una reducción de la sustentación en el eje delantero y, por ende, en una mejora de la estabilidad direccional y el agarre neumático (Hucho, 1987).

Desde la perspectiva de la aerodinámica vehicular, el campo de presiones en la región inferior del vehículo es determinante en la generación de fuerzas verticales. En ausencia de dispositivos de control, la geometría del vehículo favorece la formación de regiones de baja presión asociadas a la aceleración del flujo bajo el chasis, lo que induce efectos de sustentación

indeseables. La implementación de un alerón delantero altera esta distribución de presiones, mitigando dichos efectos mediante la reducción del flujo entrante y la reorganización de las líneas de corriente (Katz, 2016).

Adicionalmente, el control del flujo inferior influye en la estructura de la estela generada en la región posterior del vehículo. Una menor interacción entre el flujo acelerado de la parte inferior del vehículo y el flujo externo contribuye a reducir la intensidad de los vórtices y las pérdidas energéticas asociadas a la turbulencia. En este contexto, puede observarse una disminución indirecta del coeficiente de arrastre aerodinámico ( $C_d$ ), siempre que la configuración del alerón esté optimizada para minimizar la penalización por incremento de superficie frontal o generación de vorticidad adicional (Gillespie, 2021)

No obstante, es importante destacar que la relación entre la reducción de la sustentación y la variación del coeficiente de arrastre no es necesariamente favorable en todos los casos. En muchos diseños, la mejora en estabilidad y carga aerodinámica se obtiene a costa de un ligero incremento en el  $C_d$ , evidenciando el compromiso inherente entre eficiencia aerodinámica y desempeño dinámico del vehículo.

Según Choi et al. (2026) un análisis de sensibilidad indicó que la carga aerodinámica general del vehículo depende principalmente de la longitud del separador ( $L$ ), mientras que la resistencia aerodinámica es más sensible a la altura del divisor ( $H$ ) como se muestra en la Figura 24.

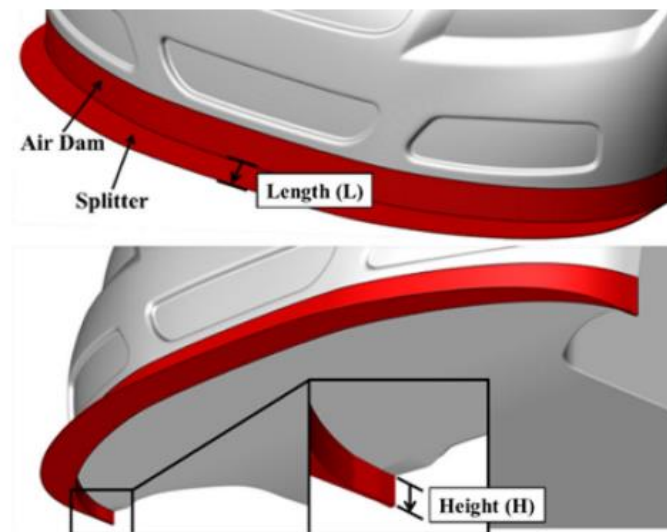


Figura 24. Dimensiones del alerón frontal

Fuente: Choi et al., (2026). *Parametric Study of Front Splitter on Fastback-Type Vehicle for Aerodynamic Performance*

Esto indica que pequeñas variaciones geométricas en los dispositivos inferiores pueden influir de forma diferenciada sobre la sustentación y el arrastre, por lo que su diseño debe considerar tanto la estabilidad del vehículo como la eficiencia aerodinámica global.

Esta influencia también se relaciona con el comportamiento del flujo bajo la carrocería. Según Gillespie (2021) La parte inferior del vehículo constituye una zona crítica en la generación del arrastre aerodinámico de la carrocería. Elementos como la suspensión, el sistema de escape y otros componentes salientes son responsables de una parte significativa de esta resistencia. El flujo de aire en esta región se comporta como una capa de cizalladura, caracterizada por una

velocidad nula en la superficie de la carretera y por el flujo inducido debido al arrastre generado por los componentes del underbody.

La solución más reconocida para minimizar estos efectos consiste en optimizar la geometría inferior del vehículo, reduciendo las irregularidades y favoreciendo superficies más continuas que permitan un flujo más uniforme, como se muestra en la Figura 25.

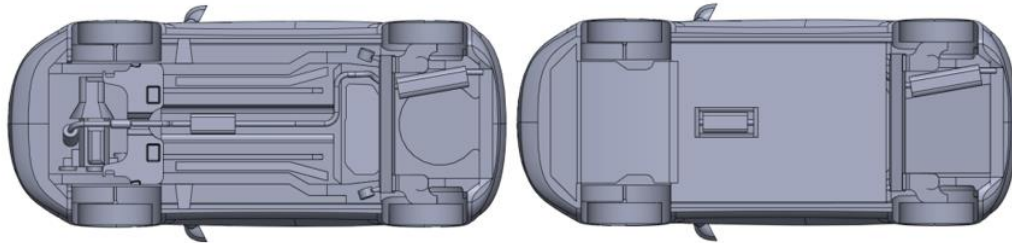


Figura 25. Carenado

Fuente: Flavio et al., (2019). UNDERBODY AERODYNAMICS: DRAG COEFFICIENT REDUCTION IN ROAD VEHICLES

Esta problemática evidencia la importancia de intervenir el underbody como una zona estratégica para la reducción del arrastre aerodinámico. En este sentido, el uso de carenados, paneles inferiores más lisos permite disminuir la exposición de componentes salientes al flujo de aire, reduciendo la turbulencia y favoreciendo una circulación más ordenada bajo la carrocería. A partir de este criterio, diversos estudios han analizado la incorporación de modificaciones localizadas en vehículos existentes, con el fin de mejorar su desempeño aerodinámico sin alterar de manera significativa su arquitectura general.

De esta manera, la investigación se centra específicamente en un vehículo de carretera popular, el modelo Fiat Grande Punto 2012, como se observa en la Figura 26, con el objetivo de avanzar en su diseño sin necesidad de rediseños exhaustivos (Flavio et al., 2019).

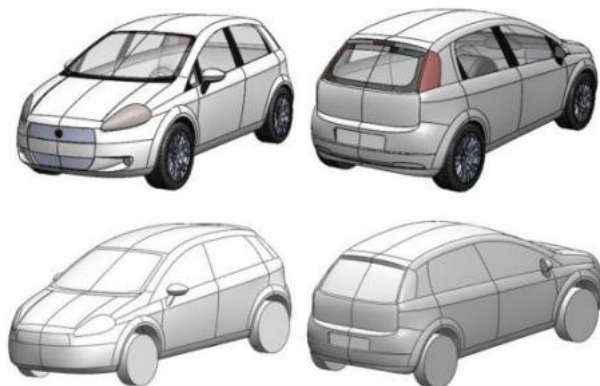


Figura 26. Modelo simplificado

Flavio et al., (2019). UNDERBODY AERODYNAMICS: DRAG COEFFICIENT REDUCTION IN ROAD VEHICLES

El coeficiente aerodinámico ( $C_d$ ) de la parte inferior del vehículo se redujo de 0,1536 a 0,1100, lo que representa una reducción de alrededor del 28,4%. El coeficiente aerodinámico total de todo el vehículo se redujo de 0,3399 a 0,2964, lo que supone una disminución de aproximadamente un 13% (Flavio et al., 2019).

Tabla 4. Resultados del coeficiente de arrastre

Flavio et al., (2019). UNDERBODY AERODYNAMICS: DRAG COEFFICIENT REDUCTION IN ROAD VEHICLES

Condición analizada	Valor de Cd	$\Delta C_d$	$\% \Delta C_d$
Vehículo completo - Base	0.3399	0.0436	-12.82%
Vehículo completo - Propuesta	0.2964		
Bajo carrocería - Base	0.1536	0.0436	-28.39%
Bajo carrocería - Propuesta	0.1100		

Los resultados expuestos en la tabla demostraron que, con frecuencia, la parte inferior de la carrocería de los vehículos de carretera no recibe suficiente atención durante el diseño aerodinámico. Esta condición implica la pérdida de oportunidades importantes para mejorar la eficiencia energética del vehículo, ya que el flujo que circula bajo la carrocería puede contribuir de manera considerable al arrastre total. Además, una gestión adecuada del flujo inferior no solo favorece la reducción de la resistencia aerodinámica, sino que también puede contribuir a disminuir el ruido generado por el paso del aire alrededor de la estructura del vehículo (Gillespie, 2021).

Esta problemática no se limita únicamente al *underbody*, sino que también se relaciona con otros elementos expuestos al flujo externo. Según Gillespie (2021) las protuberancias de la carrocería, especialmente las ruedas y los pasos de rueda, representan una fuente importante de resistencia aerodinámica. Esta resistencia se debe al flujo turbulento y recirculante generado en las cavidades, así como a la rotación de las ruedas, que altera el flujo circundante más allá de su área frontal expuesta, este comportamiento se aprecia en la Figura 27.

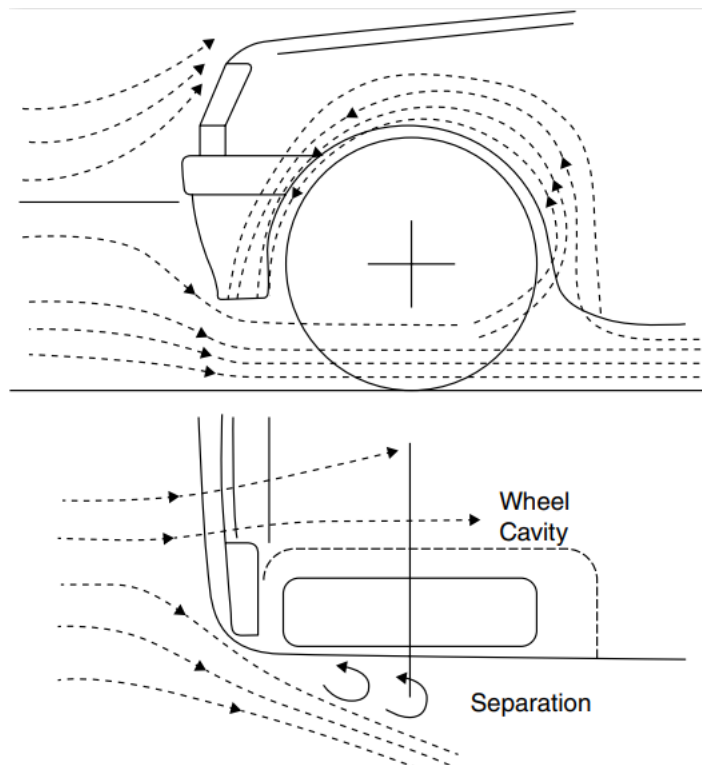


Figura 27. Recirculación del flujo de aire en la cavidad de la rueda

Fuente: Gillespie, T. D. (2021). *Fundamentals of Vehicle Dynamics Revised Edition*.

Por ello, el carenado de ruedas y pasos de rueda constituye una estrategia efectiva para reducir el arrastre. Su aplicación es más sencilla en las ruedas traseras, mientras que en las delanteras resulta más compleja por el giro de dirección. Además, la reducción de la altura libre al suelo y la disminución del volumen de las cavidades de los pasos de rueda contribuyen significativamente a mejorar el desempeño aerodinámico (Gillespie, 2021).

La instalación de carenado en las cuatro ruedas permite reducir el coeficiente de arrastre (Cd) en aproximadamente 0,013, mientras que la optimización del sistema de ventilación aporta una disminución adicional de 0,004. En conjunto, ambas mejoras contribuyen a una reducción total del Cd del vehículo del orden de 0,017. Este efecto también se evidencia en la Figura 28, donde se observa una disminución en la diferencia de presiones (Vdovin et al., 2014).

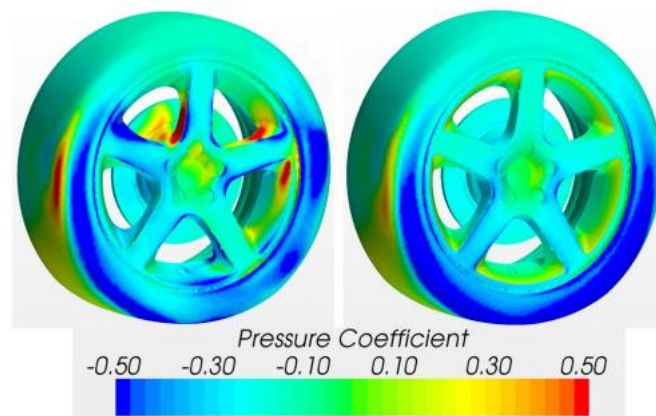


Figura 28. Coeficiente de presión en rueda

Fuente: Vdovin et al., (2014). *Investigation of Wheel Aerodynamic Resistance of Passenger Cars*

Estos resultados permiten relacionar la influencia de las ruedas y sus cavidades con otro sistema que también afecta de forma importante el arrastre aerodinámico, el sistema de refrigeración. Aunque ambos elementos cumplen funciones distintas dentro del vehículo, comparten una característica común, modifican el flujo externo al introducir perturbaciones, cambios de presión y pérdidas de cantidad de movimiento.

