

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN  
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



*Trabajo Fin de Grado*

**ANÁLISIS AERODINÁMICO DE UN MODELO  
DE VEHÍCULO UTILIZANDO TÉCNICAS DE CFD**  
(Aerodynamic analysis of a vehicle model using CFD  
techniques)

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA EN  
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

Autor: Javier García Monterrubio

Septiembre 2024



---

# ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN .....</b>	<b>8</b>
<b>PROJECT SUMMARY .....</b>	<b>10</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>11</b>
1.1 OBJETIVOS.....	11
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	12
1.3 ALCANCE.....	13
1.4 LIMITACIONES.....	13
<b>2 HISTORIA Y EVOLUCIÓN DE LA AERODINÁMICA.....</b>	<b>15</b>
<b>3 ACERCAMIENTO TEÓRICO .....</b>	<b>19</b>
3.1 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS.....	19
3.1.1 DENSIDAD .....	20
3.1.2 PESO ESPECIFICO.....	21
3.1.3 VISCOSIDAD .....	22
3.1.4 NÚMERO DE MACH .....	25
3.1.5 COMPRESIBILIDAD.....	26
3.2 CLASIFICACIÓN DEL FLUJO.....	27
3.2.1 SEGÚN EL RÉGIMEN DE MOVIMIENTO .....	27
3.2.2 SEGÚN LA COMPRESIBILIDAD .....	29
3.2.3 SEGÚN LA DIRECCIÓN DEL FLUJO .....	30
3.2.4 SEGÚN EL CAMPO DE FUERZAS .....	30
3.2.5 SEGÚN LA ESTABILIDAD DEL FLUJO.....	31
3.2.6 SEGÚN LA VISCOSIDAD .....	32
3.2.7 SEGÚN SU COMPORTAMIENTO ANTE ESFUERZO CORTANTE .....	33
3.2.8 SEGÚN LA DISTRIBUCIÓN DE LA VELOCIDAD .....	34
3.3 PRINCIPIO DE BERNOULLI .....	36
3.4 CAPA LÍMITE.....	38
3.4.1 NÚMERO DE REYNOLDS.....	39
3.5 AERODINÁMICA .....	40
3.5.1 FUERZAS DE ARRASTRE Y SUSTENTACIÓN .....	41

3.5.2	ARRASTRE DEBIDO A FRICCIÓN Y PRESIÓN .....	43
3.5.3	REDUCCIÓN DEL ARRASTRE MEDIANTE DISEÑO AERODINÁMICO .....	45
3.5.4	EFICIENCIA AERODINAMICA.....	46
3.5.5	VÓRTICES .....	47
3.5.6	AHMED BODY .....	48
3.6	TURBULENCIA.....	50
3.6.1	MODELO k-ε REALIZABLE .....	51
3.7	CINEMÁTICA DE FLUIDOS .....	52
3.7.1	DESCRIPCIÓN LAGRANGIANA Y EULERIANA.....	52
3.7.2	CAMPOS DE PRESIONES, VELOCIDADES Y ACELERACIONES.....	54
3.7.3	GRÁFICAS DE FLUJOS.....	55
3.8	ANÁLISIS DIFERENCIAL DEL FLUJO DE FLUIDOS .....	58
3.8.1	ECUACIÓN DE LA CONTINUIDAD .....	58
3.8.2	ECUACIÓN DE NAVIER STOKES .....	60
<b>4</b>	<b>SIMULACIÓN AERODINÁMICA MEDIANTE CFD.....</b>	<b>62</b>
4.1	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS .....	63
4.2	SOFTWARE.....	64
<b>5</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>66</b>
5.1	ELECCIÓN DEL MODELO DE ANÁLISIS.....	68
5.2	DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA .....	69
5.3	GENERACIÓN DE LA MALLA .....	75
5.4	CONFIGURACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE SIMULACIÓN.....	80
5.5	RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA. ....	88
<b>6</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>92</b>
6.1	AHMED BODY.....	99
6.2	MODELO DE VEHÍCULO .....	103
6.3	IMPACTO ENERGÉTICO EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD .....	108
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>113</b>

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Retrato de Isaac Newton. (Wikipedia) .....	15
Figura 2. Tatra T77. (Wikipedia).....	17
Figura 3. Túnel de viento de McLaren. (Motorsport).....	18
Figura 4. Variación de la densidad relativa del aire con la temperatura. (Wikipedia)	21
Figura 5. Razón de deformación de fluidos comunes. [5] .....	23
Figura 6. Relación viscosidad-temperatura de los fluidos líquidos y gaseosos. [5]..	24
Figura 7. Ondas de choque en un avión de combate. (Wikipedia) .....	26
Figura 8. Flujo laminar, turbulento y de transición .....	29
Figura 9. Flujo externo sobre una pelota de tenis. [5]).....	30
Figura 10. Flujo no estacionario. [5].....	32
Figura 11. Flujo unidimensional sobre un conducto de sección circular. [5].....	34
Figura 12. Flujo bidimensional sobre una bala. [5] .....	35
Figura 13. Flujo tridimensional sobre un Fórmula 1. (WordPress).....	35
Figura 14. Principio de Bernoulli. (Wikipedia).....	37
Figura 15. Perfil de velocidades sobre la capa límite .....	39
Figura 16. Esfuerzos aerodinámicos sobre el ala de un avión. (WordPress).....	43
Figura 17. Vórtices en la estela del alerón trasero en un F1 .....	48
Figura 18. Ahmed Body. (GrabCAD).....	50
Figura 19. Gráfica de perfil de velocidad. [5].....	56
Figura 20. Gráfica vectorial de velocidad. [5] .....	57
Figura 21. Gráfica de contornos de presión. [5].....	57
Figura 22. Proyecto en ANSYS Workbench .....	68
Figura 23. Operación Geometry .....	69
Figura 24. Modelado del Ahmed Body .....	70

---

Figura 25. Conjunto de operaciones para el modelado del Ahmed Body .....	71
Figura 26. Modelado del prototipo de vehículo.....	72
Figura 27. Volumen de control del Ahmed body .....	74
Figura 28. Volumen de control del prototipo de vehículo .....	74
Figura 29. Operación Mesh .....	75
Figura 30. Mallado del volumen de control del Ahmed body .....	76
Figura 31. Mallado del volumen de control del prototipo de vehículo .....	77
Figura 32. Detalle del mallado del volumen de control del Ahmed Body .....	78
Figura 33. Detalle del mallado del volumen de control del prototipo de vehículo.....	78
Figura 34. Named selections de las superficies del volumen de control del Ahmed Body.....	79
Figura 35. Detalle de la named selection "simmetry" del Ahmed Body.....	80
Figura 36. Operación setup .....	80
Figura 37. Configuración de los parámetros de simulación 1.....	81
Figura 38. Configuración de los parámetros de simulación 2.....	82
Figura 39. Velocidad de entrada del fluido .....	83
Figura 40. Configuración de los parámetros de simulación 3.....	85
Figura 41. Configuración de los parámetros de simulación 4.....	87
Figura 42. Operación Solution .....	89
Figura 43. Obtención del coeficiente de arrastre .....	90
Figura 44. Obtención del coeficiente de sustentación.....	91
Figura 45. Operación Results .....	92
Figura 46. Área frontal proyectada del Ahmed Body .....	93
Figura 47. Área frontal proyectada del vehículo .....	94
Figura 48. Fuerzas de arrastre del Ahmed body a 100 km/h.....	94

---

Figura 49. Fuerzas de arrastre del vehículo a 72 km/h.....	94
Figura 50. Fuerzas de arrastre del vehículo a 100 km/h.....	94
Figura 51. Fuerzas de arrastre del vehículo a 120 km/h.....	95
Figura 52. Fuerzas de sustentación del Ahmed Body a 100 km/h.....	96
Figura 53. Fuerzas de sustentación del vehículo a 72 km/h.....	96
Figura 54. Fuerzas de sustentación del vehículo a 100 km/h.....	97
Figura 55. Fuerzas de sustentación del vehículo a 120 km/h.....	97
Figura 56. Diagrama de velocidades del Ahmed Body.....	102
Figura 57. Diagrama de presiones del Ahmed Body.....	102
Figura 58. Diagrama de trayectoria del flujo del Ahmed Body.....	103
Figura 59. Diagrama de velocidades del vehículo.....	106
Figura 60. Diagrama de presiones del vehículo.....	106
Figura 61. Diagrama de trayectoria del flujo del vehículo.....	107

---

**INDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Propiedades del fluido de estudio (aire).....	85
Tabla 2. Resultados de Fuerzas Y Coeficientes de Arraste.....	95
Tabla 3. Resultados de Fuerzas Y Coeficientes de Sustentación.....	97

---

## RESUMEN

El presente Trabajo Final de Grado se centra en el análisis del comportamiento aerodinámico de un vehículo cuando se enfrenta a condiciones de viento frontal adverso mediante la herramienta de simulación de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés).

Previo al estudio aerodinámico detallado del vehículo, se llevará a cabo un análisis exhaustivo de una geometría simplificada de automóvil, como el Ahmed Body. Este modelo simplificado está diseñado para proporcionar una representación básica pero relevante de las características aerodinámicas de un vehículo real, debido a las particularidades de sus perfiles aerodinámicos, que nos permiten conocer de manera sencilla las características fundamentales de aerodinámica vehicular, como son las fuerzas y coeficientes de arrastre y sustentación, así como los fenómenos del comportamiento del flujo (turbulencia, vorticidad, desprendimiento de capa límite, rebufo).

Posteriormente, se procederá al diseño completo de un turismo común, en el cual se realizarán rigurosos estudios aerodinámicos bajo diversas condiciones de funcionamiento. Este proceso implicará la creación de un modelo tridimensional preciso utilizando el software de diseño asistido por computadora ANSYS Design Modeler. Una vez completado el diseño del modelo, se llevarán a cabo simulaciones de CFD utilizando el software ANSYS Fluent para analizar el comportamiento del flujo de aire alrededor del vehículo en diferentes escenarios operativos, incluyendo variaciones en la velocidad del viento. Estas simulaciones permitirán evaluar la resistencia aerodinámica, la distribución de presión y la formación de vórtices en condiciones realistas, proporcionando datos cruciales para optimizar el diseño del vehículo en términos de eficiencia energética, estabilidad y rendimiento.

Para culminar, se llevará a cabo un análisis exhaustivo y detallado de los resultados obtenidos a lo largo del estudio. Se comparará el consumo de combustible del vehículo, atribuyendo exclusivamente las variaciones a efectos aerodinámicos, al operar a distintas velocidades. Esta evaluación se centrará en cómo los cambios en la velocidad afectan la resistencia aerodinámica y, en consecuencia, el consumo de combustible, mientras se mantiene constante cualquier otra variable que pueda influir en el rendimiento del vehículo. El objetivo es aislar el impacto de la aerodinámica en

---

el consumo de combustible para obtener una comprensión clara de cómo las distintas configuraciones aerodinámicas pueden influir en la eficiencia del vehículo en diferentes condiciones de velocidad. Este análisis abarcará la interpretación de los datos, la identificación de patrones y tendencias, así como la evaluación del cumplimiento de los objetivos inicialmente establecidos.

---

## PROJECT SUMMARY

This Final Degree Project focuses on analyzing the aerodynamic behavior of a vehicle when exposed to adverse headwind conditions using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation tools.

Before conducting a detailed aerodynamic study of the vehicle, a thorough analysis of a simplified car geometry, such as the Ahmed Body, will be performed. This simplified model is designed to provide a basic yet relevant representation of a real vehicle's aerodynamic characteristics, given its aerodynamic profile features, allowing us to easily understand fundamental vehicle aerodynamic characteristics, such as drag and lift coefficients, and flow phenomena (turbulence, vorticity, boundary layer detachment, recirculation).

Subsequently, a complete design of a common passenger car will be undertaken, with rigorous aerodynamic studies conducted under various operating conditions. This process will involve creating an accurate three-dimensional model using ANSYS Design Modeler software. Once the model design is completed, CFD simulations will be carried out using ANSYS Fluent software to analyze the airflow behavior around the vehicle in different operating scenarios, including variations in wind speed. These simulations will assess aerodynamic resistance, pressure distribution, and vortex formation under realistic conditions, providing crucial data to optimize the vehicle's design in terms of energy efficiency, stability, and performance.

To conclude, a thorough and detailed analysis of the results obtained throughout the study will be performed. Fuel consumption of the vehicle will be compared, attributing variations exclusively to aerodynamic effects, across different speeds. This evaluation will focus on how changes in speed affect aerodynamic resistance and, consequently, fuel consumption, while keeping other performance-influencing variables constant. The aim is to isolate the impact of aerodynamics on fuel consumption to gain a clear understanding of how different aerodynamic configurations can influence the vehicle's efficiency under varying speed conditions. This analysis will cover data interpretation, pattern and trend identification, as well as the assessment of the fulfillment of the initially established objectives.

---

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 OBJETIVOS

El objetivo de este estudio es analizar en detalle el comportamiento aerodinámico general de un modelo de vehículo, que ha sido diseñado considerando una serie de simplificaciones geométricas, las cuales permitirán evaluar los impactos aerodinámicos asociados de manera más sencilla, brindando una comprensión profunda sobre cómo afectan al rendimiento del vehículo en condiciones reales. Además, se busca calcular y analizar los esfuerzos aerodinámicos fundamentales que se generan en el vehículo, identificando las zonas más críticas en términos de turbulencia o recirculación del flujo de aire, especialmente bajo diversas condiciones de viento frontal adverso.

Este análisis permitirá entender cómo estas fuerzas influyen en la dinámica general del vehículo, sin entrar en un análisis detallado de las causas de los distintos efectos aerodinámicos en cada parte específica de la carrocería. En cambio, se priorizará la cuantificación de la importancia relativa de las áreas donde estos efectos son más significativos, debido a su impacto en el comportamiento global del vehículo.

Paralelamente, un objetivo esencial de este trabajo es adquirir habilidades en el uso de programas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Esto contribuirá al desarrollo de una formación más sólida tanto a nivel intelectual como conceptual en el ámbito de la ingeniería aerodinámica. Sin embargo, es importante señalar que este trabajo no se centrará en los aspectos matemáticos computacionales relacionados con los algoritmos empleados por los programas de CFD, ni en la discretización matemática de las ecuaciones diferenciales que subyacen en estos procesos. El enfoque estará más bien en la aplicación práctica de estas herramientas para resolver problemas aerodinámicos reales, permitiendo así una comprensión aplicada que sea directamente útil para el análisis y optimización de resultados.

---

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

El análisis aerodinámico de un vehículo es esencial debido a su impacto significativo en la eficiencia y el rendimiento del mismo. La aerodinámica juega un papel crucial en la reducción de la resistencia al avance, lo que directamente afecta al consumo de combustible y las emisiones. En un contexto global de creciente preocupación por la sostenibilidad y la eficiencia energética, optimizar el diseño aerodinámico de los vehículos se convierte en una necesidad para cumplir con las normativas ambientales cada vez más estrictas. Realizar un Trabajo de Fin de Grado en este campo no solo proporciona una comprensión profunda de cómo las características aerodinámicas influyen en el desempeño del vehículo, sino que también contribuye a la adquisición de conocimientos en una rama de la mecánica de fluidos en importante crecimiento; la aerodinámica.

Además, el análisis aerodinámico permite explorar y evaluar diversas configuraciones y modificaciones en el diseño del vehículo para mejorar su estabilidad y seguridad. Las simulaciones CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) ofrecen una herramienta poderosa para modelar y analizar el flujo de aire alrededor del vehículo, identificando áreas problemáticas como el arrastre y la formación de vórtices que podrían comprometer la estabilidad. Un TFG en este ámbito permite aplicar técnicas avanzadas de simulación y análisis, brindando una experiencia práctica valiosa en la resolución de problemas complejos relacionados con la aerodinámica. Esta experiencia es altamente apreciada en el campo de la ingeniería y puede abrir oportunidades profesionales en el desarrollo de vehículos más seguros y eficientes.

Finalmente, el estudio del comportamiento aerodinámico de un vehículo a diferentes velocidades y condiciones operativas ofrece una visión integral del rendimiento del vehículo en situaciones reales. Esta investigación no solo es relevante para el desarrollo de nuevos modelos de vehículos, sino también para la mejora de los existentes. Al comparar el consumo de combustible y otros parámetros relacionados con la aerodinámica, se puede proporcionar información crucial para diseñar vehículos que sean más eficientes y competitivos en el mercado. Además, este análisis puede contribuir al avance del conocimiento en el campo de la ingeniería automotriz, ofreciendo datos y conclusiones que pueden ser utilizados para futuras investigaciones y desarrollos en la industria.

---

### **1.3 ALCANCE**

En el presente proyecto, se llevará a cabo un análisis detallado del procesado computacional involucrado en una simulación basada en el método de elementos finitos, con un enfoque especial en los diversos ajustes que se pueden aplicar dentro de este tipo de simulaciones. El objetivo es comprender cómo diferentes parámetros y configuraciones influyen en los resultados, permitiendo una exploración más profunda de las posibilidades y limitaciones de esta técnica en el contexto de la ingeniería aerodinámica.

Aunque somos conscientes de que las simulaciones que realizaremos no alcanzarán el grado de complejidad y precisión que logran las empresas automovilísticas en sus preferidos procesos de diseño y validación, este proyecto nos proporcionará las herramientas necesarias para desarrollar una comprensión sólida de los principios fundamentales que gobiernan la aerodinámica vehicular. A través de este trabajo, se pretende explorar los fenómenos de flujo que ocurren alrededor de un vehículo, como la distribución de presión, la formación de vórtices y la separación del flujo, entre otros. A pesar de las limitaciones inherentes a nuestros recursos y alcance, este proyecto nos permitirá adentrarnos en los conceptos clave y los comportamientos típicos que son críticos para el diseño y optimización de vehículos en la industria automotriz. Así, podremos adquirir un conocimiento práctico y teórico que servirá de base para futuras investigaciones o aplicaciones en el campo de la dinámica de fluidos computacional y la ingeniería aerodinámica.

### **1.4 LIMITACIONES**

Una de las principales dificultades que enfrentamos al llevar a cabo nuestro estudio radica en el modelado preciso de los automóviles. Dado el alto grado de complejidad y detalle presente en la carrocería de un vehículo, tendremos que realizar algunas simplificaciones geométricas durante la fase de modelado. Estas simplificaciones, aunque necesarias para hacer manejable el proceso de simulación, pueden introducir un margen de error en los resultados obtenidos, afectando diversos parámetros aerodinámicos que son críticos para la evaluación del rendimiento del vehículo. La precisión del análisis aerodinámico está directamente vinculada al nivel de detalle del

---

modelo, por lo que cualquier reducción en la fidelidad geométrica podría influir en la exactitud de los resultados.

Además de las simplificaciones geométricas, debemos considerar el impacto del modelo de turbulencia que seleccionamos para el procesamiento computacional. Los modelos de turbulencia son aproximaciones matemáticas que intentan representar el comportamiento del flujo turbulento de aire alrededor del vehículo, pero cada modelo tiene sus propias limitaciones y puede producir desviaciones en comparación con los resultados obtenidos a través de ensayos experimentales. Aunque somos conscientes de que estos factores pueden introducir un margen de error en nuestros resultados, consideramos que este margen no será crítico para los objetivos de nuestro proyecto. Alcanzar un nivel de precisión más elevado implicaría la necesidad de crear un mallado de alta resolución, lo que a su vez requeriría un poder computacional y tiempos de procesamiento mucho mayores, recursos de los que no disponemos en el marco de este estudio. Por lo tanto, aceptaremos un cierto nivel de simplificación y desviación en nuestros resultados, enfocándonos en la comprensión general de los fenómenos aerodinámicos más que en la obtención de resultados absolutamente precisos.

---

## 2 HISTORIA Y EVOLUCIÓN DE LA AERODINÁMICA

La aerodinámica es una rama de la física y de la mecánica de fluidos que estudia el comportamiento de los fluidos en movimiento, especialmente del aire, y su interacción con los objetos. A lo largo del tiempo, la aerodinámica ha pasado de ser una ciencia teórica centrada en la aviación a convertirse en una parte integral del desarrollo de vehículos terrestres. En este recorrido, mencionaremos las figuras clave, los hitos tecnológicos y cómo el desarrollo de herramientas como la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) ha revolucionado el diseño automotriz.

El interés por esta ciencia se remonta a la antigüedad clásica, donde se observaban los fenómenos naturales relacionados con el viento y la resistencia. Sin embargo, el verdadero avance comenzó en el siglo XVII con Isaac Newton, que formuló las primeras teorías sobre la resistencia de un cuerpo en movimiento a través de un fluido, lo que más tarde daría lugar a las primeras nociones sobre arrastre y sustentación [1].



*Figura 1. Retrato de Isaac Newton. (Wikipedia)*

La ciencia aerodinámica empezó a adquirir mayor relevancia a finales del siglo XVIII y principios del XIX, con los estudios de Daniel Bernoulli y su famosa ecuación, que relaciona la presión y la velocidad de un fluido en movimiento. Este principio, esencial para la aeronáutica, resultó igualmente importante para la futura comprensión del flujo de aire sobre cuerpos móviles en tierra. A medida que el conocimiento en

---

aerodinámica crecía, se comenzaron a desarrollar túneles de viento y herramientas experimentales para medir la resistencia de objetos al moverse en el aire. Estas técnicas fueron adoptadas principalmente en la aeronáutica, pero su aplicación al diseño de vehículos terrestres era, en ese momento, incipiente.

La llegada del automóvil a finales del siglo XIX trajo consigo nuevos desafíos, y uno de ellos fue cómo mejorar el rendimiento del vehículo a través del diseño aerodinámico. Los primeros autos no consideraban la aerodinámica, ya que la prioridad era la funcionalidad y la ingeniería básica de los motores y sistemas de tracción. No obstante, conforme aumentaron las velocidades, se hizo evidente que la resistencia aerodinámica afectaba significativamente el rendimiento del vehículo. Paul Jaray, un ingeniero aeronáutico, fue uno de los primeros en aplicar principios aerodinámicos al diseño de automóviles durante la década de 1920, introduciendo formas más suaves y fluidas basadas en sus trabajos con dirigibles. Aunque sus diseños fueron revolucionarios, no se adoptaron ampliamente en la industria en ese momento.

Con el aumento de las velocidades de los automóviles en las décadas de 1930 y 1940, los diseñadores comenzaron a prestar más atención a la forma de los vehículos. Modelos icónicos como el Tatra T77 y el Volkswagen Beetle introdujeron conceptos aerodinámicos en la industria automotriz, lo que demostró que reducir la resistencia del aire mejoraba tanto la velocidad como la eficiencia en el consumo de combustible. Este cambio de paradigma en el diseño automotriz hizo que las pruebas en túneles de viento se convirtieran en una herramienta común para los fabricantes, quienes comenzaron a cuantificar el coeficiente de arrastre ( $C_d$ ) como una métrica clave de rendimiento aerodinámico.



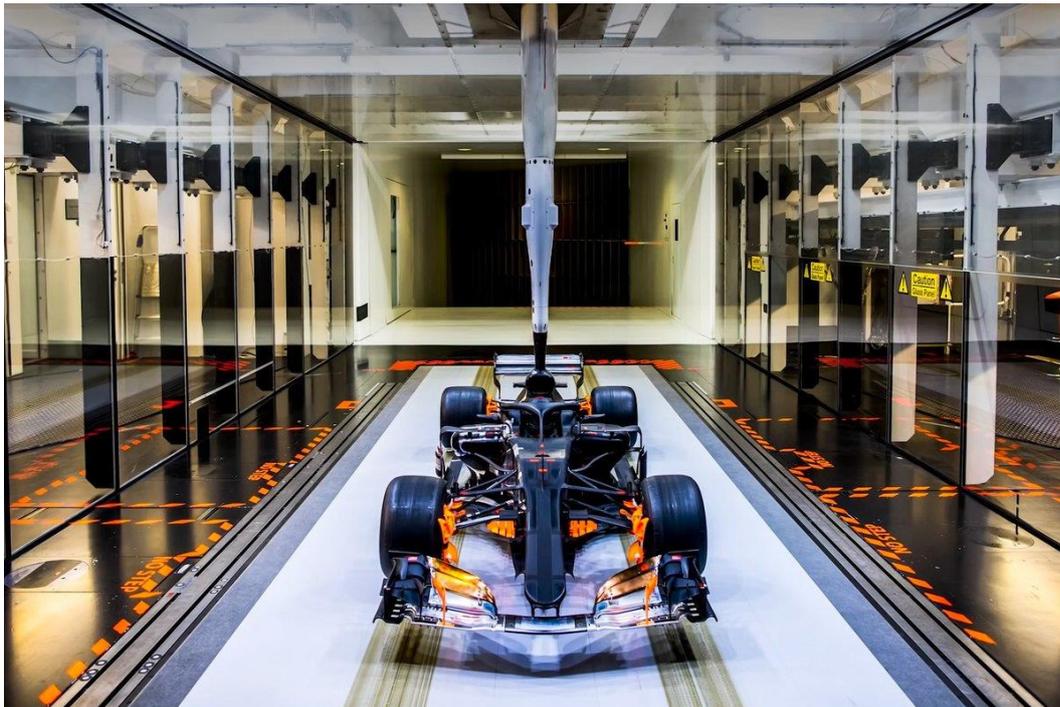
Figura 2. Tatra T77. (Wikipedia)

A partir de la década de 1970, la crisis energética global puso aún más énfasis en la eficiencia aerodinámica de los vehículos. Este período vio el desarrollo de vehículos más compactos y optimizados, donde el ahorro de combustible se convirtió en una prioridad. Los fabricantes comenzaron a estudiar no solo la forma del automóvil en general, sino también detalles como los retrovisores, las tomas de aire y los difusores traseros, con el fin de mejorar el flujo de aire sobre y alrededor del vehículo. El uso de túneles de viento fue fundamental en esta etapa, pero el avance más importante en las últimas décadas ha sido la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). [2]

La simulación CFD permite a los ingenieros estudiar el comportamiento del flujo de aire alrededor de un vehículo de forma virtual, lo que ha reducido drásticamente la necesidad de prototipos físicos y pruebas en túneles de viento. Este enfoque ha hecho que el análisis aerodinámico sea más accesible y rentable, permitiendo que los diseñadores optimicen las formas de los vehículos con gran precisión. Hoy en día, los autos modernos, especialmente los vehículos eléctricos, dependen en gran medida de estudios aerodinámicos avanzados para maximizar la eficiencia energética y el rendimiento. A medida que las velocidades máximas aumentan y las regulaciones de emisiones se vuelven más estrictas, el papel de la aerodinámica es más relevante que nunca [3].