En el caso de las ruedas, estas alteraciones se producen por la rotación y por la interacción del aire con los pasos de rueda; mientras que, en el sistema de refrigeración, el flujo ingresa a través de las aberturas frontales y atraviesa una región interna altamente compleja.

En ese sentido (Gillespie, 2021) menciona que el sistema de refrigeración es uno de los contribuyentes relevantes al arrastre aerodinámico del vehículo. El aire que ingresa por el radiador puede perder cantidad de movimiento al impactar contra el motor, el cortafuegos y otros componentes internos, generando un flujo caótico y resistencia adicional antes de salir por las aberturas inferiores como se muestra en la Figura 29

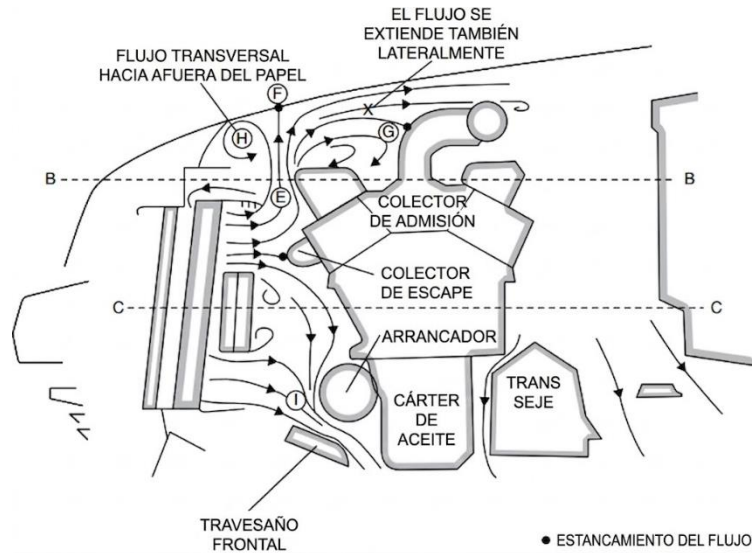


Figura 29. Flujo de aire en el compartimento del motor

Fuente: Gillespie, T. D. (2021). *Fundamentals of Vehicle Dynamics Revised Edition*.

La influencia del sistema de refrigeración sobre el coeficiente de arrastre puede alcanzar aproximadamente 0,025 en  $C_d$ , valor que suele obtenerse al comparar el arrastre con las entradas de aire abiertas y selladas, como se muestra en la Figura 30. Una gestión adecuada del flujo, mediante conductos que lo dirijan de forma más ordenada y reduzcan pérdidas internas, permite disminuir esta contribución aerodinámica (Gillespie, 2021).

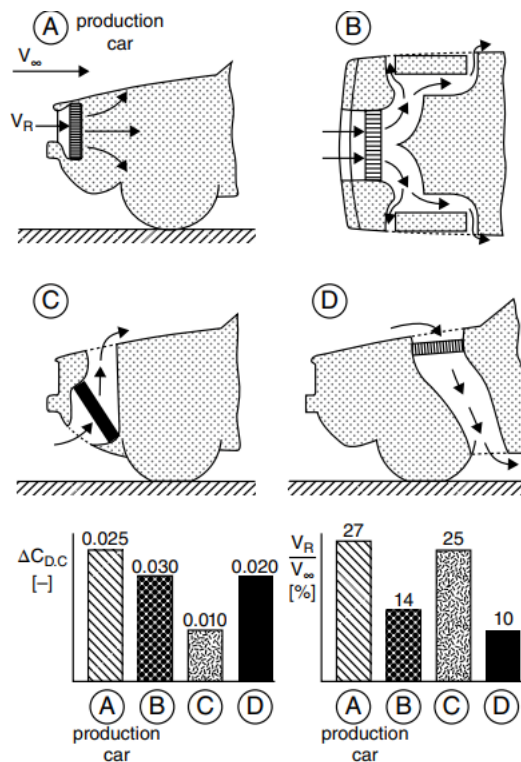


Figura 30. Influencia del sistema de refrigeración en el coeficiente de arrastre

Fuente: Gillespie, T. D. (2021). *Fundamentals of Vehicle Dynamics Revised Edition*.

La figura presenta diferentes estrategias de diseño en la zona de la rueda delantera de un vehículo y su influencia en el coeficiente de resistencia aerodinámica ( $C_d$ ). En la cavidad de

la rueda es una fuente importante de resistencia aerodinámica debido a la generación de vórtices, recirculaciones y fluctuaciones de presión, esto se observa en la Figura 31.

En consecuencia, los vehículos modernos buscan reducir el tamaño de las entradas de aire al mínimo funcional necesario, equilibrando las necesidades de enfriamiento con la mejora del desempeño aerodinámico.

En la configuración base (A) de la Figura 30, el flujo de aire proveniente del sistema de refrigeración ingresa sin control a la cavidad de la rueda delantera, lo que incrementa la turbulencia y aumenta el arrastre aerodinámico. La configuración (B), aunque el flujo es canalizado, aún se presentan pérdidas por fricción y recirculaciones internas.

En la configuración (C), la incorporación de un deflector reduce la cantidad de aire que ingresa a la cavidad, disminuyendo la intensidad de los vórtices y mejorando el comportamiento aerodinámico; finalmente, en la configuración (D), la optimización de la geometría permite que el flujo se mantenga adherido externamente, minimizando su interacción con la cavidad de la rueda y logrando una reducción significativa del coeficiente de resistencia aerodinámica.

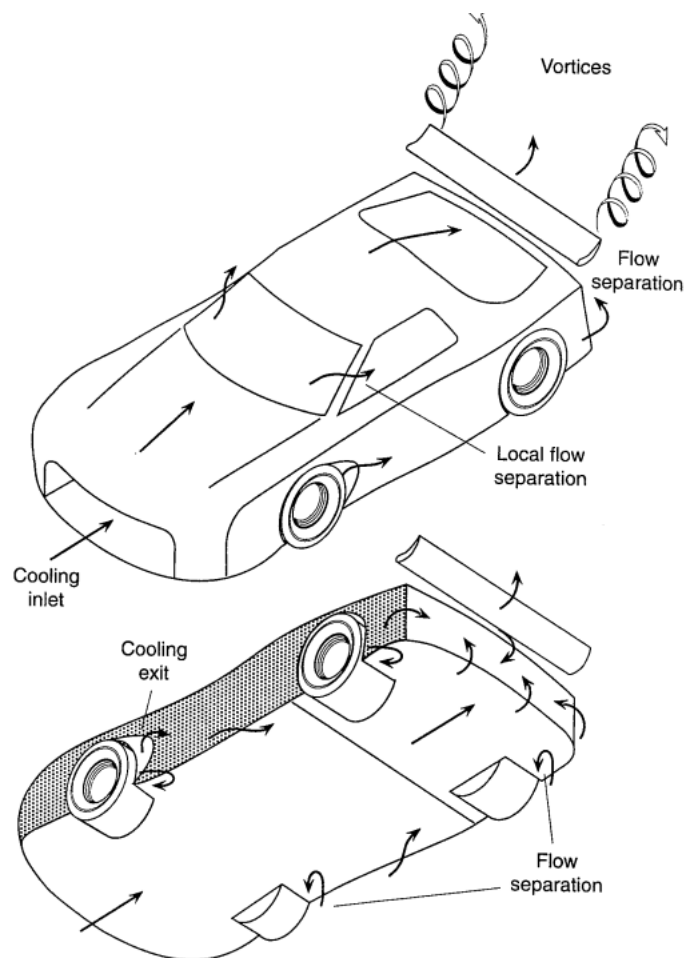


Figura 31. Flujo de aire a través del sistema de refrigeración

Fuente: Katz, (2006). *Race Car Aerodynamics Designing for Speed*

Más allá de las características geométricas del vehículo, existen diversas condiciones de operación que también inciden en el coeficiente de arrastre. Entre las más relevantes se encuentran el ángulo de ataque del vehículo, la distancia al suelo, la carga transportada y las

condiciones de uso. Estas variables modifican el comportamiento del flujo de aire alrededor de la carrocería, influyendo directamente en la generación de fuerzas aerodinámicas.

La influencia del ángulo de ataque ( $\alpha$ ) representada en la Figura 32 sobre el coeficiente de resistencia aerodinámica ( $C_d$ ) y el coeficiente de sustentación ( $C_L$ ) en vehículos. Se compara con tres configuraciones representativas. Un vehículo tipo familiar (VW Variant 411), un sedán (Audi 100) y un vehículo de competición (Competitor F2-2).

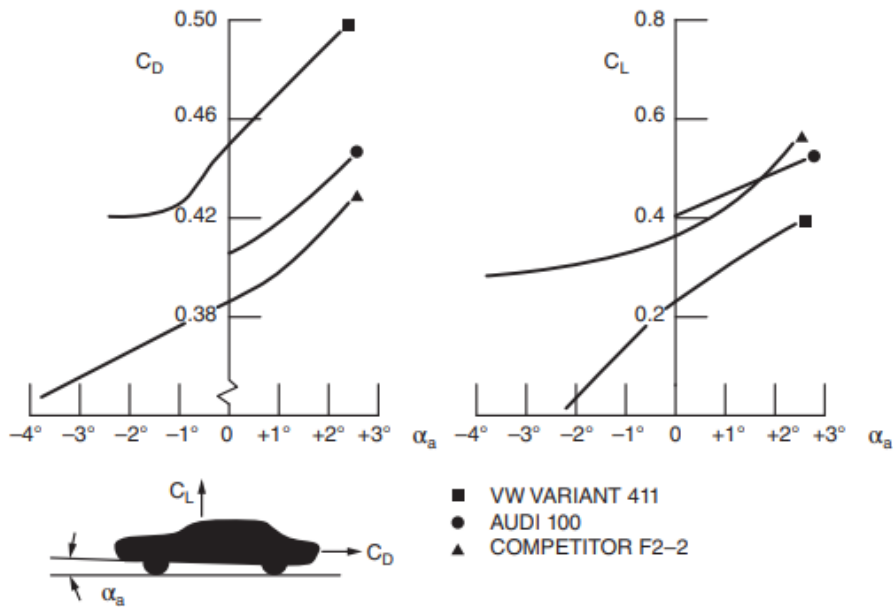


Figura 32. Influencia del ángulo de ataque en el coeficiente de arrastre y sustentación

Fuente: Wong, (2022). Theory of Ground Vehicles.

El esquema está compuesto por dos gráficos principales. El primero muestra la variación del coeficiente de arrastre ( $C_d$ ) en función del ángulo de ataque, mientras que el segundo representa la variación del coeficiente de sustentación ( $C_L$ ) respecto al mismo parámetro. En ambos casos, se observa una tendencia creciente a medida que el ángulo de ataque aumenta desde valores negativos hasta positivos.

El incremento de los coeficientes aerodinámicos con el ángulo de ataque se debe a la modificación de la distribución de presiones alrededor del vehículo. A medida que el ángulo de ataque aumenta, la parte frontal se expone de forma más directa al flujo, lo que genera un incremento de la presión en la zona delantera y una disminución relativa en las regiones superior y posterior.

En condiciones reales de operación, el flujo no siempre se presenta perfectamente alineado con el vehículo. Variaciones en el ángulo de ataque ( $\alpha$ ) pueden producir incrementos significativos tanto en el arrastre como en la sustentación, afectando directamente la eficiencia energética y la estabilidad del vehículo.

Esta influencia se relaciona estrechamente con la posición del vehículo respecto al suelo, ya que la altura libre modifica el comportamiento del flujo en la zona inferior de la carrocería. Cuando la distancia al suelo cambia, también varía la cantidad de aire que circula por el *underbody*, la presión generada en esta región y el grado de interacción entre el flujo inferior y la superficie de la carretera. Por ello, la altura del vehículo no solo condiciona el arrastre aerodinámico, sino también la sustentación o generada sobre la carrocería.

La distancia entre el vehículo y el suelo también ejerce una influencia significativa sobre el coeficiente de arrastre ( $C_d$ ) y el coeficiente de sustentación ( $C_l$ ). En la Figura 33 se presenta una comparación entre distintos tipos de vehículos, incluyendo una furgoneta (VW Delivery Van), un vehículo deportivo (VW Porsche 914) y prototipos de competición (Competitor F2-1 y Competitor F2-2), con el objetivo de evaluar cómo la altura respecto al suelo afecta su comportamiento aerodinámico.