Con la creciente popularidad de los vehículos eléctricos, la aerodinámica ha adquirido una importancia aún mayor. En estos vehículos, reducir la resistencia aerodinámica

no solo mejora el rendimiento, sino que también aumenta la autonomía del vehículo, ya que un flujo de aire más eficiente implica un menor consumo de energía. Los fabricantes están enfocándose en mejorar el coeficiente de arrastre y reducir turbulencias con el fin de maximizar la eficiencia energética. Para lograrlo, se ha adoptado el uso de alerones, difusores y spoilers, que manipulan el flujo de aire para reducir el arrastre y mejorar la estabilidad. A medida que los vehículos eléctricos se vuelven más comunes, el enfoque en la aerodinámica seguirá siendo una parte fundamental del diseño.



*Figura 3. Túnel de viento de McLaren. (Motorsport)*

El futuro de la aerodinámica automotriz sigue evolucionando con el desarrollo de nuevas tecnologías. La integración de herramientas avanzadas de CFD, junto con la inteligencia artificial y el diseño generativo, permitirá que los automóviles sean cada vez más eficientes. Al reducir la resistencia aerodinámica, se espera que los vehículos del futuro no solo sean más rápidos y eficientes, sino que también contribuyan a reducir el impacto ambiental, alineándose con las demandas de sostenibilidad. Este proceso de innovación continua en la aerodinámica automotriz, que refleja un campo en constante evolución, que combina la ciencia clásica con las tecnologías más avanzadas.

---

### 3 ACERCAMIENTO TEÓRICO

A continuación, se abordarán los principios fundamentales y conceptos teóricos de la mecánica de fluidos, un área de estudio clave dentro de la física y la ingeniería. La mecánica de fluidos se encarga de analizar el comportamiento de los fluidos, tanto líquidos como gases, en diversas condiciones y aplicaciones. Para comprender este campo, es esencial conocer las propiedades intrínsecas de los fluidos, como la viscosidad, densidad y presión, así como la clasificación de estos según su estado y comportamiento, ya sean compresibles o incompresibles, viscosos o no viscosos, y newtonianos o no newtonianos.

En este estudio también se presentarán las ecuaciones que rigen el movimiento y las fuerzas en los fluidos, entre las que destacan la ecuación de continuidad, la ecuación de Bernoulli y las ecuaciones de Navier-Stokes. Estas permiten modelar fenómenos como la aerodinámica, que se refiere al comportamiento de los fluidos en movimiento, particularmente el aire, y es esencial en el diseño de vehículos y aeronaves. La comprensión de estos conceptos es crucial para aplicaciones en ingeniería civil, aeronáutica, mecánica, y en general, cualquier disciplina donde los fluidos desempeñen un papel fundamental.

#### 3.1 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

Los fluidos son medios materiales continuos compuestos por sustancias cuyas partículas tienen una atracción débil entre sí. Debido a esto, pueden cambiar de forma sin que surjan fuerzas internas que intenten devolverlos a su configuración original, a diferencia de lo que ocurre con los sólidos deformables. [4]

Las características de estos medios continuos son conocidas como las propiedades de los fluidos. Las propiedades fundamentales de cualquier sistema son las que se denominamos propiedades primarias, y son masa, volumen, presión y temperatura. Sin embargo, en el contexto de la mecánica de fluidos, es necesario definir una serie de propiedades intrínsecas adicionales que definan el estado del fluido en cada instante, entre las que destacan la densidad, peso específico, viscosidad, número de Mach y compresibilidad.

---

### 3.1.1 DENSIDAD

La densidad es una propiedad fundamental de los fluidos (y de todas las sustancias en general), que se define como la cantidad de masa por unidad de volumen. Matemáticamente, la densidad ( $\rho$ ), se expresa como:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Donde:

$\rho$  es la densidad

$m$  es la masa del fluido

$V$  es el volumen de ese fluido

La densidad de los gases es sensible a los cambios de temperatura y presión, ya que los gases, a diferencia de los líquidos y sólidos, son compresibles. Para un gas ideal, la relación presión-volumen-temperatura viene descrita por la ecuación de los gases ideales, y se denota  $PV = nRT$ , donde  $P$  es la presión,  $V$  es el volumen,  $n$  el número de moles,  $R$  es la constante de los gases y  $T$  es la temperatura. La densidad de un gas se puede expresar en función de la ecuación de los gases ideales. Atendiendo a esta ecuación, se puede afirmar que la densidad de un gas es proporcional a la presión e inversamente proporcional a la temperatura.

Un gas ideal es una sustancia hipotética que obedece la relación  $PV=RT$ . De manera experimental, se observa que la relación aproxima con buena precisión el comportamiento P-V-T de los gases reales a bajas densidades, como es el fluido del caso de estudio; el aire. A bajas presiones y altas temperaturas, la densidad de un gas decrece, considerándose como un gas ideal. En el rango de interés práctico, muchos gases como el aire se pueden tratar como gases ideales con error despreciable (a menudo, muy inferior al 1 %) [5].

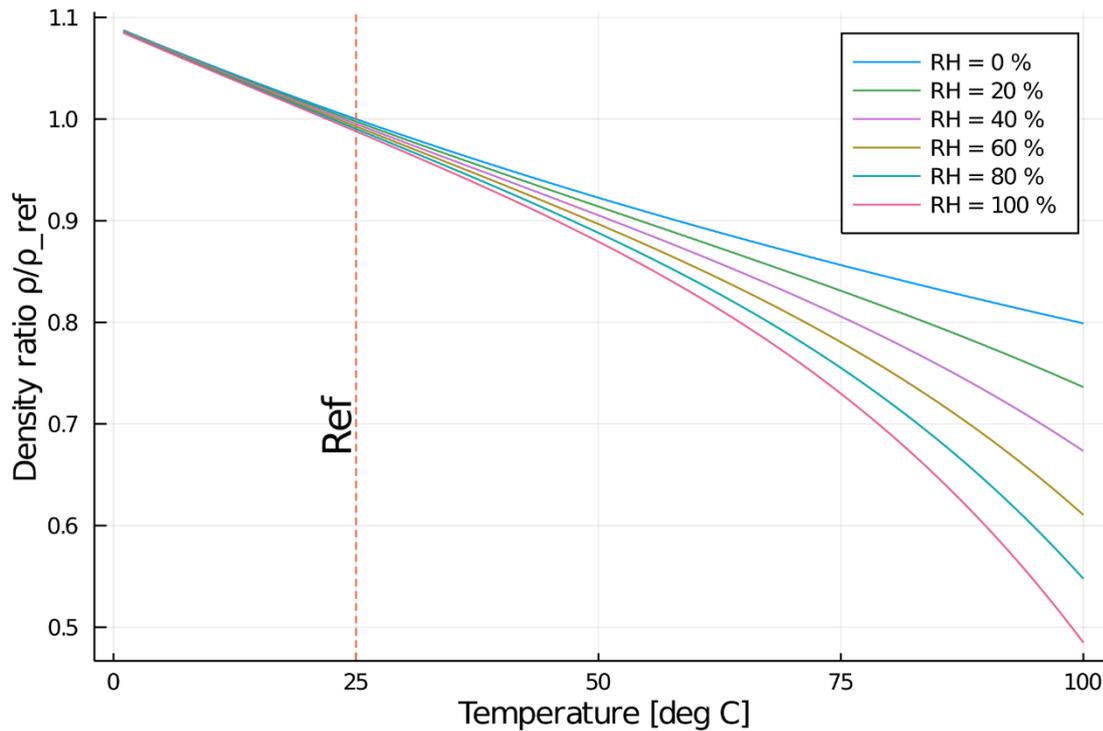


Figura 4. Variación de la densidad relativa del aire con la temperatura. (Wikipedia)

### 3.1.2 PESO ESPECIFICO

El peso específico es una propiedad intrínseca de los fluidos estrechamente relacionada con la densidad, que nos indica el peso por unidad de volumen de una sustancia. Matemáticamente, se expresa como:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{m \cdot g}{V} \left[ \frac{N}{m^3} \right]$$

En aplicaciones prácticas, conocer el peso específico es vital para el cálculo de empuje y flotabilidad en proyectos de ingeniería, así como para la selección de materiales y diseño de sistemas de conducción de fluidos. Su importancia radica en que influye directamente en la distribución de fuerzas dentro de un fluido, afectando fenómenos como el flujo, la presión y la estabilidad de estructuras sumergidas [5].

---

### 3.1.3 VISCOSIDAD

La viscosidad es una propiedad de los fluidos que explica la relación entre la fuerza aplicada para moverlos y la velocidad con que se mueven, es decir, refleja la resistencia del fluido a la velocidad de deformación y se puede interpretar como una analogía al rozamiento en el movimiento de los sólidos.

Técnicamente, representa la fricción interna que existe entre las capas de un fluido cuando se mueven unas respecto a otras. Cuanto mayor sea la viscosidad, más denso será el fluido, por otro lado, cuanto menor sea la viscosidad, más fluido será [5].

Al igual que sucede con la densidad, la viscosidad de un fluido también es función de la presión y temperatura. En los fluidos gaseosos, como el aire, la viscosidad aumenta con la temperatura. Un incremento en la temperatura conlleva a un aumento de la energía cinética de las moléculas del gas, ya que en los gases las fuerzas intermoleculares son despreciables, derivando en una mayor frecuencia de vibración de las partículas e intensidad de las colisiones, dificultando el movimiento ordenado del gas, resultando en una mayor resistencia al flujo, es decir, mayor viscosidad. En los fluidos líquidos sucede lo contrario. Para la mayoría de los gases, la viscosidad se mantiene constante a presiones cercanas a la presión atmosférica y a bajas presiones. Sin embargo, a muy altas presiones la viscosidad aumenta debido al incremento de la densidad.

La fuerza que un fluido fluyente ejerce sobre un cuerpo, en nuestro caso el automóvil, en la dirección del flujo se llama fuerza de arrastre, y la magnitud de esta depende, en parte, de la viscosidad [5].

La viscosidad se clasifica en dos tipos: dinámica y cinemática. Ambas formas de viscosidad permiten entender cómo los fluidos se comportan en distintos contextos, como en la ingeniería de tuberías, el diseño de vehículos y en procesos industriales que involucran el transporte de líquidos.

#### **Viscosidad dinámica.**

La viscosidad dinámica (o absoluta) es una medida de la tenacidad o resistencia al movimiento de un fluido cuando se le aplica una fuerza externa. Para un fluido en movimiento, la viscosidad se puede entender como la relación entre la tensión cortante aplicada y la velocidad de deformación del fluido [5]:

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad [\text{Pa} \cdot \text{s}]$$

Donde:

$\mu$  es la viscosidad dinámica.

$\tau$  es la tensión cortante aplicada al fluido.

$\dot{\gamma}$  es el gradiente de velocidad del fluido por unidad de distancia perpendicular a la dirección del flujo.

La viscosidad dinámica indica cuánta fuerza es necesaria para mover una capa de fluido respecto a otra a una velocidad dada. Un fluido con alta viscosidad requiere más fuerza para lograr el mismo movimiento que un fluido con baja viscosidad. La razón de deformación de un elemento de fluido equivale al gradiente de velocidad, ( $du/dy$ ). Además, se puede verificar de manera experimental que, para la mayoría de los fluidos, la razón de deformación ( $\dot{\gamma}$ , por lo tanto, el gradiente de velocidad) es directamente proporcional al esfuerzo cortante  $\tau$ . [5]

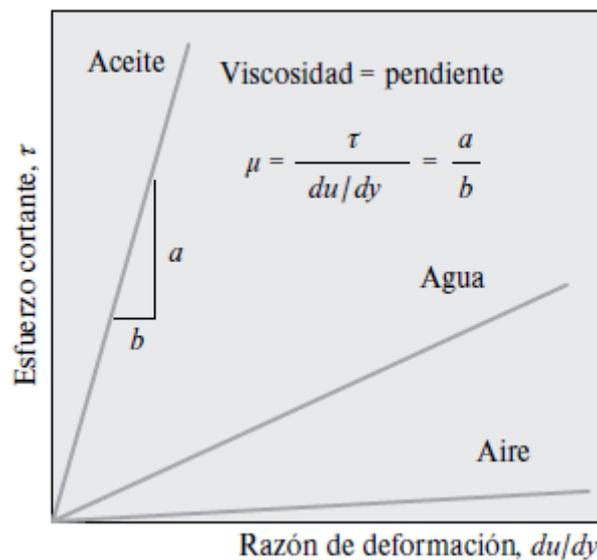


Figura 5. Razón de deformación de fluidos comunes. [5]

Como se ha descrito anteriormente, la viscosidad varía con la temperatura. La viscosidad dinámica puede expresarse en función de la temperatura a través de la fórmula de Sutherland [6]:

$$\mu(T) = \mu_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{T_0 + C}{T + C} [Pa \cdot s]$$

Donde:

$\mu(T)$  es la viscosidad dinámica del gas a la temperatura T

$\mu_0$  es la viscosidad dinámica de referencia del gas a la temperatura  $T_0$

T es la temperatura en la cual se quiere calcular la viscosidad

$T_0$  es la temperatura de referencia en Kelvin

C es la constante de Sutherland, que depende del gas específico. Para el aire,  $C=120K$

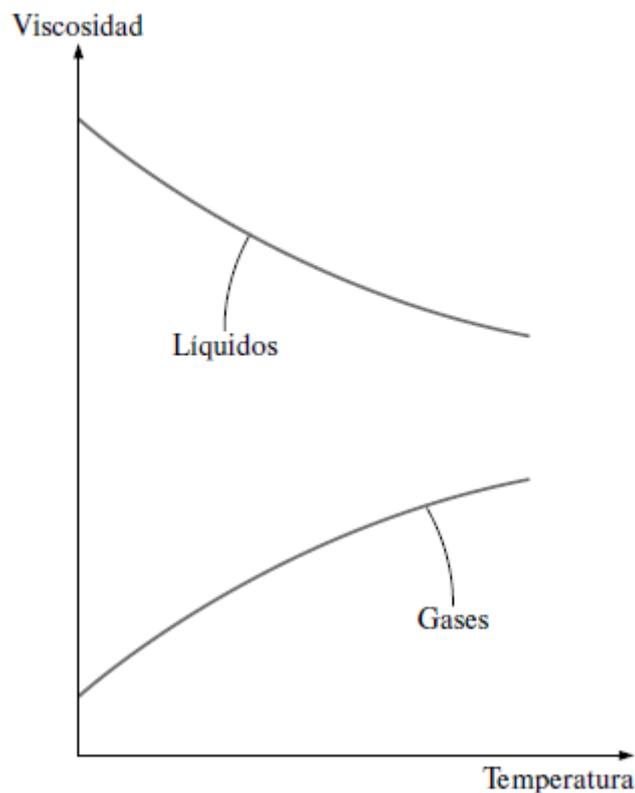


Figura 6. Relación viscosidad-temperatura de los fluidos líquidos y gaseosos. [5]

### **Viscosidad cinemática.**

La viscosidad cinemática es el cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad del fluido, es decir, mide cómo esa resistencia se relaciona con la densidad del fluido, proporcionando una idea de la rapidez con que un fluido fluirá bajo la influencia de la gravedad [5]. Matemáticamente, se denota:

---

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

Donde:

$\nu$  es la viscosidad cinemática.

$\mu$  es la viscosidad dinámica.

$\rho$  es la densidad

### 3.1.4 NÚMERO DE MACH

El número de Mach o simplemente Mach, es un número adimensional de medida de velocidad relativa que se define como el cociente entre la velocidad de un objeto en el seno de un fluido y la velocidad del sonido en ese mismo fluido. Es una propiedad fundamental en la dinámica y mecánica de fluidos, que indica el régimen de flujo de fluido alrededor de un cuerpo. Matemáticamente, se denota:

$$M = \frac{v}{C}$$

Donde:

M es el número de Mach

v es la velocidad del objeto

C es la velocidad del sonido

Atendiendo a los distintos valores que adopte el número de Mach, se establece una clasificación del tipo de flujo de acuerdo con la velocidad, que provoca distintos comportamientos del flujo en términos de compresibilidad, distribución de presiones y ondas de choque.

**Flujo subsónico.** El número de Mach es menor que uno ( $M < 1$ ), es decir, la velocidad del objeto en el fluido es inferior a la velocidad del sonido en dicho fluido. El movimiento del fluido es predecible y controlable, la compresibilidad es baja y no hay formación de ondas de choque.

**Flujo Transónico.** El número de Mach es aproximadamente uno ( $M \approx 1$ ), es decir, las velocidades del sonido y el objeto en el fluido son aproximadamente iguales. El comportamiento del flujo es más complejo y menos predecible, los efectos de la

compresibilidad son notables y pueden llegar a originarse ondas de choque. Hay coexistencia de regiones subsónicas y supersónicas.

**Flujo supersónico.** El número de Mach está comprendido entre 1 y 5 ( $1 < M < 5$ ). La velocidad del objeto es superior que la velocidad del sonido. El comportamiento del flujo es impredecible, la resistencia aerodinámica y la compresibilidad es alta, grandes ondas de choque que dificultan la estabilidad.

**Flujo Hipersónico.** El número de Mach es superior a 5 ( $M > 5$ ). La velocidad del objeto es extremadamente alta, muy superior a la velocidad del sonido. Efectos térmicos críticos, grandes ondas de choque y fenómenos de no equilibrio.



*Figura 7. Ondas de choque en un avión de combate. (Wikipedia)*

### 3.1.5 COMPRESIBILIDAD

La compresibilidad es la capacidad de un fluido para modificar su volumen cuando se le aplica una presión externa. Es común observar que un fluido se contrae cuando se aplica más presión sobre él, y se expande cuando se reduce la presión que actúa sobre él. Es decir, los fluidos actúan como sólidos elásticos respecto a la presión. En aerodinámica, el tipo de compresión que interesa estudiar es la que se produce a

---

temperatura constante, denominada compresibilidad isotérmica [5].

Matemáticamente, la compresibilidad isotérmica se denota:

$$K_T = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial P}{\partial V} \right)_T$$

Donde:

$K_T$  es la compresibilidad isotérmica

$V$  es el volumen del fluido

$P$  es la presión externa aplicada

$\left( \frac{\partial P}{\partial V} \right)_T$  es la derivada parcial de la presión respecto al volumen a temperatura constante

Valores elevados de  $K_T$  indican que es necesaria una gran presión externa para comprimir el fluido. Este es el caso de los fluidos líquidos, considerados incompresibles. En los fluidos gaseosos, que son fácilmente compresibles, tanto en el flujo supersónico o hipersónico, los cambios en la densidad del fluido son importantes y afectan la distribución de presión, velocidad, y temperatura a lo largo del flujo [5].

## 3.2 CLASIFICACIÓN DEL FLUJO

En mecánica de fluidos, los flujos pueden clasificarse en diversas categorías atendiendo a una serie de criterios, como son el régimen de movimiento, la viscosidad, la velocidad, la compresibilidad, entre otras.

### 3.2.1 SEGÚN EL RÉGIMEN DE MOVIMIENTO

El flujo laminar y el flujo turbulento son dos tipos de comportamiento del movimiento de un fluido, como el aire o el agua, cuando se desplaza a través de un conducto, alrededor de un objeto o en un medio abierto. Para determinar si un flujo es laminar o turbulento, se utiliza un parámetro llamado número de Reynolds ( $Re$ ). El número de Reynolds es una relación adimensional que tiene en cuenta factores como la

---

velocidad del fluido, la densidad, la viscosidad y el diámetro del conducto por el que fluye [5].

**Flujo Laminar.** El flujo laminar es un tipo de flujo de fluido en el que las partículas del fluido se mueven en capas paralelas sin mezclarse ni generar turbulencias. En un flujo laminar, las capas de fluido se deslizan suavemente unas sobre otras, y las partículas se mueven a lo largo de trayectorias uniformes y predecibles. Este tipo de flujo es común en situaciones donde el fluido se mueve a baja velocidad y en tuberías o conductos de tamaño reducido.

**Flujo Turbulento.** Es un tipo de flujo de fluido en el que las partículas del fluido se mueven de manera caótica e irregular, generando turbulencias y mezclándose entre sí. En un flujo turbulento, las partículas no siguen trayectorias uniformes ni predecibles, lo que puede generar pérdidas de energía y aumento de la resistencia al flujo. Este tipo de flujo es común en situaciones donde el fluido se mueve a alta velocidad o en tuberías y conductos de gran tamaño.

Entre el flujo laminar y el turbulento, existe una zona de transición en la que el flujo puede cambiar entre ambos estados. En este rango, pequeñas perturbaciones pueden hacer que el flujo cambie de laminar a turbulento o viceversa. En este régimen, el comportamiento del flujo es impredecible y depende de factores como la rugosidad de las paredes del conducto, la presencia de obstáculos, y otras perturbaciones. El número de Reynolds es un indicador clave del tipo de flujo que se desarrollará en un sistema de fluidos. Un flujo laminar ocurre a bajos números de Reynolds y se caracteriza por su regularidad y baja mezcla, mientras que un flujo turbulento ocurre a altos números de Reynolds y es caótico y altamente mezclado. La transición entre estos dos regímenes puede ser crítica en el diseño y operación de sistemas que involucran el movimiento de fluidos [5].

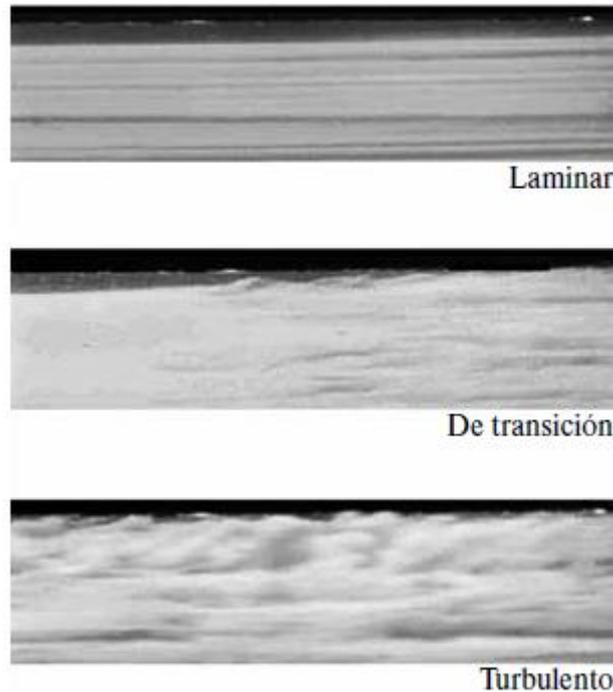


Figura 8. Flujo laminar, turbulento y de transición

### 3.2.2 SEGÚN LA COMPRESIBILIDAD

Un flujo se clasifica como compresible o incompresible, dependiendo del nivel de variación de la densidad del fluido durante ese flujo.

**Flujo compresible.** La densidad del fluido varía significativamente debido a cambios en la presión. Este tipo de flujo es típico en gases a altas velocidades, como en los flujos supersónicos o hipersónicos. Esto significa que el fluido puede experimentar compresión y expansión, lo que afecta tanto la distribución de velocidades como la presión en el flujo.

**Flujo incompresible.** Es aquel en el que la densidad del fluido se mantiene constante a lo largo del flujo. Esta es una buena aproximación para líquidos y para gases a velocidades bajas o moderadas ( $Mach < 0.3$ ). Esto implica que el volumen específico del fluido no cambia significativamente, y, por lo tanto, se considera que no hay compresión o expansión del fluido durante su movimiento.

### 3.2.3 SEGÚN LA DIRECCIÓN DEL FLUJO

En el estudio de la dinámica de fluidos, es fundamental analizar cómo se comportan los fluidos al interactuar con diferentes superficies y entornos. Dependiendo de las características del medio y las condiciones de confinamiento, el flujo puede adoptar diferentes comportamientos que afectan su velocidad, presión y estructura general. De este modo, el flujo se puede clasificar en:

**Flujo interno.** Tiene lugar dentro de canales o conductos, es decir, el flujo queda confinado completamente en superficies sólidas.

**Flujo externo.** El fluido circula libremente alrededor de objetos. Un ejemplo es nuestro caso de estudio; aire fluyendo sobre la superficie exterior de un vehículo.

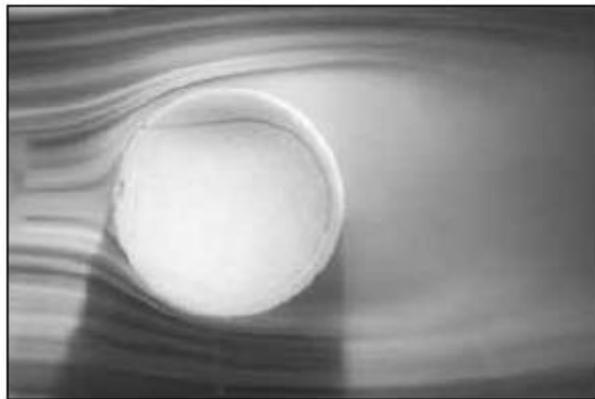


Figura 9. Flujo externo sobre una pelota de tenis. [5])

### 3.2.4 SEGÚN EL CAMPO DE FUERZAS

El comportamiento de los fluidos está fuertemente influenciado por los campos de fuerzas que actúan sobre ellos, ya que determinan cómo se mueven, se deforman y responden a las distintas condiciones externas. Estos campos de fuerzas, que pueden ser gravitatorios, electromagnéticos o mecánicos, entre otros, afectan directamente las características del flujo y su distribución en un espacio dado.

**Flujo natural.** El flujo no es acelerado por ninguna fuerza externa, se mueve por la acción de las fuerzas naturales terrestres, como son la gravedad o la flotabilidad. En nuestro estudio consideraremos que el flujo fluye de manera natural.

**Flujo forzado.** El movimiento del fluido resulta de una fuerza externa. Puede ser acelerado mecánicamente, o por la interacción con campo eléctricos, magnéticos, etc.

---

### 3.2.5 SEGÚN LA ESTABILIDAD DEL FLUJO

En la dinámica de fluidos, el comportamiento de un fluido en movimiento puede presentar una variedad de patrones y características, dependiendo de las condiciones bajo las cuales ocurre el flujo. Estos patrones reflejan cómo interactúan las fuerzas que actúan sobre el fluido, la geometría del entorno por el que se desplaza, y la naturaleza misma del fluido. Uno de los aspectos más fundamentales para comprender el movimiento de los fluidos es cómo las propiedades del fluido, como la velocidad, la presión y la densidad, varían o permanecen constantes a lo largo del tiempo en un punto determinado. Si estas propiedades permanecen invariables en el tiempo el flujo será estacionario, de lo contrario, será no estacionario o transitorio.