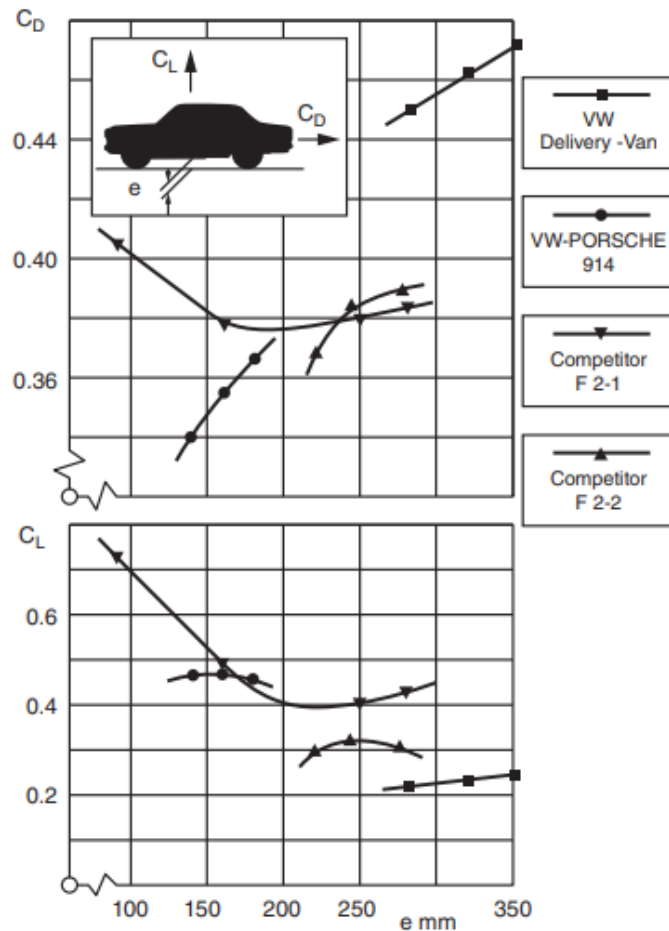


Figura 33. Influencia de la altura del vehículo respecto al suelo en el coeficiente de arrastre y sustentación

Fuente: Wong, (2022). Theory of Ground Vehicles.

Los resultados muestran que, en general, el coeficiente de arrastre ( $C_d$ ) presenta un comportamiento no lineal con la altura respecto al suelo, debido a la influencia de otros factores geométricos, como la presencia de alerones delanteros o configuraciones con carrocerías carenadas. Por su parte, el coeficiente de sustentación ( $C_l$ ) tiende a disminuir a medida que se reduce la distancia al suelo, aunque con variaciones que dependen de la geometría específica de cada vehículo.

El comportamiento aerodinámico en esta región está determinado principalmente por el flujo que circula por la parte inferior del vehículo. Una mayor altura permite un flujo más libre; sin embargo, puede incrementar las zonas de recirculación y, en consecuencia, el arrastre. En este sentido, (Džijan et al., 2019) señalan que un aumento de la distancia al suelo conduce a un incremento en el coeficiente de fuerza aerodinámica. En particular, reportan que el coeficiente

de arrastre puede aumentar hasta un 8 % para holguras delanteras y traseras de 140 mm en comparación con un modelo de referencia, mientras que se reduce hasta un 24 % cuando la holgura disminuye a 60 mm.

Por el contrario, al reducir la distancia al suelo, el flujo inferior se acelera debido al efecto de confinamiento, lo que disminuye la presión bajo la carrocería y reduce la sustentación. Este fenómeno contribuye a mejorar la adherencia del vehículo.

Esta relación entre distancia al suelo, arrastre y sustentación también permite vincular el análisis aerodinámico con las condiciones de carga del vehículo. En operación real, la altura respecto al suelo no permanece constante, sino que puede variar en función del peso transportado y de su distribución sobre los ejes delantero y trasero. Por ello, los cambios de carga no solo modifican la actitud del vehículo, sino también el flujo que circula por la zona inferior, alterando los valores de  $C_d$  y  $C_l$ .

La Figura 34 presenta un análisis de la influencia de la carga del vehículo sobre el coeficiente de resistencia aerodinámica ( $C_d$ ) y el coeficiente de sustentación ( $C_l$ ), considerando distintas condiciones de operación. En particular, se evalúan configuraciones como el vehículo con carga completa, únicamente con el conductor y con distribuciones límite de carga en los ejes delantero y trasero, aplicadas a distintos modelos de automóviles.

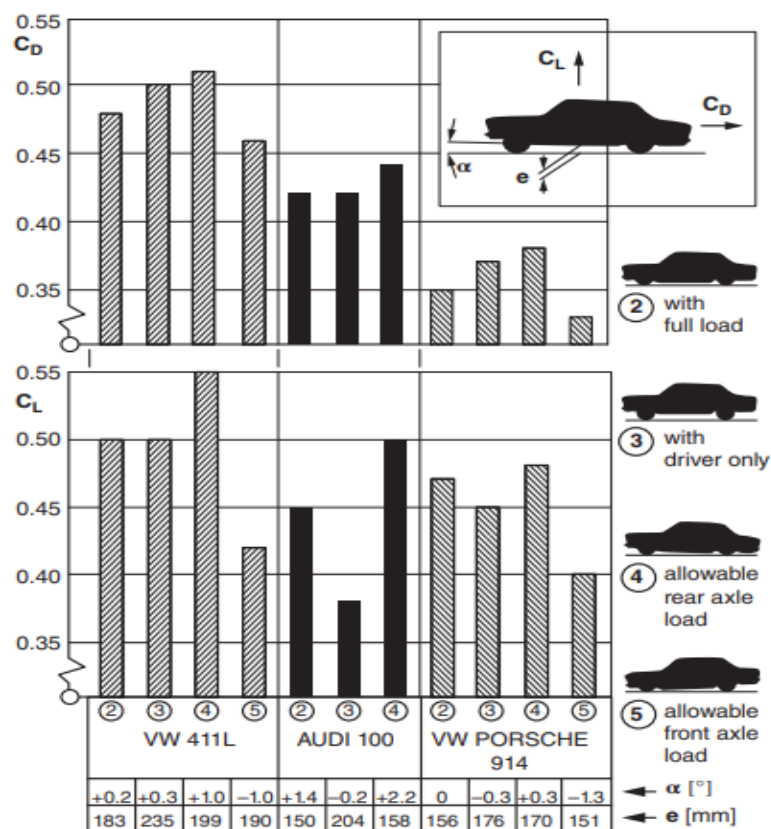


Figura 34. Influencia de la carga en el coeficiente de arrastre y de sustentación

Fuente: Wong, (2022). Theory of Ground Vehicles.

En el análisis se comparan tres vehículos: el VW 411L, el Audi 100 y el VW Porsche 914, bajo diversas condiciones de carga, tales como carga completa, presencia exclusiva del

conductor, carga máxima permitida en el eje trasero y carga máxima en el eje delantero. Asimismo, se incluyen valores asociados al ángulo de ataque ( $\alpha$ ) y a la distancia al suelo ( $e$ ), evidenciando que la carga modifica indirectamente estos parámetros geométricos.

La influencia de la carga sobre el comportamiento aerodinámico del vehículo se explica porque esta modifica la posición efectiva de la carrocería respecto al flujo de aire. De acuerdo con Hucho (1987), la posición del vehículo frente a la carretera, definida principalmente por la distancia al suelo y el ángulo de ataque, influye directamente sobre el coeficiente de arrastre ( $C_d$ ) y el coeficiente de sustentación ( $C_l$ ).

Durante la operación real del automóvil, estos parámetros no varían de manera independiente, sino que cambian simultáneamente en función de la carga aplicada y de su distribución entre los ejes delantero y trasero. Por esta razón, condiciones como carga completa, carga parcial o carga máxima en un eje pueden modificar la altura al suelo, la inclinación longitudinal del vehículo y, en consecuencia, la distribución de presiones alrededor de la carrocería.

Los resultados presentados por (Hucho, 1987), muestran que la variación del ángulo de ataque puede incrementar tanto el arrastre como la sustentación, llegando a producir cambios aproximados del 2 % en el coeficiente de arrastre por cada grado de variación angular.

Asimismo, el efecto de la distancia al suelo no presenta una tendencia única para todos los vehículos, ya que depende de factores como la geometría inferior, la rugosidad del piso, la forma de la carrocería y la configuración de la zona trasera. Esta variabilidad explica por qué modelos como el VW 411L, el Audi 100 y el VW Porsche 914 presentan respuestas aerodinámicas distintas bajo condiciones similares de carga.

Además, (Džijan et al., 2019) demostraron mediante simulaciones CFD que la altura delantera y trasera del vehículo, así como el ángulo de inclinación longitudinal, influyen significativamente en los coeficientes de arrastre y sustentación.

Se observó que las variaciones en la altura al suelo modifican la distribución del coeficiente de presión en el piso inferior del vehículo, afectando la generación de carga aerodinámica y la distribución de fuerzas entre los ejes. En este sentido, la carga del vehículo no solo incide en el peso total, sino también en la geometría aerodinámica efectiva, alterando el flujo inferior, la presión bajo la carrocería y la respuesta global de los coeficientes  $C_d$  y  $C_l$ .

Además de la carga y la distancia al suelo, existen otros factores operacionales que también pueden modificar el comportamiento aerodinámico del vehículo durante su uso real. Entre ellos se encuentran la apertura de ventanas, techo corredizo o faros, debido a que estas condiciones interrumpen la continuidad de la superficie exterior y generan nuevas zonas de separación, recirculación y aumento de presión local. Por tanto, el desempeño aerodinámico no depende únicamente de la forma base de la carrocería, sino también de las condiciones en las que el vehículo opera.

La Figura 35 muestra la influencia de factores operacionales sobre el coeficiente de resistencia aerodinámica ( $C_d$ ) en un vehículo deportivo. Este estudio evalúa cómo condiciones de uso como la apertura de ventanas, techo o faros afectan el comportamiento aerodinámico.

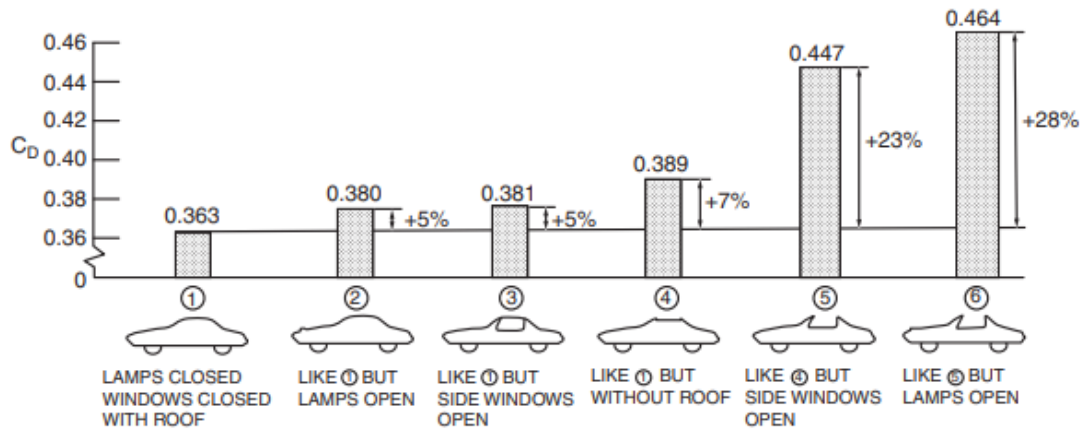


Figura 35. Influencia de las condiciones de operación en el coeficiente de arrastre

Fuente: Wong, (2022). *Theory of Ground Vehicles*.

Se observa que el  $C_d$  aumenta progresivamente a medida que se introducen perturbaciones en la superficie del vehículo, alcanzando incrementos de hasta aproximadamente un 28 %. Este resultado evidencia la sensibilidad del arrastre aerodinámico frente a modificaciones en las condiciones de operación.

El incremento del coeficiente de arrastre se debe principalmente a la alteración del flujo de aire alrededor y dentro del vehículo. En la configuración base, la carrocería presenta una superficie relativamente continua que favorece un flujo más ordenado y con menor separación. Sin embargo, cuando se abren las ventanas o se retira el techo, el aire ingresa al habitáculo y genera recirculaciones internas, turbulencias y zonas de separación que incrementan la resistencia aerodinámica.

Este comportamiento coincide con lo señalado por (Ali et al., 2014), quienes observaron que, al mantener todas las ventanillas abiertas, se formaban fuertes vórtices en el interior del automóvil, produciendo una fuerza de arrastre mayor en comparación con la configuración de ventanillas cerradas.

De manera similar, (Hucho, 1987) indica que factores funcionales u operacionales, como ventanas abiertas, faros abatibles extendidos o techo retirado, modifican el flujo alrededor del vehículo y afectan directamente el coeficiente de resistencia aerodinámica. Por ello, la apertura de faros u otros elementos sobresalientes interrumpe la continuidad de la superficie externa, favorece la separación del flujo y la formación de vórtices, lo que se traduce en un aumento del  $C_d$ . En conjunto, estos resultados demuestran que el arrastre aerodinámico no depende únicamente de la forma base del vehículo, sino también de su estado funcional durante la operación.

Si bien ciertos factores operacionales pueden deteriorar el desempeño aerodinámico al alterar el flujo externo, una optimización cuidadosa de detalles geométricos específicos permite compensar parcialmente estos efectos y reducir la resistencia total del vehículo. Por ello, el análisis aerodinámico no debe limitarse a la forma global de la carrocería, sino que debe extenderse a los elementos secundarios que condicionan la calidad del flujo.

La optimización se fundamenta en la premisa de que el concepto estilístico del vehículo ya ha sido definido, por lo que las mejoras aerodinámicas solo pueden abordarse mediante modificaciones en los detalles del diseño como se muestra en Figura 36. Los esquemas ilustran

cambios menores en elementos específicos, tales como la modificación del deflector frontal (A), la línea del capó (B), la forma del pilar A (C) y la geometría del pilar D (D y E). El gráfico asociado muestra la magnitud de la reducción del arrastre obtenida a partir de distintas combinaciones de estas modificaciones. Alcanzando en conjunto una disminución total de hasta el 21 % en el coeficiente de arrastre

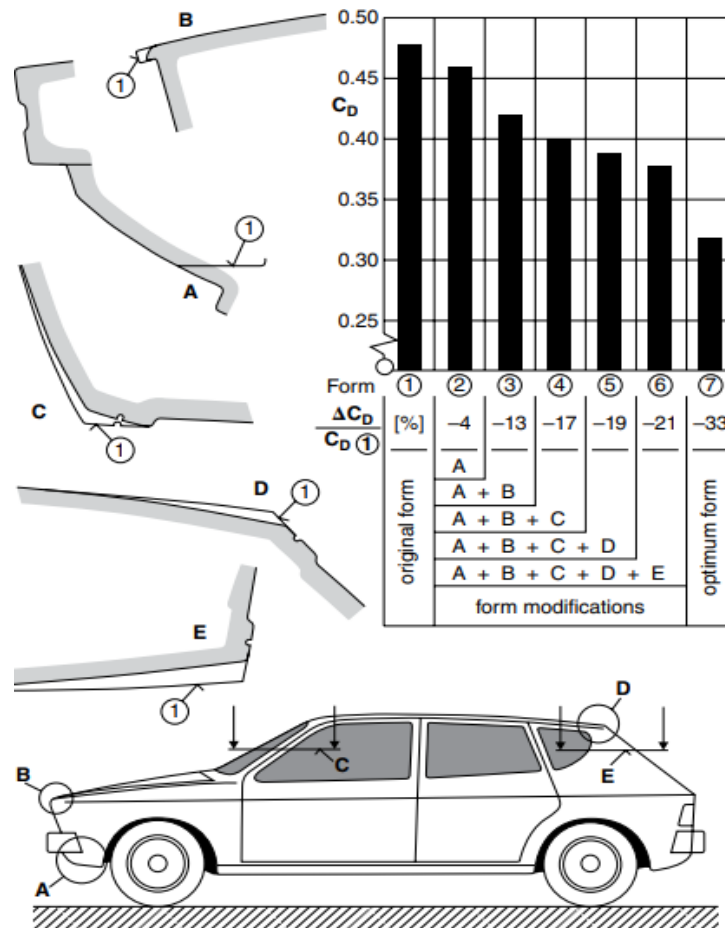


Figura 36. Optimización del cuerpo del vehículo en el coeficiente de arrastre

Fuente: Gillespie, T. D. (2021). *Fundamentals of Vehicle Dynamics Revised Edition*.

Finalmente, la optimización aerodinámica no solo responde a criterios de desempeño, sino también a factores económicos. Se ha demostrado que una reducción del 10% en el coeficiente de arrastre puede disminuir el consumo de combustible en aproximadamente un 2% en vehículos convencionales, mientras que en vehículos eléctricos puede aumentar la autonomía entre un 3% y un 4%. Esto evidencia el impacto significativo de la aerodinámica en la eficiencia energética y en la sostenibilidad del transporte (Zhang et al., 2026).

Esto se puede evidenciar en la Figura 37 muestra la relación entre el coeficiente de resistencia aerodinámica ( $C_d$ ) y el consumo de combustible en función de la velocidad para un vehículo de pasajeros de tamaño medio. El análisis establece una conexión entre parámetros aerodinámicos y desempeño real.

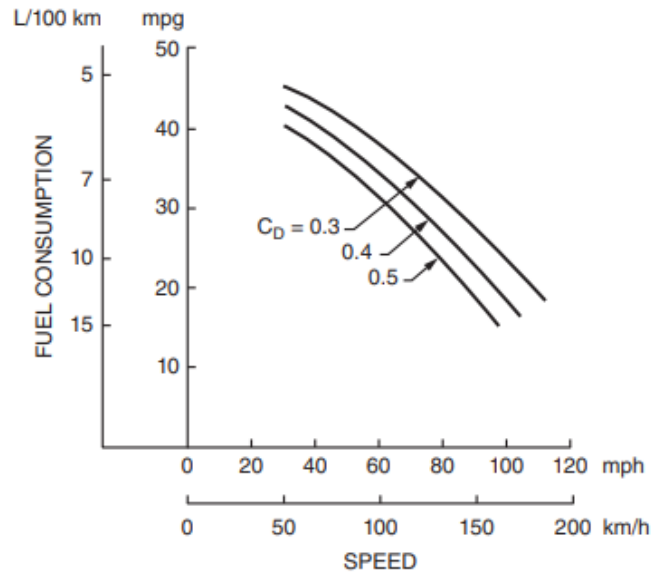


Figura 37. Efecto de la reducción del coeficiente de arrastre en el consumo de combustible

Fuente: Wong, (2022). Theory of Ground Vehicles.

Se observa que el consumo de combustible aumenta con la velocidad en todos los casos; sin embargo, los vehículos con menor  $C_d$  presentan un consumo significativamente menor, especialmente a velocidades elevadas. A bajas velocidades, la diferencia entre curvas es reducida, pero a medida que la velocidad incrementa, la separación entre ellas se vuelve más pronunciada.

Desde el punto de vista energético, la aerodinámica adquiere una relevancia aún mayor en los vehículos eléctricos. Mientras que en los vehículos de combustión interna solo entre el 20% y el 30% de la energía del combustible se convierte en potencia útil, los vehículos eléctricos alcanzan eficiencias del 85% al 90%. Esto implica que, para una misma resistencia aerodinámica, el impacto de esta en el consumo energético es más significativo en vehículos eléctricos. Por esta razón, la reducción del arrastre aerodinámico es fundamental para incrementar la autonomía de estos vehículos (Xiong et al., 2012)

En el contexto de los prototipos de alta eficiencia (Figura 38), como los desarrollados para la competencia Shell Eco-marathon, la metodología de diseño aerodinámico se orienta principalmente a reducir la resistencia al avance y, en consecuencia, disminuir la energía necesaria para desplazar el vehículo.



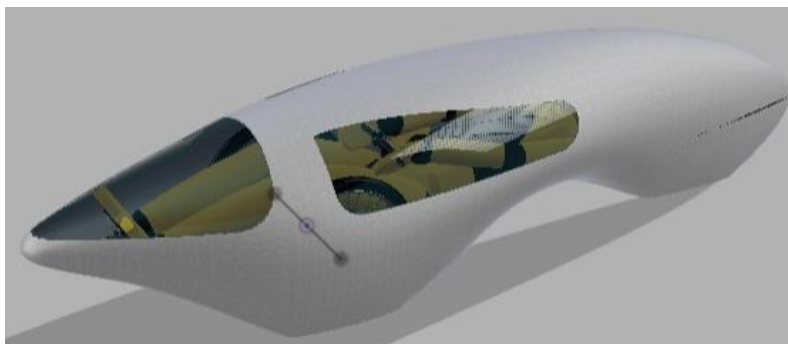
*Figura 38. Prototipo de alta eficiencia*

*Fuente: Cieśliński et al., (2016). Investigation on Aerodynamics of Super-Effective Car for Drag Reduction.*

A diferencia de los vehículos de producción, donde el diseño debe equilibrar aspectos como confort, habitabilidad, seguridad, estética y funcionalidad comercial, en estos prototipos el objetivo principal es maximizar la distancia recorrida con la menor cantidad de energía posible. Por esta razón, la aerodinámica adquiere un papel determinante dentro del proceso de diseño, ya que el arrastre puede representar una fracción significativa de las pérdidas totales del vehículo.

En este sentido, Cieśliński et al. (2016) señalan que, en este tipo de vehículos, la resistencia aerodinámica puede llegar a representar hasta el 50 % del consumo energético total. Por lo tanto, la reducción del coeficiente de arrastre y del área frontal constituye una prioridad fundamental en el diseño de estos prototipos.

A partir de la literatura revisada, se identifica que la metodología más común parte de una geometría base definida por los requerimientos del piloto, el sistema de propulsión, el chasis y las restricciones reglamentarias. Posteriormente, se generan variantes geométricas de la carrocería mediante herramientas CAD, como se muestra en la Figura 39, las cuales son evaluadas a través de simulaciones CFD o ensayos experimentales.



*Figura 39. Diseño del prototipo*

En el caso de Abo-Serie et al. (2017) el diseño inicial de un vehículo para la competencia Shell Eco-marathon fue analizado mediante CFD, tal como se aprecia en la Figura 40, empleando

la distribución de presión y los vectores de velocidad como criterios para modificar progresivamente las zonas frontal, inferior y posterior del vehículo.

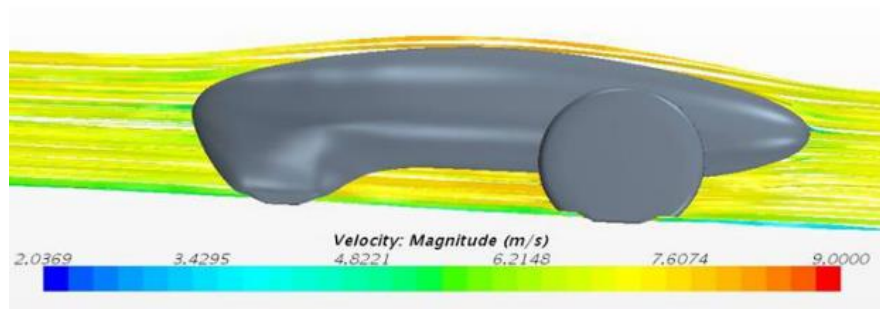


Figura 40. Análisis CFD de un prototipo de alta eficiencia

Fuente: Abo-Serie et al., (2017). AERODYNAMICS ASSESSMENT USING CFD FOR A LOW DRAG SHELL ECO-MARATHON CAR

Como resultado de este proceso de optimización, el coeficiente de arrastre se redujo de 0,430 en el modelo base a 0,127 en el diseño final, manteniendo el cumplimiento de las regulaciones establecidas por la competencia.

La geometría tipo gota aparece como una referencia recurrente en el diseño de prototipos de bajo consumo, debido a su bajo arrastre aerodinámico. Sin embargo, su aplicación directa presenta limitaciones prácticas relacionadas con la longitud total del vehículo, el espacio disponible para el piloto, la ubicación de los componentes, la visibilidad y la seguridad.

Por esta razón, la estrategia más viable consiste en adoptar una geometría inspirada en la forma de gota, pero adaptada a las restricciones reales del prototipo. Esta adaptación suele incluir una parte frontal suavemente redondeada, una sección central con baja área frontal y una zona posterior progresivamente estrechada, con el propósito de retrasar la separación del flujo y reducir el tamaño de la estela.

En este sentido, (Abo-Serie et al., 2017) señalan que, aunque la forma de gota es ampliamente reconocida por su bajo arrastre, no puede aplicarse de manera ideal debido a limitaciones de empaquetamiento, dimensiones y seguridad. No obstante, una geometría similar, con la parte posterior recortada, puede mantener un flujo relativamente ordenado y reducir las pérdidas aerodinámicas.

Desde el punto de vista metodológico, otro criterio fundamental consiste en evaluar no solo el coeficiente de arrastre ( $C_d$ ), sino también el producto ( $A \cdot C_d$ ), donde ( $A$ ) representa el área frontal del vehículo. Este parámetro permite valorar de forma más realista el desempeño aerodinámico, ya que un vehículo puede presentar un coeficiente de arrastre bajo, pero una elevada área frontal que incremente la fuerza total de resistencia.

En este sentido, (Cieśliński et al., 2016) compararon diferentes geometrías inspiradas en prototipos ganadores de Shell Eco-marathon y destacaron que la reducción del área frontal es tan importante como la disminución del  $C_d$ , debido a que ambos parámetros intervienen directamente en la fuerza aerodinámica.

Asimismo, en su estudio se observó que algunos modelos con carenados presentaban un menor coeficiente de arrastre; sin embargo, no necesariamente ofrecían un mejor desempeño aerodinámico global cuando se consideraba el producto ( $A \cdot C_d$ ).

En los prototipos Shell Eco-marathon también se observa una atención especial al tratamiento aerodinámico de las ruedas. Debido a que las ruedas expuestas generan separación del flujo, formación de vórtices y aumento del arrastre, diversos estudios plantean el uso de carenados o cubiertas parciales para reducir estas perturbaciones.

No obstante, estos elementos deben analizarse cuidadosamente, ya que pueden incrementar el área frontal del vehículo o interferir con el giro de las ruedas. Por ello, su implementación debe evaluarse considerando tanto la reducción del coeficiente de arrastre ( $C_d$ ) como el posible aumento del área frontal.