**Flujo estacionario.** Se caracteriza por su independencia temporal, es decir, la derivada de cualquier propiedad respecto del tiempo es cero. El movimiento de las partículas del fluido viene determinado por unas trayectorias conocidas como líneas de corriente. El estudio de este tipo de flujo es sencillo y tiene lugar en aplicaciones industriales donde las condiciones de operación son estables.

**Flujo no estacionario o transitorio.** Las propiedades del fluido en un punto determinado varían con el tiempo. En este caso, las derivadas de las propiedades respecto de la variable temporal no son nulas. Es común aplicarlo a flujos en desarrollo. También podemos encontrarnos con el término periódico que se refiere a la clase de flujo no estacionario en donde éste oscila en torno a una media estacionaria.



Figura 10. Flujo no estacionario. [5]

### 3.2.6 SEGÚN LA VISCOSIDAD

Cuando dos capas de fluido se mueven una en relación con la otra, se desarrolla una fuerza de fricción entre ellas y la capa más lenta trata de desacelerar a la más rápida. Esta resistencia interna al flujo se cuantifica mediante la propiedad de viscosidad del fluido, la cual es una medida de la adherencia interna de este. La viscosidad es causada por las fuerzas de cohesión entre las moléculas, en los líquidos, y en los gases, por las colisiones moleculares. No existe fluido con viscosidad cero y, en consecuencia, en todos los flujos de fluidos intervienen los efectos viscosos en cierto grado [5].

**Flujos viscosos.** Se disipa energía mecánica del fluido por fricción interna. En este tipo de flujo, se pueden observar fenómenos como la formación de capas (o "estratificación") y la creación de turbulencias, dependiendo de la velocidad y las condiciones del flujo.

---

**Flujos no viscosos.** La viscosidad del fluido se puede considerar despreciable. No hay resistencia interna significativa en el movimiento del fluido. Pero, en muchos flujos de interés práctico, se tienen regiones (por lo general regiones que no están cercanas a superficies sólidas) en donde las fuerzas viscosas son despreciablemente pequeñas en comparación con las fuerzas de inercia o de presión. Despreciar la viscosidad en esas regiones no-viscosas de flujo simplifica mucho el análisis, sin pérdida considerable en la exactitud [7].

### 3.2.7 SEGÚN SU COMPORTAMIENTO ANTE ESFUERZO CORTANTE

En la mecánica de fluidos, la clasificación de fluidos en Newtonianos y No Newtonianos es fundamental para entender su comportamiento bajo diferentes condiciones de esfuerzo cortante. A continuación, se describe cada tipo:

**Fluidos Newtonianos:** se caracterizan por tener una viscosidad constante y lineal con respecto a la tasa de deformación aplicada. Esto significa que la relación entre el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) y la tasa de deformación ( $\frac{\partial u}{\partial y}$ ) es proporcional y sigue la ley de viscosidad de Newton explicada en el apartado 3.1.3. Esto simplifica su análisis y modelado, ya que la viscosidad no cambia con la velocidad de deformación. Ejemplos típicos de fluidos Newtonianos incluyen: agua, aire y aceites.

**Fluidos No-Newtonianos:** los fluidos No Newtonianos no mantienen una viscosidad constante y su comportamiento no sigue la ley de viscosidad de Newton. En estos fluidos, la relación entre el esfuerzo cortante y la tasa de deformación es más compleja y puede variar con la tasa de deformación, el tiempo, o el esfuerzo aplicado. Entre los fluidos no newtonianos, destacan los pseudoplásticos, en los cuales la viscosidad disminuye con el aumento de la tasa de deformación, estos fluidos se vuelven menos viscosos cuando se aplican esfuerzos cortantes más altos y los dilatantes, su viscosidad aumenta con el aumento de la tasa de deformación, estos fluidos se vuelven más espesos cuando se aplican esfuerzos cortantes mayores. En la actualidad, en algunos países se han implementado badenes inteligentes, los cuales tienen en su interior un líquido no newtoniano, que se trata de un material que es capaz de reaccionar a la fuerza con la que es lanzado o a la que un objeto interacciona con él. De esta manera, cuando un vehículo se desplaza a gran velocidad contra este líquido, este se volverá más duro y el coche tendrá más problemas para pasar (como

si tuviera que sortear un badén tradicional). De lo contrario, el líquido se quedará en este estado si el conductor decide reducir la velocidad para que el líquido no newtoniano se mantenga en este estado [8].

### 3.2.8 SEGÚN LA DISTRIBUCIÓN DE LA VELOCIDAD

se basa en cómo se desplazan las partículas de fluido dentro de un sistema. Esta clasificación es importante en el estudio de la dinámica de fluidos, ya que permite entender mejor el comportamiento del fluido en diferentes aplicaciones. Los principales tipos de flujos según su dirección son:

**Flujo unidimensional.** En este tipo de flujo, las partículas de fluido se mueven predominantemente en una sola dirección. Esto significa que los cambios en las propiedades del fluido (como velocidad y presión) solo varían a lo largo de una coordenada espacial, mientras que las variaciones en las otras direcciones son insignificantes o despreciables. Este tipo de flujo es común en sistemas como tuberías largas o canales con secciones transversales constantes, donde la variación del flujo en las direcciones perpendiculares al movimiento es mínima.

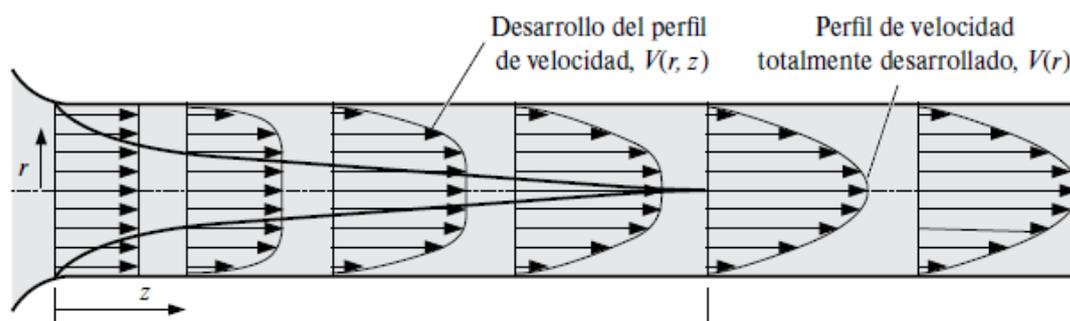


Figura 11. Flujo unidimensional sobre un conducto de sección circular. [5]

**Flujo bidimensional.** En este caso, el flujo ocurre principalmente en dos direcciones, por lo que las propiedades del fluido cambian en un plano, es decir, en dos coordenadas espaciales. Aunque no hay variación significativa en la tercera dirección, esta suele ser despreciada. Este tipo de flujo se encuentra en aplicaciones como el flujo sobre alas de aviones o entre placas planas, donde las partículas del fluido tienen componentes de velocidad tanto en las direcciones horizontales como verticales dentro de un plano.

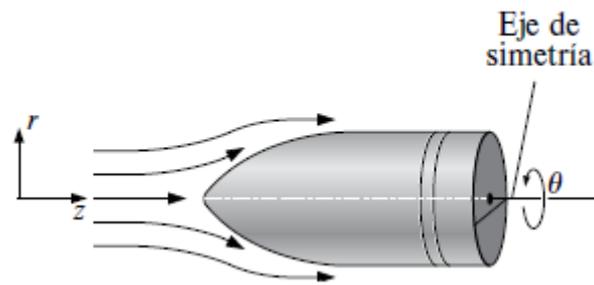


Figura 12. Flujo bidimensional sobre una bala. [5]

**Flujo tridimensional.** En un flujo tridimensional, las partículas del fluido se mueven en las tres direcciones espaciales, por lo que las propiedades del fluido varían en todas las coordenadas. Este tipo de flujo es el más general y se encuentra en situaciones donde el movimiento del fluido es complejo y no se puede simplificar en menos dimensiones, como en turbulencias o en flujos en geometrías complejas, como en el interior de motores o sistemas de ventilación.

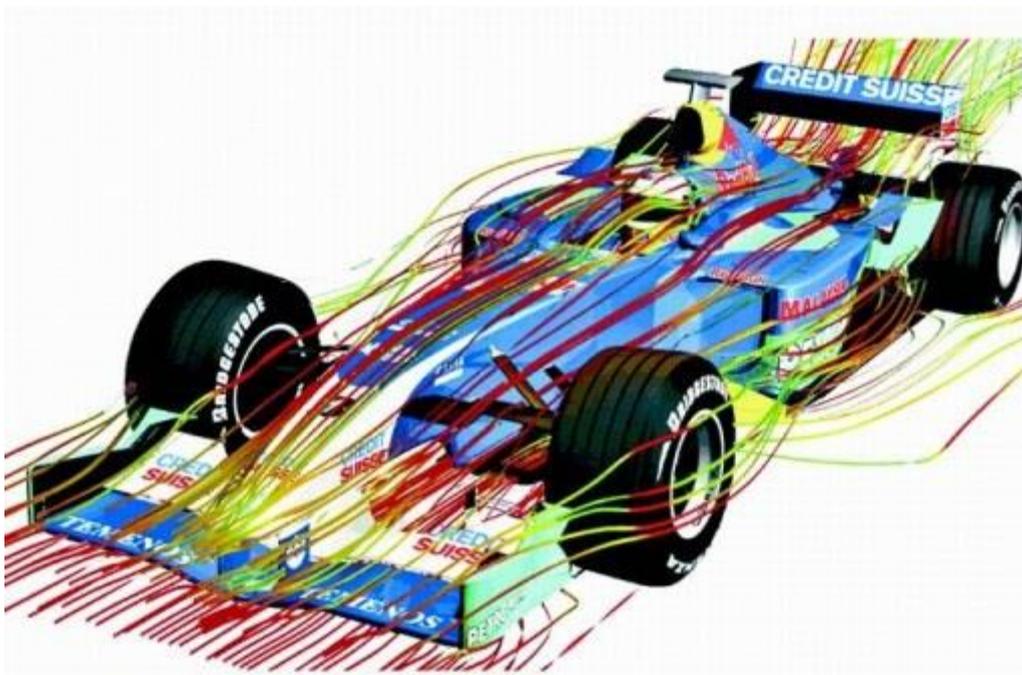


Figura 13. Flujo tridimensional sobre un Fórmula 1. (WordPress)

### 3.3 PRINCIPIO DE BERNOULLI

El principio de Bernoulli, también denominado ecuación de Bernoulli, describe el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una línea de corriente. Fue expuesto por Daniel Bernoulli en su obra Hidrodinámica (1738) y expresa que en un fluido ideal (sin viscosidad ni rozamiento) en régimen de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de su recorrido. [9]. La ecuación de Bernoulli se obtiene de la aproximación de que los efectos viscosos son despreciablemente pequeños en comparación con las fuerzas de inercia, de presión y gravitacionales.

La demostración de la ecuación de Bernoulli parte de la Ley de Conservación de la Energía para un fluido en movimiento. Como se ha descrito anteriormente esta ecuación es válida para flujos incompresibles, estacionarios y no viscosos, es decir, la densidad es constante, las propiedades del flujo no varían con el tiempo y no hay fricción interna en el fluido.

Considérese un pequeño volumen de fluido que se mueve a través de un tubo de corriente. El trabajo realizado por la fuerza debida a la presión en el fluido es:

$$\text{Trabajo} = \text{Fuerza} \cdot \text{Desplazamiento} = P \cdot A \cdot \Delta x$$

Donde  $A$  es el área de la sección transversal y  $\Delta x$  es la distancia recorrida. La fuerza es igual a la presión multiplicada por el área.

El volumen del fluido es  $V = A \cdot \Delta x$ , por lo que el trabajo realizado es:

$$\text{Trabajo} = P \cdot \Delta v$$

Este trabajo se convierte en energía cinética:

$$\text{Energía cinética} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Donde  $m$  es la masa del fluido. Dado que  $m = \rho \cdot \Delta v$

$$\text{Energía cinética} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \Delta v \cdot v^2$$

Además, el fluido también tiene energía potencial gravitatoria dada por:

$$\text{Energía potencial} = m \cdot g \cdot h = \rho \cdot \Delta v \cdot g \cdot h$$

La conservación de la energía para un volumen de fluido en movimiento implica que la suma de la energía cinética, la energía potencial y la energía debido a la presión debe permanecer constante a lo largo de la corriente del fluido:

$$P_1 \cdot \Delta V + \frac{1}{2} \rho \cdot \Delta V \cdot v_1^2 + \rho \cdot \Delta V \cdot g \cdot h_1 = P_2 \cdot \Delta V + \frac{1}{2} \rho \cdot \Delta V \cdot v_2^2 + \rho \cdot \Delta V \cdot g \cdot h_2$$

Dividiendo  $\Delta V$  por y reorganizando términos:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2$$

Ya que esto debe ser válido en cualquier punto del fluido, podemos generalizarlo como:

$$P + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h = constante$$

La ecuación de Bernoulli demuestra que en un fluido en movimiento sin viscosidad y en flujo estacionario, la suma de la presión, la energía cinética por unidad de volumen, y la energía potencial por unidad de volumen permanece constante a lo largo de una línea de corriente. Esta relación es útil para analizar diversas situaciones en la dinámica de fluidos, como la velocidad del flujo en diferentes puntos de una tubería, la presión en diferentes alturas, entre otras. Observando esta ecuación, queda demostrado que un aumento en la velocidad de un fluido ocurre simultáneamente con una disminución en la presión estática o una disminución en la energía potencial del fluido. Esta afirmación resultará muy útil a la hora de analizar las gráficas de presión y velocidad cuando un vehículo está sometido a la acción de viento frontal adverso.