En este sentido, (Cieśliński et al., 2016) evaluaron configuraciones con ruedas expuestas y con carenados, concluyendo que las cubiertas pueden reducir el  $C_d$  en determinados casos. Sin embargo, su beneficio depende de la forma, el tamaño y la posición del carenado respecto a la carrocería.

De manera similar, (Sirojuddin et al., 2019) modificaron la geometría del carenado de la rueda delantera del vehículo Si Pitung G4, como se muestra en la Figura 41, transformando una forma lateral paralela en una geometría más curva, similar al cuerpo de un pez. Esta modificación permitió reducir el coeficiente de arrastre de 0,15 a 0,13, lo que equivale a una disminución aproximada del 17,77%.

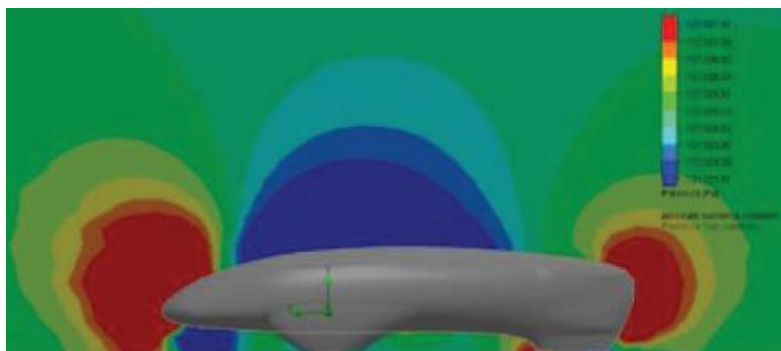


Figura 41. Análisis CFD del prototipo Si Pitung G4

Fuente Sirojuddin et al., (2019). Aerodynamic Drag Reduction of Vehicle Si Pitung G4 UNJ for Shell Eco-Marathon Asia 2015

La región posterior del prototipo constituye otro criterio prioritario de diseño, debido a su influencia directa en la formación de la estela aerodinámica. (Arpino et al., 2019) señalan que una parte importante del arrastre de un vehículo se genera en la zona de baja presión ubicada detrás de la carrocería, donde la separación del flujo determina el tamaño de la región de recirculación y, en consecuencia, la magnitud de la resistencia por presión.

En este sentido, el diseño de la cola del prototipo debe orientarse hacia una recuperación gradual de presión, evitando cambios bruscos de sección que puedan generar una separación prematura del flujo. Para ello, se recomienda emplear una geometría posterior progresivamente estrechada, con transiciones suaves y continuidad superficial, de modo que se reduzca el tamaño de la estela y se mejore el desempeño aerodinámico global del vehículo.

En cuanto a las metodologías de evaluación, la literatura evidencia dos enfoques principales. El primero corresponde al análisis numérico mediante dinámica de fluidos computacional (CFD), utilizado para visualizar campos de presión y velocidad, líneas de corriente

y zonas de recirculación. El segundo corresponde a la validación experimental, desarrollada principalmente mediante túneles de viento.

En este contexto, Arpino et al. (2019) desarrollaron una investigación numérica y experimental sobre el prototipo Nebula, el cual se ilustra en la Figura 42 de Shell Eco-marathon. Para ello, emplearon un modelo a escala 1:18 en túnel de viento y compararon los resultados experimentales con simulaciones CFD basadas en modelos de turbulencia.

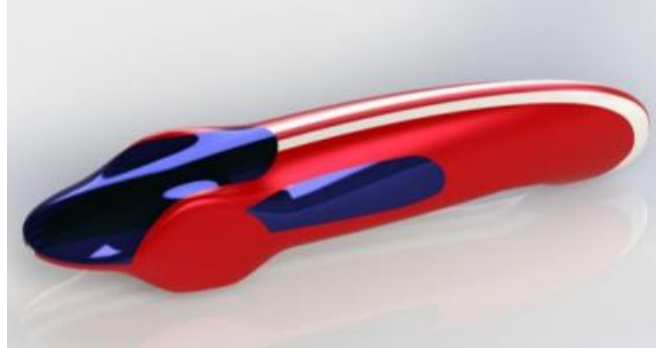


Figura 42. Prototipo Nebula

Fuente Arpino et al., (2019). Numerical and experimental investigation of the flow over a car prototype for the Shell Eco Marathon

Esta metodología permitió validar el modelo numérico y, posteriormente, aplicarlo al análisis del vehículo a escala real, fortaleciendo la confiabilidad de los resultados obtenidos mediante simulación.

## Resultados

A partir de la revisión bibliográfica realizada, se determinó que los factores más influyentes son el coeficiente de arrastre, el área frontal, el coeficiente de sustentación, la distribución de presiones, la capa límite, la separación del flujo, la estela aerodinámica, los vórtices, la geometría frontal, la geometría posterior, el flujo inferior, las ruedas, los carenados, los apéndices aerodinámicos, la altura al suelo, el ángulo de ataque y la velocidad. Estos elementos condicionan directamente la resistencia al avance, la estabilidad y la eficiencia energética del vehículo.

El análisis permite establecer que la resistencia aerodinámica se origina principalmente por la resistencia de presión y, en menor medida, por la fricción superficial. La resistencia de presión está asociada con la distribución de presiones sobre la carrocería, la separación del flujo y la formación de una estela posterior de baja presión. Por ello, se identifica que una de las estrategias fundamentales para reducir el arrastre consiste en controlar la separación del flujo y disminuir el tamaño de la estela posterior.

Asimismo, se evidencia que el producto  $CdA$  resulta en un valor más representativo que el coeficiente de arrastre de forma aislada, ya que integra tanto la eficiencia de la geometría como el tamaño frontal del vehículo. En consecuencia, un prototipo de alta eficiencia no debe orientarse únicamente a reducir el  $Cd$ , sino también a minimizar el área frontal. Esto implica que

la altura total, el ancho de la carrocería, la posición del piloto, la ubicación de las ruedas y la integración de los componentes internos deben definirse procurando que la carrocería tenga las menores dimensiones posibles, respetando el espacio necesario para su operabilidad.

En la Tabla 5 se resumen los fundamentos aerodinámicos más relevantes para el diseño del prototipo, considerando su influencia sobre el coeficiente de arrastre, la estabilidad, el flujo alrededor de la carrocería y las condiciones de operación del vehículo.

*Tabla 5. Fundamentos aerodinámicos*

<b>Fundamento</b>	<b>Relevancia para el diseño aerodinámico del prototipo</b>
Coeficiente de arrastre (Cd)	Cuantifica la oposición aerodinámica al avance y permite comparar la eficiencia de distintas geometrías.
Área frontal (A)	Influye directamente en la fuerza de arrastre; debe reducirse al mínimo funcional.
Producto (CdA)	Integra forma y tamaño frontal, por lo que permite comparar prototipos de diferentes dimensiones.
Coeficiente de sustentación (Cl)	Permite evaluar la estabilidad vertical del vehículo y controlar la generación de sustentación o carga negativa.
Distribución de presiones	Explica la formación de zonas de alta y baja presión que condicionan arrastre y estabilidad.
Capa límite	Determina el comportamiento del flujo cercano a la superficie y su tendencia a mantenerse adherido o separarse.
Separación del flujo	Incrementa la estela y la resistencia por presión.
Estela aerodinámica	Región posterior de baja presión y flujo turbulento; constituye una fuente principal de arrastre.
Vórtices	Generan pérdidas energéticas y alteran la distribución de presiones, especialmente en ruedas, bordes y apéndices.
Geometría frontal	Controla el punto de estancamiento y la división inicial del flujo alrededor del vehículo.
Geometría posterior	Determina la recuperación de presión y el tamaño de la estela.
Flujo inferior	Afecta la presión bajo el vehículo, el arrastre y la sustentación.
Ruedas y carenados	Las ruedas expuestas aumentan vórtices y recirculaciones; los carenados pueden reducir el arrastre si están bien integrados.

<b>Fundamento</b>	<b>Relevancia para el diseño aerodinámico del prototipo</b>
Apéndices aerodinámicos	Permiten controlar el flujo y la sustentación, pero pueden incrementar el arrastre si son excesivos.
Altura al suelo	Modifica el flujo inferior y la distribución de fuerzas verticales.
Ángulo de ataque	Cambia la actitud aerodinámica del vehículo e influye sobre (Cd), (Cl) y estabilidad.
Velocidad	Incrementa significativamente la resistencia y la potencia requerida para vencer el arrastre.
CFD y túnel de viento	Herramientas principales para analizar, comparar y validar configuraciones aerodinámicas.

Se identificó que las mejoras más importantes se concentran en la optimización de la geometría frontal, el control de la zona posterior, la reducción del área frontal, el tratamiento del piso inferior, la integración de ruedas y carenados, el uso controlado de apéndices aerodinámicos y la reducción de discontinuidades superficiales.

Uno de los patrones más relevantes identificados es la relación directa entre la geometría posterior, la separación del flujo, la formación de estela y el incremento del coeficiente de arrastre. Las configuraciones con cambios bruscos de sección tienden a generar desprendimiento prematuro del flujo, mientras que las geometrías progresivas favorecen una recuperación de presión más ordenada y reducen la intensidad de la estela. En este sentido, la optimización de detalles geométricos específicos, como el deflector frontal, la línea del capó, la unión entre el parabrisas, el techo y la geometría de cierre en la parte posterior de la carrocería, puede alcanzar reducciones conjuntas de hasta el 21 % en el coeficiente de arrastre.

También se evidencia que las condiciones operacionales pueden modificar de forma considerable el desempeño aerodinámico. La variación del ángulo de ataque puede generar cambios aproximados del 2 % en el coeficiente de arrastre por cada grado de variación angular. De igual manera, factores funcionales como ventanas abiertas, techo retirado, faros abatibles o elementos sobresalientes pueden incrementar el Cd hasta aproximadamente un 28 %.

Otro hallazgo relevante corresponde a la influencia de las ruedas, cavidades abiertas y apéndices aerodinámicos. Las ruedas expuestas generan separación local, vórtices y recirculaciones que reduce el desempeño aerodinámico. Sin embargo, los carenados no siempre producen mejoras automáticas, ya que pueden incrementar el área frontal o interferir con restricciones funcionales. Por lo tanto, su aplicación debe evaluarse como una solución condicionada, dependiente de la geometría del prototipo y del balance entre la reducción del Cd y el posible aumento del área frontal.

En el caso del prototipo Si Pitung, la modificación del carenado de las ruedas delanteras permitió reducir el coeficiente de arrastre de  $C_d=0,15$  en el modelo Si Pitung G4 a  $C_d=0,13$  en el modelo Si Pitung G5. De acuerdo con los autores, esta modificación representó una reducción

del 17,77 % en el arrastre aerodinámico. Este resultado evidencia que la geometría del carenado delantero influye directamente en la distribución de presiones, la trayectoria del flujo y la formación de vórtices, factores que condicionan la resistencia aerodinámica del prototipo.

En los casos específicos de Shell Eco-marathon, se evidencia que las reducciones de arrastre pueden ser más significativas cuando la optimización se realiza sobre la geometría completa del vehículo y no solo sobre componentes aislados. En uno de los diseños CFD revisados, el coeficiente de arrastre se redujo de  $C_d=0,430$  en el modelo base a  $C_d=0,127$  en el diseño final, lo que representa una disminución aproximada del 70,47 %. Esto permite identificar que la integración progresiva de modificaciones en la forma frontal, inferior y posterior del prototipo tiene mayor impacto que la intervención aislada de un solo apéndice.

Además, la comparación de prototipos de alta eficiencia muestra valores de  $C_d$  considerablemente bajos, como 0,075–0,08 para Pac-Car II, 0,096 para Eco-Arrow, 0,1002 para Imperial Eco-Marathon Gen III y 0,066 para el prototipo Nebula. Estos resultados confirman la tendencia hacia carrocerías compactas, continuas, de baja área frontal y con control cuidadoso de la estela posterior. En este tipo de vehículos, la resistencia aerodinámica puede representar hasta el 50 % del consumo energético total, por lo que la reducción simultánea del  $C_d$  y del área frontal resulta un criterio prioritario de diseño.

Una propuesta viable para el diseño preliminar consiste en emplear una arquitectura de tres ruedas, con carrocería cerrada tipo monocasco o cubierta envolvente, baja altura total y geometría longitudinal inspirada en la forma de gota. Esta configuración permite reducir el área frontal y controlar la separación del flujo, siempre que se adapte a las dimensiones mínimas del piloto, el sistema de dirección, el tren motriz, la visibilidad y los requisitos de seguridad de la competencia.

Desde el punto de vista geométrico, la zona frontal debe incorporar un borde de ataque redondeado, superficies limpias y transiciones suaves hacia la cabina y los laterales. Esto permite disminuir la presión de estancamiento y evitar separaciones prematuras del flujo. La sección media debe conservar una baja sección transversal sin comprometer la ergonomía ni la seguridad, mientras que la posición reclinada del conductor puede contribuir a reducir la altura total y el área frontal.

La parte inferior del vehículo debe mantenerse lo más continua posible, ya que las irregularidades, componentes expuestos o discontinuidades bajo la carrocería generan turbulencias y alteran la distribución de presiones. Del mismo modo, la parte posterior debe diseñarse con un estrechamiento progresivo que favorezca la recuperación gradual de presión y reduzca la estela. No obstante, la cola no debe ser excesivamente larga, debido a que puede dificultar la fabricación y exceder restricciones dimensionales. Es por esta razón, que se identifica como criterio adecuado una geometría de gota recortada y compatible con los límites reglamentarios y constructivos.

Por todo lo revisado anteriormente se determina que las recomendaciones deben organizarse en función de su prioridad técnica y de su impacto sobre la eficiencia. En primer lugar, el diseño debe orientarse a reducir conjuntamente el coeficiente de arrastre  $C_d$  y el área frontal  $A$ . No basta con disminuir el  $C_d$  si el área frontal permanece elevada; el vehículo debe configurarse alrededor del volumen mínimo necesario para alojar al piloto, el chasis, el tren motriz, el sistema de dirección y los componentes energéticos.

También, se recomienda emplear una carrocería inspirada en la forma de lágrima, pero adaptada a restricciones reales mediante una geometría de gota recortada. Esta debe considerar un frente redondeado, una sección media compacta y una parte posterior progresivamente estrechada. La zona frontal debe incorporar superficies suaves, radios de curvatura amplios y ausencia de aristas pronunciadas, ya que una geometría abrupta favorece la separación prematura del flujo y aumenta la resistencia por presión.

Además, se recomienda controlar la formación de vórtices en los pasos de rueda, bordes posteriores y extremos de apéndices aerodinámicos, evitando discontinuidades, cambios bruscos de sección y elementos sobresalientes. En el caso de las ruedas, se sugiere reducir su exposición directa al flujo mediante carenados o cubiertas parciales, siempre que estos no aumenten excesivamente el área frontal ni limiten el radio de giro.

Respecto a los apéndices aerodinámicos, estos deben emplearse únicamente cuando su aporte al control del flujo justifique el posible incremento del arrastre. En un prototipo Shell Eco-marathon debe priorizarse la limpieza aerodinámica y la estabilidad antes que la generación elevada de carga aerodinámica, debido a que el objetivo principal es reducir la energía requerida para avanzar.

Finalmente, la altura respecto al suelo y el ángulo de ataque deben mantenerse controlados y estables durante la operación, debido a que sus variaciones modifican la distribución de presión bajo el vehículo, la carga aerodinámica, el arrastre y la estabilidad. Además, se debe conservar la continuidad de la superficie externa, evitando aberturas innecesarias, uniones mal selladas, tapas sobresalientes o componentes expuestos que perturben el flujo.

Por lo tanto, se recomienda evaluar el diseño preliminar mediante una matriz de criterios como la que se observa en la Tabla 6 que incluya el coeficiente de arrastre  $C_d$ , el área frontal, el producto  $C_dA$ , el coeficiente de sustentación  $C_L$ , la estabilidad, la altura respecto al suelo, la facilidad constructiva y el cumplimiento reglamentario.

Tabla 6. Recomendaciones

Aspecto evaluado	Recomendación para el prototipo	Fundamento técnico
Coeficiente de arrastre ( $C_d$ )	Priorizar geometrías de bajo arrastre, con superficies continuas y sin cambios bruscos de sección.	El ( $C_d$ ) representa la oposición aerodinámica al avance y depende principalmente de la forma del vehículo.
Área frontal ( $A$ )	Reducir altura y ancho al mínimo funcional requerido por piloto, chasis y componentes.	La fuerza de arrastre depende directamente del área frontal; reducirla disminuye la carga aerodinámica resistente.
Producto ( $C_dA$ )	Comparar alternativas mediante ( $C_dA$ ), no solo mediante ( $C_d$ ).	Permite evaluar el desempeño aerodinámico global, especialmente entre diseños de distinto tamaño.
Forma general	Adoptar una geometría tipo gota recortada.	Favorece el flujo adherido y reduce la estela, pero se adapta mejor a restricciones de longitud y empaquetamiento.

<b>Aspecto evaluado</b>	<b>Recomendación para el prototipo</b>	<b>Fundamento técnico</b>
Zona frontal	Usar nariz redondeada y transiciones suaves hacia cabina y laterales.	Reduce la presión de estancamiento y evita separación prematura.
Distribución de presiones	Evitar geometrías que produzcan fuertes gradientes adversos de presión.	Los gradientes adversos favorecen el engrosamiento de la capa límite y la separación del flujo.
Zona posterior	Diseñar una cola convergente y progresiva.	Permite una recuperación gradual de presión y reduce la zona de baja presión posterior.
Estela	Minimizar el tamaño de la región separada detrás del vehículo.	La estela está asociada directamente con la resistencia por presión.
Vórtices	Evitar bordes expuestos, discontinuidades y cambios bruscos cerca de ruedas y cola.	Los vórtices incrementan pérdidas energéticas y pueden modificar ( $C_d$ ) y ( $C_l$ ).
Ruedas	Incorporar carenados parciales o integrados si no aumentan excesivamente el área frontal.	Las ruedas expuestas generan separación y vórtices, pero los carenados mal diseñados pueden penalizar el ( $C_dA$ ).
Alerones delanteros	Usarlos solo como elementos de control del flujo inferior, no como generadores intensos de carga.	Pueden reducir sustentación delantera, pero también aumentar arrastre.
Alerones posteriores	Evitar configuraciones agresivas; priorizar control de estela y estabilidad.	La carga aerodinámica negativa mejora estabilidad, pero suele penalizar la eficiencia energética.
Difusores o piso inferior	Mantener una parte inferior limpia y continua.	Reduce turbulencia bajo el vehículo y mejora el comportamiento del flujo inferior.
Altura al suelo	Mantener una altura baja, controlada y compatible con la pista.	La distancia al suelo modifica la presión bajo la carrocería y afecta ( $C_d$ ) y ( $C_l$ ).
Ángulo de ataque	Evitar inclinaciones longitudinales excesivas por carga, suspensión o distribución de masa.	La variación angular puede aumentar el arrastre y alterar la sustentación.
Condiciones operacionales	Evitar aberturas, superficies mal selladas o elementos sobresalientes durante la marcha.	Las discontinuidades interrumpen el flujo y generan recirculaciones.
Peso y construcción	Seleccionar geometrías aerodinámicas fabricables y ligeras.	Una carrocería aerodinámica excesivamente compleja puede aumentar masa y dificultar la construcción.

Aspecto evaluado	Recomendación para el prototipo	Fundamento técnico
Reglamentación	Verificar dimensiones, acceso, visibilidad, seguridad y radio de giro.	La solución aerodinámica debe ser viable dentro de las normas Shell Eco-marathon.

## Conclusiones

En conclusión, se identificó que los fundamentos y parámetros aerodinámicos más determinantes para el diseño vehicular son el coeficiente de arrastre  $C_d$ , el área frontal  $A$ , el producto  $C_dA$ , el coeficiente de sustentación  $C_L$ , la distribución de presiones, la separación del flujo, la formación de estela, los vórtices, la altura al suelo, el ángulo de ataque y la velocidad. A partir del análisis realizado, se determina que la eficiencia aerodinámica no depende de un solo parámetro, sino de la interacción entre la geometría del vehículo, el comportamiento del flujo y las condiciones reales de operación.

La revisión de estudios y desarrollos relevantes permitió evidenciar que las estrategias aerodinámicas más importantes se concentran en la reducción conjunta del coeficiente de arrastre y del área frontal, el control de la separación del flujo, la disminución de la estela posterior, la optimización de ruedas y carenados, el tratamiento del piso inferior, la gestión del flujo de refrigeración y el uso adecuado de herramientas CFD y ensayos experimentales. Asimismo, se identificó que las mejoras aerodinámicas más efectivas no actúan de forma aislada, sino como parte de una optimización integral de la carrocería y sus elementos complementarios.

Además, se sintetizaron criterios de diseño aplicables a prototipos de alta eficiencia. Se determinó que una configuración preliminar adecuada debe partir de una carrocería compacta, cerrada, de baja área frontal, con superficies continuas, zona frontal redondeada, piso inferior limpio y una parte posterior progresivamente convergente. Además, se evidenció que la geometría tipo gota constituye una referencia útil, pero debe adaptarse a restricciones reales de espacio, seguridad, visibilidad, ubicación del piloto, componentes internos y reglamento de competencia.

Finalmente se establecieron recomendaciones orientadas a guiar el diseño aerodinámico preliminar del prototipo. Estas recomendaciones priorizan la reducción del producto  $C_dA$ , el control de la estela posterior, la disminución de vórtices generados por ruedas y discontinuidades, el uso condicionado de apéndices aerodinámicos, el control de la altura al suelo y del ángulo de ataque, así como la evaluación del diseño mediante una matriz de criterios que considere eficiencia, estabilidad, facilidad constructiva y cumplimiento reglamentario. En consecuencia, el diseño del prototipo debe abordarse como un proceso iterativo, donde cada modificación geométrica sea evaluada por su efecto aerodinámico, funcional y constructivo.

## Lista de Referencias

- Abo-Serie, E., Oran, E., & Utcu, O. (2017). AERODYNAMICS ASSESSMENT USING CFD FOR A LOW DRAG SHELL ECO-MARATHON CAR. En *Journal of Thermal Engineering* (Vol. 3, Número 6). Yildiz Technical University Press.
- Ali, J. S., Kashif, S. M., Shaik Dawood, M. S. I., & Omar, A. A. (2014). Study on the effect of window opening on the drag characteristics of a car. En *Int. J* (Vol. 9, Número 4).
- Arpino, F., Cortellessa, G., Frattolillo, A., Iannetta, F., & Scungio, M. (2019). Numerical and experimental investigation of the flow over a car prototype for the Shell Eco Marathon. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 12(1), 207–218.  
<https://doi.org/10.29252/jafm.75.253.28884>
- Aston Martin Aramco Formula One™ Team. (23 de septiembre de 2021). Explained | The role of the wind tunnel in F1. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=5rN7UkmEKdU>
- Barazal, C. A., Flores, I., Sala, J. M., & Ingenieros De Bilbao, E. S. (2002). *DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL*.
- Choi, W., Kim, P., & Kim, K. H. (2026). Parametric Study of Front Splitter on Fastback-Type Vehicle for Aerodynamic Performance. *International Journal of Automotive Technology*.  
<https://doi.org/10.1007/s12239-026-00471-5>
- Cieśliński, A., Cieśliński, C., Prym, W., Stajuda, M., & Witkowski, D. (2016). Investigation on Aerodynamics of Super-Effective Car for Drag Reduction. En *Mechanics and Mechanical Engineering* (Vol. 20, Número 3).
- Creswell, J. (2009). *Research Design Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*.
- Das, R. C., & Riyad, M. (2017). CFD analysis of passenger vehicle at various angle of rear end spoiler. *Procedia Engineering*, 194, 160–165.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.130>
- Džijan, I., Pašić, A., Buljac, A., & Kozmar, H. (2019). Aerodynamic forces acting on a race car for various ground clearances and rake angles. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 12(2), 361–368. <https://doi.org/10.29252/jafm.12.02.28706>
- Fárez, S., & Rockwood, R. (2009). *Simulación aerodinámica de un vehículo Toyota Corolla 2005 en un programa de dinámica de fluidos computacional –CFD–*.
- Flavio, A., Rodrigues, A., Cervieri, A., Carlos, L., Rudi Heidemann, G., Artur, J., Bohrer, H., Jr, H., Rodrigues, R., Gertz, B. A., & Cervieri, C. L. (2019). *UNDERBODY AERODYNAMICS: DRAG COEFFICIENT REDUCTION IN ROAD VEHICLES*.
- Fu, Y. (2023). Aerodynamics and Drag of a Car. En *Highlights in Science, Engineering and Technology MCEE* (Vol. 2023).
- Gillespie, T. D. (2021). *Fundamentals of Vehicle Dynamics Revised Edition*.  
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4271/9781468601770>
- González, J., & Castellano, G. (2014). *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*.
- González, J., & Castellano, G. (2015). *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*.