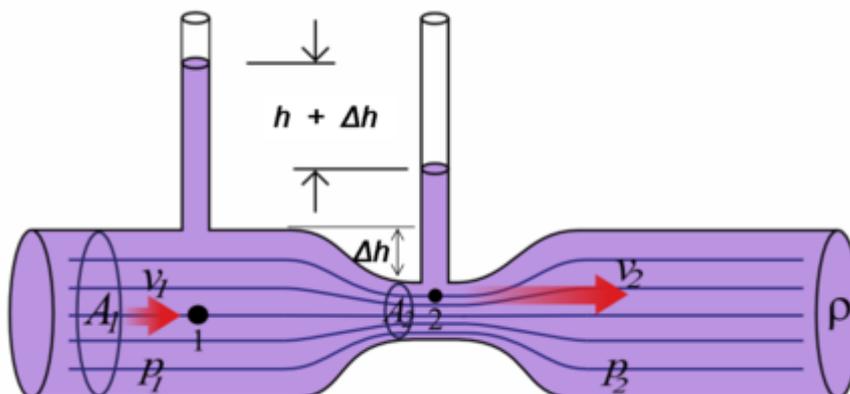


Figura 14. Principio de Bernoulli. (Wikipedia)

---

### 3.4 CAPA LÍMITE

Cuando un fluido se mueve libremente sin obstáculos ni paredes que lo confinen, la velocidad en todos sus puntos es la misma. Sin embargo, cuando entra en contacto con un objeto, en nuestro caso, la carrocería de un vehículo, la velocidad del aire se ve afectada, apareciendo el fenómeno de la capa límite. La capa límite es la región de un fluido cuya velocidad se ve alterada debido a la interacción con un sólido en contacto durante su movimiento. Esta capa es esencial para entender cómo el fluido interactúa con la superficie y afecta la resistencia y la sustentación. En esta zona, el efecto de la viscosidad del fluido es significativo. El aire posee una cierta viscosidad. Esta viscosidad genera fuerzas de rozamiento al entrar en contacto con la superficie del vehículo, provocando que la velocidad del fluido sobre la superficie sea nula (o que tenga la misma velocidad que el vehículo y la velocidad relativa entre ambos sea nula). Como a una cierta distancia del vehículo, la velocidad del aire sigue siendo la que tenía antes de entrar en contacto con él se crea una zona de transición donde el flujo va aumentando su velocidad, desde 0 en la superficie hasta la velocidad inicial del aire en la zona no afectada [10]. En la figura 15 se adjunta el perfil de velocidades sobre la capa límite.

La capa límite contribuye a la resistencia aerodinámica debido al aumento de la fricción entre el fluido y la superficie. En flujos turbulentos, la capa límite puede incrementar la resistencia debido a la mayor viscosidad efectiva y al mayor arrastre de fricción. Cuando el flujo en la capa límite se desacelera y eventualmente se separa de la superficie, se crea una región de flujo recirculante o de baja presión llamada "zona de separación". Esta separación puede causar un aumento en la resistencia y una disminución en la sustentación, afectando negativamente el rendimiento del ala o del cuerpo del vehículo.

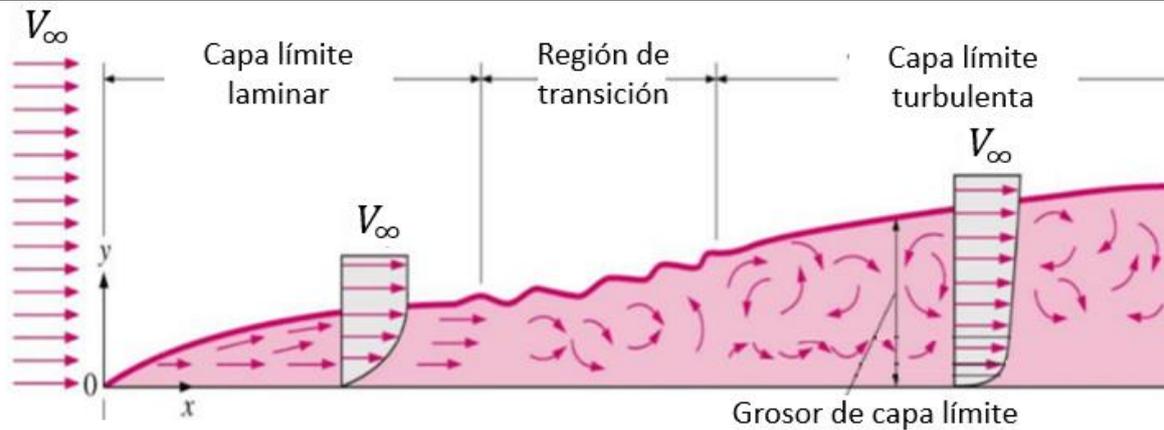


Figura 15. Perfil de velocidades sobre la capa límite

La relevancia de la capa límite se debe a que es en esta zona donde se manifiestan los efectos de la viscosidad del fluido. Cuando los ingenieros diseñan los paquetes aerodinámicos deben plantearse qué tipo de flujo se encontrarán en cada parte del monoplaza. En la zona delantera, salvo en condiciones de aire sucio, el aire será laminar, por lo que se buscará aprovechar sus características. Sin embargo, en otras zonas (como en los pontones) puede que se busque generar un flujo turbulento, para mantenerlo adherido al monoplaza durante la máxima distancia posible y conducirlo hacia el difusor, reduciendo la resistencia de forma. [11]

### 3.4.1 NÚMERO DE REYNOLDS

El número de Reynolds es un valor adimensional que se calcula como el cociente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas presentes en el fluido. Se utiliza para caracterizar el movimiento de un fluido. En el flujo laminar, este cociente es pequeño debido a viscosidad alta y velocidades bajas; sin embargo, en un flujo turbulento, el número de Reynolds es mayor debido a las altas velocidades y la baja viscosidad. Matemáticamente, se calcula como:

$$Re = \frac{\rho \cdot v_\infty \cdot L_c}{\mu}$$

Donde:

Re es el número de Reynolds

$\rho$  es la densidad del fluido ( $\text{kg/m}^3$ )

$v_\infty$  es la velocidad inicial del fluido o velocidad en el infinito (m/s)

---

$L_c$  es la longitud característica del sólido a estudio (m).

$\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )

Como se ha comentado anteriormente, dependiendo de los valores que adopte el número de Reynolds se puede determinar el régimen de movimiento del fluido, es decir, si se comporta como un flujo laminar o turbulento, o si se encuentra en la zona de transición entre ambos flujos.

- $Re < 2000$ : región laminar
- $2000 < Re < 4000$ : región crítica
- $Re > 4000$ : región turbulenta

En números de Reynolds altos, interesa tener una mayor capa límite laminar para obtener un coeficiente de fricción más bajo porque, al pasar a una capa límite turbulenta manteniendo los mismos parámetros de estudio, el coeficiente de fricción aumenta notablemente provocando un aumento en la resistencia del aire [5].

### 3.5 AERODINÁMICA

La aerodinámica aplicada a vehículos se refiere al estudio y optimización del flujo de aire alrededor de un automóvil, con el objetivo de mejorar su rendimiento y eficiencia. En este campo, se analizan factores clave como las fuerzas de arrastre (drag) y sustentación, que determinan cómo el aire interactúa con la superficie del vehículo y afecta su estabilidad y consumo de energía. Para cuantificar estos efectos, se utilizan coeficientes aerodinámicos, que permiten evaluar la resistencia del vehículo al avance y su capacidad para mantenerse estable a altas velocidades. Un diseño aerodinámico optimizado busca reducir la resistencia al avance y mejorar la eficiencia, minimizando el esfuerzo del motor y reduciendo el consumo de combustible.

Durante este análisis, es esencial estudiar el comportamiento del flujo de aire, que puede ser laminar o turbulento. Un flujo laminar es suave y ordenado, mientras que el turbulento es caótico y genera mayor resistencia. Además, fenómenos como los vórtices y turbulencias en las partes traseras o bordes del vehículo generan una mayor resistencia al avance, afectando tanto la eficiencia como la estabilidad del vehículo. A través de un diseño aerodinámico eficiente, se puede minimizar esta

---

resistencia y mejorar el rendimiento del vehículo, logrando un equilibrio entre velocidad, control y consumo energético, cruciales tanto en autos deportivos como en vehículos de transporte cotidiano.

### 3.5.1 FUERZAS DE ARRASTRE Y SUSTENTACIÓN

Un fluido en movimiento ejerce fuerzas de presión perpendiculares a la superficie del vehículo y fuerzas de corte tangenciales debido a la condición de no-deslizamiento, ocasionadas por los efectos de la fricción (viscosidad). La componente resultante de las fuerzas de presión y de corte que actúa en la dirección del flujo se conoce como fuerza de arrastre ( $F_D$ ), mientras que la componente resultante que actúa en dirección perpendicular al flujo se denomina fuerza de sustentación ( $F_L$ ) [7]. La fuerza de sustentación es una fuerza aerodinámica que actúa perpendicular al flujo de aire y puede influir significativamente en la estabilidad y rendimiento de los vehículos. En los automóviles, esta fuerza se manipula para generar downforce, que es fuerza de sustentación negativa, es decir, presiona el vehículo hacia el suelo, mejorando la tracción y el manejo, especialmente en vehículos de alto rendimiento como los coches de carreras. La correcta gestión de la sustentación es esencial para equilibrar la tracción y la resistencia aerodinámica, optimizando tanto la seguridad como la eficiencia del vehículo.

**Fuerza de arrastre.** Es la resistencia que un fluido (en este caso, el aire) ejerce sobre un objeto en movimiento. Esta fuerza actúa en la dirección opuesta al movimiento del vehículo y se calcula:

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 [N]$$

Donde:

$F_d$  es la fuerza de arrastre.

$C_d$  es el coeficiente de arrastre, que depende de la forma del objeto y del tipo de flujo.

$\rho$  es la densidad del fluido en el que se mueve el objeto ( $\text{kg/m}^3$ ).

$A$  es el área de referencia proyectada en dirección perpendicular a la corriente ( $\text{m}^2$ ) (área frontal del objeto).

---

$v$  es la velocidad relativa del objeto respecto al fluido (m/s).

El coeficiente de arrastre  $C_d$  es un valor adimensional que describe la resistencia que un objeto experimenta debido al flujo de un fluido a su alrededor, como el aire o el agua. Es un factor clave en la ecuación de la fuerza de arrastre y depende principalmente de la forma y la superficie del objeto, así como de las características del flujo (como si es laminar o turbulento). Los aviones y coches deportivos tienen un  $C_d$  bajo, comprendido típicamente entre 0,1 y 0,3.

**Fuerza de sustentación.** La fuerza de sustentación, también conocida como lift, es una fuerza aerodinámica que actúa perpendicularmente a la dirección del flujo de aire alrededor de un objeto en movimiento. Aunque esta fuerza es más comúnmente asociada con las alas de los aviones, también juega un papel importante en la aerodinámica de los vehículos terrestres, donde puede tener tanto efectos beneficiosos como perjudiciales. La fuerza de sustentación es generada por la diferencia de presión entre la parte superior e inferior de un objeto, como un ala, alerón, o la carrocería de un automóvil, cuando el aire fluye sobre su superficie. Esta fuerza actúa en dirección perpendicular al flujo de aire y, como se ha descrito anteriormente, se busca que esté dirigida hacia abajo en los vehículos, para presionarlos hacia el suelo y reducir la distancia respecto de su baricentro, disminuyendo por tanto, las fuerzas inerciales y mejorando el agarre.

Según el principio de Bernoulli, un aumento en la velocidad del aire sobre una superficie reduce la presión en esa superficie. En el caso de las alas de un avión, la curvatura del ala hace que el aire fluya más rápido sobre la parte superior que sobre la inferior, creando una diferencia de presión que genera sustentación hacia arriba. En los vehículos, un alerón o un difusor se puede diseñar para utilizar este mismo principio, pero invirtiendo el efecto para generar downforce, o fuerza de sustentación negativa, que presiona el vehículo hacia el suelo para mejorar la tracción. Matemáticamente, la fuerza de sustentación se define como:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \text{ [N]}$$

Donde:

$F_L$  es la fuerza de sustentación

$C_L$  es el coeficiente de sustentación, un valor adimensional que depende de la forma y el ángulo de ataque del objeto

$\rho$  es la densidad del aire ( $\text{kg/m}^3$ ).

$u$  es la velocidad del vehículo respecto al aire (m/s).

$A$  es el área de referencia del objeto ( $\text{m}^2$ ).

La fuerza de sustentación es una fuerza aerodinámica que actúa perpendicular al flujo de aire y puede influir significativamente en la estabilidad y rendimiento de los vehículos. En los automóviles, esta fuerza se manipula para generar downforce, mejorando la tracción y el manejo, especialmente en vehículos de alto rendimiento como los autos de carrera. La correcta gestión de la sustentación es esencial para equilibrar la tracción y la resistencia aerodinámica, optimizando tanto la seguridad como la eficiencia del vehículo.

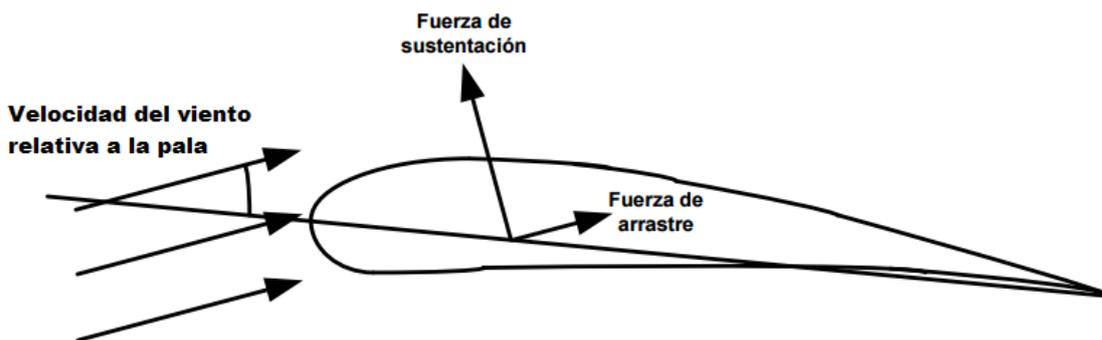


Figura 16. Esfuerzos aerodinámicos sobre el ala de un avión. (WordPress)

### 3.5.2 ARRASTRE DEBIDO A FRICCIÓN Y PRESIÓN

El arrastre debido a la fricción superficial y presión es debido a la actuación de las fuerzas resistivas que un perfil aerodinámico presenta cuando se mueve en el seno de un fluido.

El arrastre o resistencia por fricción superficial es una tipología de resistencia aerodinámica, que es debida a los efectos de la viscosidad de los fluidos, provocando un cambio en el régimen de movimiento del flujo, generalmente provocando una transición de flujo laminar a turbulento a medida que el fluido avanza sobre las paredes de los perfiles aerodinámicos. Esta resistencia es función del número de Reynolds. El número de Reynolds es inversamente proporcional a la viscosidad del

fluido. En consecuencia, la contribución de fricción al arrastre total en cuerpos romos es menor a números de Reynolds altos y puede ser despreciable para números de Reynolds muy altos. [7]. El coeficiente por resistencia superficial se define como:

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2}$$

Donde:

$C_f$  es el coeficiente de fricción superficial

$\tau_w$  es la tensión cortante en la superficie del objeto

$\rho$  es la densidad del flujo antes de interactuar con el objeto (corriente libre)

$v$  es la densidad del flujo antes de interactuar con el objeto (corriente libre)

El flujo sobre un objeto puede comenzar como flujo laminar. A medida que el fluido fluye sobre la superficie, la tensión cortante en el fluido ralentiza las partículas de fluido adicionales, lo que hace que la capa límite aumente de espesor. En algún punto aguas abajo, el flujo se vuelve inestable y turbulento. La turbulencia crea patrones de flujo irregulares y pulsantes, que se observan en la formación de vórtices o remolinos. A medida que crece la capa turbulenta, el espesor de la capa laminar disminuye. Esto da como resultado una capa límite más delgada en el flujo laminar, lo que reduce la cantidad de fricción cuando el fluido pasa por el objeto en comparación con el flujo laminar.

El arrastre debido a la presión es proporcional a la sección transversal frontal del objeto y a la diferencia de presiones entre la parte frontal y trasera del objeto. En consecuencia, el arrastre debido a presión usualmente domina para cuerpos romos, y es pequeño para cuerpos curvilíneos. Esta presión diferencial es provocada por el fenómeno separación del flujo de fluido, lo que genera una diferencia de presión alrededor del objeto, aumentando de esta forma la resistencia aerodinámica [5]. Matemáticamente, el coeficiente de arrastre debido a la presión se define como:

$$C_p = \frac{F_p}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2}$$

Donde:

---

$C_p$  es el coeficiente de arrastre debido a la presión

$F_p$  es la fuerza inducida debido a la diferencia de presiones delantera y trasera

$\rho$  es la densidad del flujo antes de interactuar con el objeto (corriente libre)

$v$  es la densidad del flujo antes de interactuar con el objeto (corriente libre)

### 3.5.3 REDUCCIÓN DEL ARRASTRE MEDIANTE DISEÑO AERODINÁMICO

La reducción de la resistencia del diseño aerodinámico del coche se basa en el flujo de aire alrededor de su superficie. Al diseñar la estructura de un vehículo, se trata de priorizar el flujo laminar, donde el aire fluye en capas suaves y paralelas, reduciendo la resistencia hacia adelante. Esto es muy importante porque cuando el flujo se vuelve turbulento, la resistencia aumenta debido a la mezcla caótica de las partículas de aire. En este caso, el número de Reynolds es un parámetro esencial porque determina la transición entre flujo laminar y turbulento en función de la velocidad del vehículo, la densidad del aire y el tamaño del vehículo. Mantener el flujo laminar sobre la mayor parte de la superficie del vehículo reduce la resistencia, que es la resistencia causada por el aire que entra en contacto directamente con la superficie del vehículo.

Otro aspecto importante de la reducción de la resistencia es el control de la separación del flujo. A medida que el aire se mueve sobre la superficie del vehículo, la capa límite (es decir, la fina capa de aire en contacto directo con la carrocería del vehículo) puede separarse, creando turbulencias y aumentando la resistencia si el diseño no se optimiza. Esto ocurre cuando el flujo laminar se vuelve inestable y turbulento, especialmente en zonas donde la geometría del vehículo cambia repentinamente (por ejemplo, en la parte trasera). El objetivo de un buen diseño aerodinámico es retrasar esta separación para que el flujo de aire permanezca en la superficie el mayor tiempo posible, reduciendo los vórtices y la resistencia [5].

Además, en algunos vehículos, como los deportivos y los aviones, el diseño se centra no sólo en la reducción de la resistencia sino también en el control de la elevación. En un avión, crear sustentación es fundamental, pero en un automóvil deportivo, también es importante controlar la sustentación para que el vehículo se adhiera al suelo a altas velocidades y no despegue. Esto se logra mediante el uso de spoilers y difusores que manipulan el flujo de aire para crear fuerzas aerodinámicas que mejoran

---

la estabilidad y el manejo al tiempo que reducen la resistencia. Por lo tanto, un diseño aerodinámico eficaz puede mejorar la eficiencia y el rendimiento del vehículo al equilibrar la reducción de la resistencia con la necesidad de generar o controlar la sustentación.

### **3.5.4 EFICIENCIA AERODINAMICA**

La eficiencia aerodinámica de un vehículo es un aspecto clave de su diseño, ya que afecta directamente a su consumo energético y a su rendimiento a alta velocidad. Esta eficiencia se mide principalmente por el coeficiente de resistencia ( $C_d$ ), que mide la resistencia del aire que encuentra un vehículo en movimiento. Un coeficiente de resistencia bajo significa que el automóvil encuentra menos resistencia, lo que significa menos consumo de combustible y mejor rendimiento. El diseño de la carrocería juega un papel vital a la hora de reducir este coeficiente, optimizando la forma para reducir la resistencia y manteniendo el flujo de aire lo más laminar posible. El número de Reynolds es el principal parámetro de la mecánica de fluidos que determina el tipo de flujo alrededor del vehículo: laminar o turbulento. Con números de Reynolds altos (típicos de vehículos en movimiento), el flujo puede volverse turbulento, aumentando la resistencia debido al aumento de la fricción y la resistencia. La aerodinámica eficiente está diseñada para mantener el flujo laminar sobre la mayoría de las superficies del vehículo, reduciendo así la fricción y retrasando la separación del flujo, evitando la formación de remolinos que aumentan la resistencia. Además de reducir la resistencia, el control de elevación también es importante en vehículos de alto rendimiento como los deportivos. Aunque la sustentación es necesaria para volar en un avión, demasiada sustentación en un vehículo terrestre puede desestabilizar el vehículo. Por ello, elementos como spoilers y difusores se utilizan para crear fuerzas que empujan el vehículo contra el suelo, aumentando así su estabilidad sin aumentar significativamente la resistencia. En general, la eficiencia aerodinámica de un vehículo es un delicado equilibrio entre minimizar la resistencia y optimizar la estabilidad y el control a alta velocidad.

---

### 3.5.5 VÓRTICES

Los vórtices en aerodinámica son estructuras giratorias de aire que se forman cuando hay una diferencia en la presión del aire que fluye sobre y debajo de una superficie, como un alerón o una esquina de un coche. En el contexto de un automóvil, los vórtices suelen generarse en los bordes afilados de la carrocería o alrededor de los alerones, donde el flujo de aire se separa y comienza a girar de manera turbulenta. Estos vórtices pueden tener efectos tanto positivos como negativos en el rendimiento aerodinámico del vehículo. Por un lado, pueden contribuir a mejorar la estabilidad y el manejo al generar fuerzas aerodinámicas que aumentan el agarre del vehículo al suelo. Sin embargo, también pueden aumentar la resistencia al avance (fuerza de arrastre), lo que reduce la eficiencia energética y la velocidad máxima del coche.

En el diseño aerodinámico de un coche, el control y la manipulación de estos vórtices es crucial. Los ingenieros utilizan dispositivos como difusores, aletas y alerones para dirigir el flujo de aire de manera que los vórtices se formen de manera controlada, minimizando su impacto negativo. Por ejemplo, al gestionar la posición y la intensidad de los vórtices, es posible reducir la separación del flujo en la parte trasera del coche, lo que disminuye el arrastre por presión. Asimismo, ciertos diseños pueden aprovechar los vórtices para mejorar la refrigeración de componentes clave o para aumentar la sustentación negativa (downforce), lo que mejora el desempeño del coche a altas velocidades.



Figura 17. Vórtices en la estela del alerón trasero en un F1. (Motorsport)

### 3.5.6 AHMED BODY

El Ahmed Body fue desarrollado inicialmente por S.R. Ahmed en 1984, como parte de su investigación titulada "Algunas características destacadas de la estela del vehículo promediada en el tiempo". Desde su creación, este modelo se ha convertido en un estándar ampliamente reconocido y utilizado en la industria automotriz, especialmente en el campo de la aerodinámica. La importancia del Ahmed Body radica en su capacidad para servir como un caso de referencia fundamental para la validación de herramientas de simulación, particularmente en el área de la dinámica de fluidos computacional (CFD).

El modelo del Ahmed Body, aunque simplificado, reproduce con notable precisión algunos de los comportamientos aerodinámicos más críticos que se observan en los vehículos reales, como la separación del flujo y la formación de vórtices. Esta capacidad lo ha convertido en una herramienta esencial no solo para la investigación académica, sino también para aplicaciones industriales, donde se utiliza para evaluar y mejorar el rendimiento aerodinámico de los automóviles. Sus dimensiones son:

---

longitud de 1,044 metros, altura de 0,288 metros y ancho de 0,389 metros, es decir, aproximadamente se corresponde con un vehículo a escala 1:4.

En la práctica, el Ahmed Body permite a ingenieros y científicos probar y perfeccionar métodos de simulación CFD y realizar experimentos controlados en túneles de viento. Su diseño estandarizado y la abundancia de datos experimentales disponibles hacen que sea un modelo confiable para comparar resultados y asegurar que las herramientas de simulación utilizadas en la industria automotriz sean precisas y efectivas. A pesar de omitir una serie de elementos característicos de un automóvil real, como las ruedas, la superficie inferior rugosa, los retrovisores, las protecciones y otras proyecciones de superficie, el Ahmed Body logra reproducir las características fundamentales del flujo de aire alrededor de un vehículo que son esenciales para su estudio. En particular, el modelo permite observar cómo el flujo impacta y se desplaza alrededor de la carrocería, mantiene un flujo relativamente uniforme en la zona media, y se separa en la parte trasera, donde se generan vórtices. Estos fenómenos son cruciales para comprender el comportamiento aerodinámico de un automóvil.

La inclinación de la parte trasera del Ahmed Body, también conocida como "slant angle", es una característica clave en el estudio de la aerodinámica de este modelo. Esta inclinación se refiere al ángulo formado por la parte posterior del cuerpo del Ahmed Body con respecto a la horizontal, y tiene un impacto significativo en el comportamiento del flujo de aire y en la resistencia aerodinámica generada. Cuando la inclinación es leve ( $<25^\circ$ ), el flujo de aire tiende a permanecer adherido a la superficie trasera, lo que resulta en una menor separación del flujo y, por lo tanto, en una menor resistencia aerodinámica. Esto suele generar un flujo relativamente suave y una menor cantidad de vórtices. A medida que el ángulo de inclinación aumenta, la probabilidad de separación del flujo también aumenta. En este rango, el flujo de aire comienza a separarse en la parte trasera, generando una zona de recirculación y vórtices que incrementan la resistencia aerodinámica. Este fenómeno es crucial para estudiar la formación de la estela detrás del vehículo. En nuestro modelo hemos introducido un ángulo de inclinación de  $25^\circ$ , por lo que estaremos ante un caso de flujo tridimensional junto con la formación de vórtices en su estela.

A lo largo de los años, el Ahmed Body ha mantenido su relevancia y continúa siendo una referencia indispensable para el desarrollo y la validación de nuevas tecnologías aerodinámicas en la industria automotriz.