- Grady, P., Chen, G., Verma, S., Marellapudi, A., & Hotz, N. (2019). *A Study of Energy Losses in the World's Most Fuel-Efficient Vehicle*.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1109/VPPC46532.2019.8952212>
- Hucho, W.-Heinrich. (1987). *Aerodynamics of road vehicles : from fluid mechanics to vehicle engineering*. Butterworth-Heinemann.
- Hugh, Y., & Freedman, R. (2009). *Física universitaria volumen 1*. <http://physics.nist.gov/cuu>
- Imperial Eco-Marathon Team. (2025). *sem-2025-eu-vehicle-design-prototype-gb0007002*.
- Katz, J. (2006). *Race Car Aerodynamics Designing for Speed*.
- Katz, J. (2016). *AUTOMOTIVE AERODYNAMICS*.
- Mirmahdi, E., & Khoubrou, A. (2021). *The Effect of Aerodynamic Forces on Automotive Design and Reducing Fuel Consumption*. <https://doi.org/10.37628/IJRA>
- Obidi, Y. (2014). *THEORY AND APPLICATIONS OF AERODYNAMICS FOR GROUND VEHICLES*.
- Sirojuddin, Raden, & Wardoyo. (2019). Aerodynamic Drag Reduction of Vehicle Si Pitung G4 UNJ for Shell Eco-Marathon Asia 2015. *KnE Social Sciences*, 3(12), 304.  
<https://doi.org/10.18502/kss.v3i12.4096>
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339.  
<https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Valencia, A., & Lepin, N. (2024). Effect of Spoilers and Diffusers on the Aerodynamics of a Sedan Automobile. *International Journal of Heat and Technology*, 42(4), 1164–1172.  
<https://doi.org/10.18280/ijht.420406>
- Vdovin, A., Lofdahl, L., & Sebben, S. (2014). Investigation of Wheel Aerodynamic Resistance of Passenger Cars. *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*, 7(2), 639–645. <https://doi.org/10.4271/2014-01-0606>
- Wong, J. Y. (2022). *Theory of Ground Vehicles*.
- Zhang, Z., Wang, C., Jing, S., & Wang, W. (2026). A survey on generative methods in automotive aerodynamic shape optimization. *Journal of Computational Design and Engineering*. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwaf145>
- Zhou, H., Zhang, W., Huang, T., & Li, H. (2025). Numerical Analysis of the Aerodynamic Performance of an Ahmed Body Fitted with Spoilers of Different Opening Areas. *Fluid Dynamics and Materials Processing*, 21(5), 1113–1131.  
<https://doi.org/10.32604/fdmp.2025.064991>

## Apéndices

Tabla 7. Coeficiente de arrastre de distintos tipos de vehículos

Fuente: Hucho, (1987). *Aerodynamics of road vehicles : from fluid mechanics to vehicle engineering*

Vehículo	Cd	A (m <sup>2</sup> )	Cd·A (m <sup>2</sup> )
<b>Mini cars</b>			
Opel Corsa SR	0,34–0,35	1,73	0,59–0,61
Fiat Uno ES	0,33–0,34	1,83	0,60–0,62
Opel Corsa 1,2 S	0,36–0,37	1,72	0,62–0,64
Peugeot 205 GL	0,35–0,37	1,74	0,61–0,64
Renault 5 GTL	0,35–0,36	1,79	0,63–0,64
Toyota Starlet 1,3 S	0,35–0,37	1,77	0,62–0,65
Austin Metro HLE	0,37–0,39	1,72	0,64–0,67
Citroën LNA	0,38–0,40	1,71	0,65–0,68
Fiat Uno 55 S	0,35–0,36	1,83	0,64–0,66
Honda Civic 1,2	0,37–0,39	1,72	0,64–0,67
Opel Corsa TR	0,38–0,39	1,72	0,65–0,67
VW Derby C	0,39–0,40	1,71	0,67–0,68
VW Polo Coupé	0,39–0,40	1,72	0,67–0,69
Citroën Visa 17 RD	0,38–0,40	1,76	0,67–0,70
Ford Fiesta 1,1	0,40–0,41	1,74	0,70–0,71
Fiat Panda	0,40–0,42	1,7	0,68–0,71
Fiat 126 Bambino	0,47–0,48	1,52	0,71–0,73
Daihatsu Cuore	0,45–0,46	1,58	0,71–0,73
Nissan Micra GL	0,40–0,41	1,78	0,71–0,73
Suzuki Alto	0,46–0,47	1,59	0,73–0,75
Mitsubishi Colt 1200 GL	0,39–0,42	1,8	0,70–0,76
Renault 4 TL	0,42–0,45	1,82	0,70–0,82
Daihatsu Charade TS	0,47–0,49	1,71	0,80–0,84
Citroën 2CV	0,51–0,52	1,65	0,84–0,86
VW Beetle	0,48–0,49	1,8	0,86–0,88
<b>Lower medium size</b>			
Opel Kadett GSi	0,30–0,31	1,9	0,57–0,59
Opel Kadett GT 1,3 S	0,31–0,32	1,86	0,58–0,60
Opel Kadett LS 1,3 S	0,32–0,33	1,85	0,59–0,61
Citroën GSA Special	0,34–0,35	1,83	0,62–0,64
VW Golf C	0,34–0,35	1,89	0,64–0,66
Ford Orion 1,3	0,35–0,37	1,84	0,64–0,68
Opel Kadett Caravan	0,35–0,36	1,93	0,68–0,69
VW Golf GTI	0,35–0,36	1,91	0,67–0,69
VW Jetta C	0,36–0,37	1,89	0,67–0,70
Alfa Romeo 33 1,3	0,37–0,39	1,82	0,67–0,71
Ford Escort XR3i	0,37–0,38	1,85	0,68–0,70

Vehículo	Cd	A (m <sup>2</sup> )	Cd·A (m <sup>2</sup> )
Renault 11 TXE	0,35–0,37	1,9	0,67–0,70
VW Golf D	0,36–0,37	1,89	0,68–0,70
VW Jetta GT	0,36–0,37	1,91	0,69–0,71
Renault 9 GTL	0,37–0,39	1,85	0,68–0,72
Fiat Regata D	0,38–0,39	1,88	0,71–0,73
Fiat Ritmo 105 TC	0,38–0,39	1,88	0,71–0,73
Mazda 323 1,5	0,41–0,43	1,78	0,73–0,77
Mitsubishi Colt Turbo ECI	0,39–0,41	1,83	0,71–0,75
Mitsubishi Lancer 1500 GLX	0,38–0,41	1,81	0,69–0,74
Nissan Cherry GL	0,39–0,41	1,83	0,71–0,75
Mazda 328 notchback	0,42–0,44	1,79	0,75–0,79
Nissan Sunny	0,41–0,43	1,82	0,75–0,78
Toyota Corolla 1300 DX	0,45–0,46	1,76	0,79–0,81
Talbot Horizon GL	0,41–0,44	1,85	0,76–0,81
VW Golf Cabrio GL	0,48–0,49	1,86	0,89–0,91
<b>Medium size</b>			
Ford Sierra 1,8	0,34–0,35	1,94	0,66–0,68
Ford Sierra Turnier 2,3 D	0,33–0,34	2	0,66–0,68
Renault 18 Turbo	0,35–0,37	1,88	0,66–0,70
VW Passat CL	0,36–0,37	1,89	0,68–0,70
Citroën BX 16 RS	0,34–0,36	1,91	0,65–0,69
Opel Ascona GT 1,8i	0,37–0,38	1,87	0,69–0,71
Mitsubishi Galant 1600 GLX	0,36–0,38	1,88	0,68–0,71
Audi 80 CC	0,38–0,39	1,86	0,71–0,73
Opel Ascona GT notchback	0,38–0,39	1,87	0,71–0,73
Peugeot 305 GTX	0,38–0,40	1,84	0,70–0,74
Mazda 626 GLX 2,0	0,36–0,38	1,92	0,69–0,73
Audi 90 2,0 E	0,39–0,40	1,87	0,73–0,75
BMW 318i (320i)	0,39–0,40	1,86	0,73–0,74
Toyota Camry GLi	0,37–0,39	1,94	0,72–0,76
VW Passat notchback 2,0 E	0,38–0,40	1,91	0,73–0,76
Honda Accord 1,8 EX	0,40–0,42	1,88	0,75–0,79
VW Passat Variant CL	0,40–0,42	1,91	0,75–0,80
Nissan Stanza SGL 1,8	0,40–0,42	1,88	0,75–0,79
Volvo 360 GLT	0,40–0,41	1,95	0,78–0,80
Alfa Romeo Giulietta 1,6	0,42–0,44	1,87	0,79–0,82
Nissan Stanza notchback	0,41–0,43	1,88	0,77–0,81
Nissan Bluebird 2,0 GL	0,41–0,44	1,86	0,76–0,82
<b>Upper medium size</b>			
Mercedes 200 D (250 D)	0,29–0,30	2,05	0,59–0,62
Audi 100 1,8	0,30–0,31	2,05	0,62–0,64
Mercedes 230 E (new)	0,29–0,30	2,06	0,60–0,62
Renault 25 TS	0,30–0,31	2,04	0,61–0,63

Vehículo	Cd	A (m <sup>2</sup> )	Cd·A (m <sup>2</sup> )
Mercedes 190 E (190 D)	0,33–0,35	1,9	0,63–0,67
Lancia Thema 2000 i,e,	0,35–0,35	2,02	0,71–0,71
Mitsubishi Galant Royal	0,36–0,37	1,89	0,68–0,70
Audi 100 Avant TD	0,34–0,35	2,05	0,70–0,72
Opel Rekord 2,2i	0,36–0,37	1,97	0,71–0,73
BMW 323i	0,38–0,39	1,86	0,71–0,73
BMW 518i (520i, 525e)	0,36–0,38	2,02	0,73–0,77
Citroën CX 25 GTi	0,36–0,39	1,99	0,72–0,78
Alfa Romeo 90 2,0	0,38–0,40	1,95	0,74–0,78
VW Passat Synchro	0,40–0,41	1,92	0,77–0,79
Opel Rekord Caravan TD	0,39–0,40	2,06	0,80–0,82
Saab 900 GLi	0,40–0,42	1,95	0,78–0,82
Citroën 25 TRD Break	0,37–0,40	2,16	0,80–0,86
Peugeot 505 STI	0,41–0,43	1,97	0,81–0,85
Mazda 929 2,0 GLX	0,39–0,44	1,93	0,75–0,85
Mercedes 300 TD Turbo diesel	0,41–0,42	2,11	0,87–0,89
Volvo 740 GLE	0,40–0,42	2,16	0,86–0,91
Ford Granada 2,3 GL	0,44–0,46	2,13	0,94–0,98
<b>Luxury cars</b>			
Mercedes 300 SE (260 E)	0,29–0,31	2,06	0,60–0,64
Mercedes 190 E 2,3-16	0,31–0,33	1,92	0,60–0,63
Renault 25 V6	0,32–0,34	2,04	0,65–0,69
Audi 200 Turbo	0,33–0,34	2,07	0,68–0,70
Audi Quattro	0,38–0,40	1,86	0,71–0,74
Saab 9000 Turbo 16	0,34–0,36	2,05	0,70–0,74
Mercedes 380 SEC	0,34–0,35	2,1	0,71–0,74
Rover 3500 Vitesse	0,36–0,37	2,06	0,74–0,76
BMW M5 (E28)	0,37–0,38	2,04	0,75–0,78
Porsche 928 S	0,38–0,40	1,96	0,74–0,78
Jaguar XJ-S	0,40–0,41	1,92	0,77–0,79
BMW 524 td	0,36–0,40	2,04	0,78–0,82
Mercedes 280 SE	0,36–0,37	2,15	0,77–0,80
Mercedes 500 SEL	0,36–0,37	2,16	0,78–0,80
Opel Senator 3,0i	0,39–0,40	2	0,79–0,80
Mercedes 500 SL (Hardtop)	0,45–0,46	1,85	0,83–0,85
Peugeot 604 STI	0,41–0,43	2,05	0,84–0,88
Volvo 760 turbo Intercooler	0,40–0,42	2,16	0,86–0,91
BMW 728i (732i/735i)	0,42–0,44	2,13	0,89–0,94
BMW 745i	0,43–0,45	2,14	0,92–0,96
<b>Sports cars</b>			
Porsche 924	0,31–0,33	1,8	0,56–0,59
Honda CRX Coupé	0,35–0,37	1,72	0,60–0,64
Porsche 944 Turbo	0,33–0,34	1,9	0,63–0,65

Vehículo	Cd	A (m <sup>2</sup> )	Cd·A (m <sup>2</sup> )
Ford Sierra XR 4i	0,32–0,34	1,98	0,63–0,67
Porsche 944	0,35–0,36	1,83	0,64–0,66
Opel Manta GSi	0,35–0,37	1,78	0,64–0,66
Nissan 300 ZX	0,33–0,36	1,82	0,60–0,66
Mazda RX-7	0,36–0,39	1,69	0,61–0,66
Audi Coupé GT 5E	0,36–0,37	1,83	0,66–0,68
Mazda 626 Coupé	0,34–0,36	1,88	0,64–0,68
Renault Fuego GTX	0,34–0,37	1,82	0,62–0,67
VW Scirocco GTX	0,38–0,39	1,74	0,66–0,68
Mitsubishi Cordia Turbo	0,37–0,39	1,78	0,66–0,69
Mazda 929 Coupé 2,0 GLX	0,35–0,37	1,87	0,65–0,69
Opel Monza GSE	0,35–0,36	1,95	0,68–0,70
Porsche 911 Carrera	0,38–0,39	1,78	0,68–0,69
Toyota Celica Supra 2,8i	0,37–0,39	1,83	0,68–0,71
Porsche 911 Carrera Cabrio	0,40–0,41	1,77	0,71–0,73
Ford Capri 2,8i	0,40–0,42	1,81	0,72–0,76
Honda Prelude	0,38–0,40	1,84	0,70–0,74
Chevrolet Camaro Z28 E	0,37–0,38	1,94	0,72–0,74
Mitsubishi Starion Turbo	0,38–0,40	1,84	0,70–0,74

Tabla 8. Coeficientes de arrastre y sustentación de distintos vehículos

Fuente: Katz, (2006). *Race Car Aerodynamics Designing for Speed*

Categoría	Año / Modelo	Cd	Cl
<b>Sedans</b>	1973 Opel Record	0.47	0.36
	1980 Peugeot 305 GL	0.44	0.44
	1986 Subaru XT	0.29–0.31	0.10
<b>Sports cars</b>	Porsche 911 Carrera	0.38–0.39	NA
	1982 Camaro Z28	0.37–0.38	NA
	1982 Corvette	0.36–0.38	NA
<b>Race cars</b>	1990 Mazda GTO (rear deck spoiler)	0.51	-0.44
	1991 Mazda GTO (rear wing)	0.48	-0.53
	1973 Porsche 917/30	0.57	-1.04
	1985 generic prototype	0.74	-1.79
	Generic Porsche 962 C	0.80	-4.80
	1992 Mazda RX-792P	0.70	-3.80
	1992 Nissan P35, C	0.50	-3.00
	1983 generic F-1 (no sidepods)	1.07	-0.99
	1987 March Indy	1.06	-1.71
	1991 Penske PC20 (high downforce)	1.11	-3.33
	1991 Penske PC20 (speedway)	0.740	-2.073
	1992 Galmer G92 (high downforce)	1.397	-3.688
	1992 Galmer G92 (speedway)	0.669	-1.953

	2000 Ferrari F1 (high downforce)	0.99	-2.85
	2002 Dodge NASCAR	0.39	-0.42
	2004 Lola Indy car (high downforce)	0.96	-2.75
	2004 Audi R8	0.54	-2.60

Tabla 9. Coeficientes de arrastre de distintos vehículos

Fuente Katz, (2016). *Race Car Aerodynamics Designing for Speed*

Marca	Modelo	Año	Cd
Acura	CL	2000–2003	0,32
Acura	Integra	1994–2001	0,32
Acura	NSX	1995–2005	0,32
Acura	RSX	2002–2004	0,32
Acura	TSX	2004–2008	0,27
Alfa Romeo	145	1994–2001	0,32
Audi	A2 3L	2001–2003	0,25
Audi	A3	1996–2003	0,31
Audi	A4	1994–2001	0,29
Audi	A6	1997–2004	0,29
Audi	A8	1994–2002	0,28
Audi	TT	2006–	0,3
BMW	Compact	1993–2000	0,31
BMW	3-series	1990–1999	0,3
BMW	5-series	1995–2003	0,27
BMW	7-series	1994–2001	0,3
Buick	LeSabre	1991	0,36
Buick	Park Avenue	1997–2005	0,31
Buick	Regal GS	1991	0,36
Chevrolet	Astro Van	1995–2005	0,4
Chevrolet	Aveo Hatchback	2009	0,32
Chevrolet	Aveo Sedan	2009	0,32
Chevrolet	Camaro	1993–2002	0,34
Chevrolet	Cavalier	1995–2005	0,36
Chevrolet	Corvette	2005	0,29
Chevrolet	Monte Carlo	1995–2000	0,36
Chevrolet	Volt	2011	0,28
Chrysler	PT Cruiser	2000–2006	0,4
Chrysler	Sebring	1995–2000	0,32
Chrysler	Sebring Convertible	1996–2000	0,36
Chrysler	Voyager	1996–2000	0,37
Citroën	2CV	1950	0,51
Citroën	C4	2004	0,28
Citroën	C8	1994–2003	0,34
Citroën	Saxo	1996–2003	0,34

<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>	<b>Año</b>	<b>Cd</b>
Citroën	Xantia	1993–2001	0,31
Citroën	XM	1989–2000	0,3
Daewoo	Espero	1990–1997	0,32
Daewoo	Nexia	1994–1997	0,34
Dodge	Avenger	2008–2009	0,326
Dodge	Caravan	1996–2000	0,35
Dodge	Magnum SE	2005–2007	0,34
Dodge	Neon	1995–1999	0,33
Dodge	RAM 1500 QC	2002–2008	0,52
Dodge	Shadow	1991–1994	0,42
Dodge	Viper (open top)	1996	0,45
Ferrari	458 Italia	2010	0,33
Fiat	Bravo	1995–2001	0,32
Fiat	500	1991–1998	0,33
Fiat	Punto	1993–1999	0,3
Ford	Escort	1997–2002	0,36
Ford	Explorer II	1995–2001	0,43
Ford	F-150	1999–2004	0,36
Ford	Fiesta	1995–2002	0,36
Ford	Fiesta	2011–	0,33
Ford	Focus	2000–	0,29
Ford	Fusion	2010–	0,28
Ford	Ka	1996–2008	0,35
Ford	Ranger	2001	0,49
Ford	Scorpio	1985–1998	0,32
Ford	SVT Mustang	1994–2004	0,37
Ford	Taurus	1996–2000	0,3
Ford	Thunderbird	1989–1997	0,31
Ford	Windstar I	1994–1998	0,35
Geo	Metro 4dr	1995–1997	0,32
GMC	Sierra XFE	2009	0,412
Honda	Accord Ex Coupe	1998–2002	0,34
Honda	Civic Coupe	2006	0,29
Honda	Civic Hatch	1996–2000	0,36
Honda	Civic Sedan	1996–2000	0,32
Honda	Civic SI	1996–2000	0,34
Honda	CR-Z	2010–	0,3
Honda	Insight	2010–	0,28
Honda	Fit	2006–2008	0,35
Honda	Odyssey	2009–	0,39
Honda	Prelude	1997–2001	0,32
Honda	S2000	2000–	0,33
Hummer	H2	2003	0,57
Hyundai	Accent / Excel	1994–1999	0,31
Hyundai	Elantra	2001–2006	0,34

Marca	Modelo	Año	Cd
Hyundai	Elantra	2007–	0,32
Hyundai	Elantra wagon	1998–2000	0,33
Hyundai	Sonata	2006–	0,32
Hyundai	Tiburon GT	2002–	0,32
Infiniti	G20	1999–2002	0,3
Infiniti	Q45	2002–2006	0,3
Jaguar	XJS	1976–1996	0,4
Jaguar	XKR	2005	0,35
Jeep	Cherokee	1984–2001	0,52
Jeep	Grand Cherokee	1993–1998	0,42
Jeep	Liberty	2012	0,39
Jeep	Wrangler TJ (Soft Top)	1997–2005	0,58
Kia	Picanto	2004–2011	0,34
Lamborghini	Countach	1985	0,42
Lamborghini	Diablo	1992	0,31
Lamborghini	Murcielago	2002	0,33
Lancia	Delta HPE	1993–1999	0,33
Lotus	Europa	1967–1974	0,29
Lexus	LS 400	1994–2000	0,27
Mazda	323	1994–1998	0,33
Mazda	626	1992–1997	0,29
Mazda	Miata	1998–2005	0,38
Mazda	MX-3	1992–1995	0,32
Mazda	RX-7	1992–2002	0,33
Mercedes-Benz	C-class	1993–2000	0,3
Mercedes-Benz	CL500	1998–2000	0,28
Mercedes-Benz	E-class	1995–2002	0,27
Mercedes-Benz	G-class	1990–	0,53
Mercedes-Benz	S-class	1991–1999	0,31
Mercedes-Benz	SL600	1989–2002	0,45
Mini	Cooper S	2001–2006	0,33
Mitsubishi	Colt	1995–2002	0,3
Mitsubishi	Eclipse GTS	2000–2005	0,35
Mitsubishi	Lancer	2000–2007	0,3
Mitsubishi	Mirage Coupe	1991–1996	0,32
Mitsubishi	Pajero	1991–1999	0,49
Mitsubishi	300ZX Turbo	1990–1996	0,31
Nissan	350Z	2002–	0,31
Nissan	Altima coupe	2007–	0,31
Nissan	Altima sedan	2007–	0,31
Nissan	Cube	2008–	0,35
Nissan	GT-R	2011–	0,27
Nissan	Leaf	2011–	0,28
Nissan	Maxima	1995–1999	0,32
Nissan	Murano	2008–	0,39

<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>	<b>Año</b>	<b>Cd</b>
Nissan	Sentra	2007–	0,35
Nissan	Versa	2004–	0,31
Opel	Astra	1991–1998	0,32
Opel	Astra Caravan	1991–1998	0,33
Opel	Corsa B	1992–2000	0,36
Opel	Corsa C	2000–2006	0,32
Opel	Sintra	1996–1999	0,34
Opel	Tigra	1994–2001	0,31
Peugeot	106	1991–2004	0,32
Peugeot	206	1998–	0,33
Peugeot	207	2006–	0,3
Peugeot	306	1993–2002	0,32
Peugeot	307 Wagon	2001–2008	0,33
Peugeot	308	2008–	0,29
Peugeot	406	1995–2004	0,31
Peugeot	806	1994–2002	0,34
Pontiac	Bonneville	2002–2005	0,33
Pontiac	Fiero	1986	0,36
Pontiac	Grand AM GT	1992	0,34
Pontiac	Grand Prix	1998–2003	0,29
Pontiac	Trans Am	1985–1989	0,3
Pontiac	Firebird Trans Am	1993–2002	0,34
Pontiac	Trans Sport (Van)	1990–1996	0,3
Pontiac	Vibe	2003	0,33
Porsche	911	1976	0,38
Porsche	914	1969–1976	0,36
Porsche	924	1976–1988	0,32
Porsche	928	1977–1995	0,36
Porsche	944	1982–1991	0,36
Renault	Clio	1990–1998	0,33
Renault	Espace III	1997–2003	0,31
Renault	Laguna	1993–2001	0,3
Renault	Megane	1995–2002	0,32
Renault	Twingo	1992–2007	0,35
Range Rover	Classic	1990	0,45
Rover	214	1995–1999	0,33
Saab	9000 CS	1992–1998	0,32
Saab	Sonett III	1970–1974	0,31
Saturn	SC	1996–2002	0,31
Saturn	SW	1996–2001	0,36
Scion	FR-S	2012–	0,27
Scion	Tc	2005–	0,32
Scion	Xa	2004–2007	0,31
Scion	Xb	2008–	0,32
Scion	Xd	2008–	0,32

<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>	<b>Año</b>	<b>Cd</b>
Seat	Cordoba	1993–2002	0,32
Seat	Ibiza	1993–1999	0,33
Seat	Toledo	1991–1998	0,32
Škoda	Octavia	1996–	0,32
Smart	Roadster	2003	0,41
Subaru	Impreza WRX	2002–2007	0,33
Subaru	Legacy	2009	0,31
Subaru	Legacy Wagon	1995–1999	0,32
Subaru	Outback Wagon	2010–	0,37
Toyota	Camry Solara	1999–2003	0,36
Toyota	Celica GT	2000–2006	0,32
Toyota	Corolla	2003–2008	0,3
Toyota	Corolla	2009–	0,29
Toyota	iQ 3dr	2010–	0,299
Toyota	Matrix	2009–	0,33
Toyota	MR2	1991–1995	0,31
Toyota	Previa	1990–2000	0,33
Toyota	Prius	2004–2009	0,26
Toyota	Prius	2010–	0,25
Toyota	Sienna	2011–	0,309
Toyota	Supra	1993–2002	0,32
Toyota	Tercel	1995–1999	0,32
Toyota	Yaris	2014–	0,29
Volkswagen	Beetle	1998	0,38
Volkswagen	Beetle	1959–1979	0,48
Volkswagen	Caravelle/Transporter	1990–2003	0,37
Volkswagen	Golf	1997–2003	0,32
Volkswagen	Golf Variant	1997–2003	0,34
Volkswagen	Jetta	2006–	0,31
Volkswagen	Jetta Wagon	2000–2005	0,3
Volkswagen	Passat	1995–1997	0,31
Volkswagen	Passat Wagon	1995–1997	0,33
Volkswagen	Polo	1994–2002	0,33
Volvo	850	1992–1997	0,32
Volvo	940	1990–1998	0,34
Volvo	C70 Coupe	1997–2005	0,32

Tabla 10. Coeficientes de arrastre de distintos prototipos

Prototipo / estudio	(Cd)	Fuente
Imperial Eco-Marathon Gen III	0.1002	(Imperial Eco-Marathon Team, 2025)
Imperial Eco-Marathon prototipo anterior	≈ 0.17	(Imperial Eco-Marathon Team, 2025)
Pac-Car II	0.075–0.08	(Cieśliński et al., 2016)
Eco-Arrow	0.096	(Cieśliński et al., 2016)
Si Pitung G4 / G5	0.15 / 0.13	(Sirojuddin et al., 2019)
Diseño CFD Shell Eco-marathon	0.430 → 0.127	(Abo-Serie et al., 2017)
Nebula Prototype	0.066	(Arpino et al., 2019)