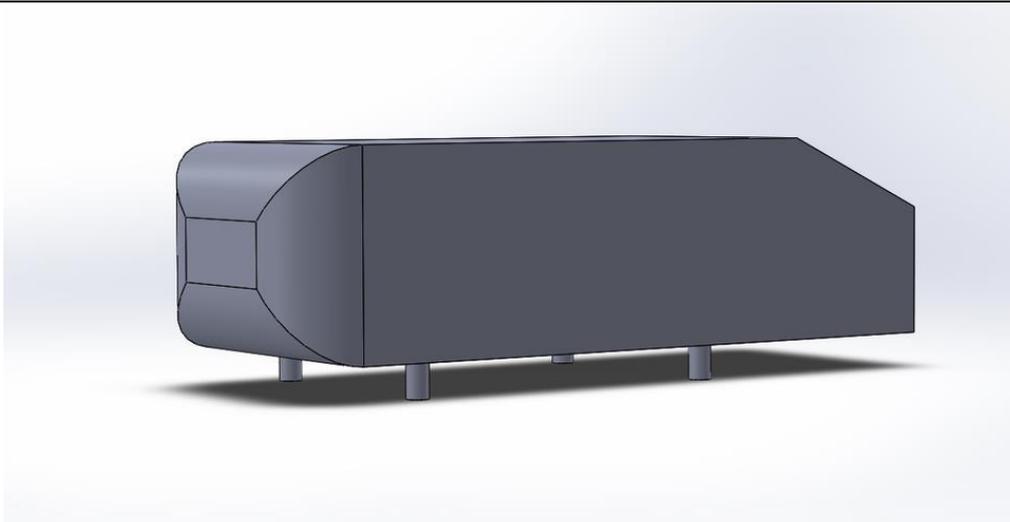


Figura 18. Ahmed Body. (GrabCAD)

### 3.6 TURBULENCIA

En la simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD), los modelos de turbulencia son fundamentales para predecir el comportamiento de flujos complejos, donde las fluctuaciones caóticas y tridimensionales del flujo son predominantes. Estos modelos permiten simplificar la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes para representar las características promedio del flujo turbulento, ya sea mediante promediado en el tiempo, en el espacio o por el uso de ecuaciones adicionales para capturar la dinámica de los vórtices. La elección del modelo de turbulencia adecuado depende de factores como la naturaleza del flujo, la precisión requerida y la capacidad computacional disponible, dado que cada modelo ofrece un equilibrio distinto entre exactitud y costo computacional [12].

Entre los enfoques más comunes se encuentran los modelos de Promediado de Reynolds (RANS), que son ampliamente utilizados por su eficiencia computacional, aunque pueden ser menos precisos en capturar detalles finos del flujo. Por otro lado, la Simulación de Vórtices Grandes (LES) y la Simulación Directa de Navier-Stokes (DNS) proporcionan un mayor nivel de detalle al modelar directamente las estructuras turbulentas grandes y todas las escalas del flujo, respectivamente, aunque a un costo computacional mucho mayor. Los modelos híbridos, como DES (Detached Eddy Simulation), combinan lo mejor de ambos mundos al emplear RANS en zonas de flujo

---

estable y LES en regiones turbulentas, optimizando la precisión sin comprometer excesivamente los recursos [12].

### 3.6.1 MODELO k- $\epsilon$ REALIZABLE

El modelo de turbulencia k- $\epsilon$  realizable es una variante del popular modelo de turbulencia k- $\epsilon$  (k-epsilon) utilizado en simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) para predecir el comportamiento de flujos turbulentos. El término "realizable" se refiere a ciertas mejoras y modificaciones en la formulación del modelo que permiten que las predicciones sean más físicamente realistas y precisas en una variedad más amplia de condiciones de flujo.

El modelo de turbulencia k-epsilon realizable es una opción preferida en simulaciones de CFD debido a su equilibrio entre precisión y costo computacional, especialmente en flujos complejos donde la turbulencia juega un papel clave. En comparación con el modelo estándar k-epsilon, la versión realizable ofrece mejoras significativas en la predicción de flujos que involucran separación del flujo, como los que se encuentran alrededor de cuerpos con curvaturas pronunciadas o bordes afilados. Esto se debe a su formulación mejorada de la viscosidad turbulenta y a la corrección en la ecuación de transporte de la disipación, lo que lo hace más adecuado para describir con precisión fenómenos como la recirculación o los cambios abruptos en la geometría del flujo. Asimismo, este modelo se comporta de manera más efectiva en flujos con altas velocidades angulares, como los observados en turbinas o hélices, permitiendo capturar de mejor forma los efectos giroscópicos y rotacionales del flujo. La estabilidad numérica también es superior a la del modelo estándar, lo que lo convierte en una herramienta confiable para simulaciones de gran escala o problemas donde la complejidad del flujo puede hacer que otros modelos resulten inestables o generen resultados no físicos [12].

Además, el modelo k-epsilon realizable es ampliamente utilizado en flujos de alto número de Reynolds, lo que lo hace particularmente adecuado para aplicaciones industriales como el diseño aerodinámico de vehículos, aviones o sistemas HVAC. Aunque existen modelos más avanzados como LES (Large Eddy Simulation) o k-omega SST, el k-epsilon realizable tiene la ventaja de ser menos costoso computacionalmente, permitiendo obtener resultados rápidos y precisos sin

---

comprometer recursos, lo cual es esencial en proyectos con limitaciones de tiempo o presupuesto. También es más eficiente para predecir las tensiones de Reynolds y las interacciones cercanas a las superficies, lo que es crucial para una simulación precisa de la fricción y transferencia de energía en capas límite turbulentas. En resumen, el modelo realizable se destaca por su adaptabilidad a una amplia gama de flujos y su capacidad para manejar con eficacia tanto separaciones como recirculaciones, lo que lo convierte en una elección confiable y versátil en múltiples campos de la ingeniería y el diseño industrial [12].

Es por estas características que hemos decidido utilizar el modelo de turbulencia k- $\epsilon$  realizable para la simulación aerodinámica en ANSYS Fluent. Este modelo es adecuado para representar de manera precisa los flujos turbulentos que se encuentran comúnmente en las aplicaciones automotrices, especialmente en situaciones con separación de flujo, vórtices y gradientes de presión elevados. Además, el modelo k- $\epsilon$  realizable es reconocido por su robustez y capacidad para predecir con mayor exactitud la resistencia y los efectos aerodinámicos en geometrías complejas, lo que lo convierte en una opción ideal para optimizar el rendimiento aerodinámico de los vehículos.

### **3.7 CINEMÁTICA DE FLUIDOS**

La cinemática de fluidos es la rama de la mecánica de fluidos que se enfoca en describir el movimiento de los fluidos sin considerar las fuerzas que lo provocan. Este estudio analiza parámetros como la velocidad, la aceleración y la trayectoria de las partículas fluidas, permitiendo entender cómo se desplazan en diferentes regímenes de flujo, ya sea laminar o turbulento. La cinemática de fluidos es esencial para modelar fenómenos como el flujo alrededor de superficies aerodinámicas, y proporciona las bases para resolver problemas relacionados con la distribución de velocidades, deformaciones y la continuidad del fluido en diversas aplicaciones.

#### **3.7.1 DESCRIPCIÓN LAGRANGIANA Y EULERIANA**

En mecánica de fluidos, la descripción de cómo se comporta y se mueve un fluido puede abordarse mediante dos enfoques fundamentales: la descripción lagrangiana

---

y la euleriana. La descripción lagrangiana sigue el movimiento de partículas individuales de fluido a lo largo del tiempo, rastreando sus trayectorias y cambios en sus propiedades como velocidad, presión y temperatura. Este enfoque es útil para comprender el comportamiento detallado de partículas específicas y es análogo a seguir el camino de una boya en el océano. Sin embargo, debido a la complejidad de rastrear un gran número de partículas, este enfoque puede ser computacionalmente costoso en sistemas más grandes [5].

Por otro lado, la descripción euleriana se centra en observar y analizar las propiedades del fluido en puntos fijos del espacio dentro de un volumen finito, denominado volumen de control, sin seguir las partículas individuales. En este marco, se estudian cómo varían parámetros como la velocidad, la presión o la densidad en una ubicación específica a medida que el fluido fluye a través de ella. Este enfoque es más adecuado para problemas de flujo continuo y es comúnmente utilizado en la mayoría de los estudios de dinámica de fluidos, incluyendo simulaciones CFD. La descripción euleriana permite analizar el flujo de manera más global, facilitando la resolución de problemas complejos en grandes volúmenes de fluido [5].

La descripción euleriana en mecánica de fluidos se relaciona directamente con el funcionamiento de un túnel de viento, una herramienta crucial para estudiar y analizar el comportamiento del flujo de aire alrededor de objetos como automóviles, aviones o edificios. En un túnel de viento, el aire se mueve a través de una sección de prueba fija, y los ingenieros miden cómo el flujo de aire interactúa con el objeto colocado dentro del túnel. Desde la perspectiva euleriana, se enfoca en analizar las propiedades del flujo de aire (como la velocidad, presión y densidad) en puntos específicos alrededor del objeto en lugar de seguir partículas individuales de aire.

Este enfoque es ideal en un túnel de viento porque permite obtener un mapa detallado de cómo el flujo de aire varía en diferentes puntos fijos alrededor del objeto. Por ejemplo, los sensores colocados en varias posiciones dentro del túnel pueden registrar cómo la velocidad del aire y la presión cambian a medida que el flujo interactúa con el automóvil, lo que ayuda a identificar áreas de alta resistencia (fuerza de arrastre) o zonas de separación del flujo. Estos datos son fundamentales para optimizar el diseño aerodinámico del objeto, mejorando su rendimiento y eficiencia al reducir la resistencia al avance y mejorar la sustentación o el downforce en el caso de vehículos de alto rendimiento.

### 3.7.2 CAMPOS DE PRESIONES, VELOCIDADES Y ACELERACIONES

En la descripción euleriana de la mecánica de fluidos, los campos de velocidad, presión y aceleración son funciones que describen cómo estas propiedades varían en el espacio y el tiempo en puntos fijos a medida que el fluido fluye a través de ellos. Estos campos describen el comportamiento de un fluido en términos de cómo sus propiedades (velocidad, presión y aceleración) varían en posiciones fijas a lo largo del tiempo, proporcionando una visión global del flujo desde la perspectiva de un observador estático.

El campo de velocidad es una función vectorial que asigna a cada punto en el espacio una velocidad específica del fluido en ese punto y momento. En la descripción euleriana, no se sigue a una partícula individual, sino que se observa cómo la velocidad del fluido cambia en una posición fija.

Matemáticamente, el campo de velocidad se expresa como:

$$\vec{v}(x, y, z, t) = u(x, y, z, t)\vec{i} + v(x, y, z, t)\vec{j} + w(x, y, z, t)\vec{k}$$

donde:

$u, v, w$  son las componentes de la velocidad en las direcciones  $x, y, z$

$i, j, k$  son los vectores unitarios en las direcciones correspondientes

$t$  es el tiempo.

El campo de presión es una función escalar que describe la distribución de presión en el fluido en diferentes puntos del espacio y en distintos momentos del tiempo. En la descripción euleriana, se observa cómo la presión varía en un punto fijo en el espacio. Este campo es crucial para determinar las fuerzas que actúan sobre elementos del fluido y las superficies sumergidas, ya que la variación espacial de la presión genera gradientes de presión que impulsan el movimiento del fluido. La presión puede depender de las coordenadas espaciales y el tiempo, y se expresa como:

$$P = P(x, y, z, t)$$

El campo de aceleración es una función vectorial que describe cómo la aceleración del fluido varía en el espacio y el tiempo. Este campo indica la tasa de cambio de la

---

velocidad del fluido en un punto fijo. La aceleración en un punto dado se relaciona con la derivada temporal del campo de velocidad y puede expresarse como:

$$a(x, y, z, t) = \frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v$$

Como se puede observar, la expresión de la aceleración en un fluido se divide en dos términos principales: la aceleración local y la aceleración convectiva. La aceleración local se refiere a la tasa de cambio temporal de la velocidad del fluido en un punto fijo y solo es relevante en flujos no estacionarios, donde la velocidad cambia con el tiempo en un punto específico. Por otro lado, la aceleración convectiva describe cómo cambia la velocidad del fluido a medida que se mueve a través del campo de flujo, y puede ser diferente de cero incluso en flujos estacionarios, donde el campo de velocidad no cambia con el tiempo, pero el fluido en movimiento puede experimentar variaciones en su velocidad debido a su posición en el campo de flujo [5].

### 3.7.3 GRÁFICAS DE FLUJOS

El objetivo primordial de este proyecto radica en llevar a cabo un análisis exhaustivo de las diversas gráficas de flujo resultantes, tales como las de velocidad, presión, y turbulencia, obtenidas tras la simulación del túnel de viento aplicada a nuestros automóviles, utilizando para ello la dinámica de fluidos computacional. A fin de proporcionar una comprensión clara y detallada del alcance de dicho análisis, procederemos a describir en los párrafos siguientes los distintos tipos de gráficas que serán objeto de examen posterior. Estas gráficas representan aspectos críticos del comportamiento aerodinámico de los vehículos, y su estudio es fundamental para optimizar el rendimiento y la eficiencia de los diseños automotrices [5].

#### Gráficas de perfiles

Las gráficas de perfiles en el contexto de la mecánica de fluidos son representaciones visuales que muestran cómo varían ciertas propiedades escalares del fluido (como la velocidad, presión, temperatura, o turbulencia) a lo largo de una dirección o sección específica dentro de un flujo. Estas gráficas son esenciales para analizar y comprender el comportamiento del fluido en situaciones particulares, como en el flujo a través de una tubería, alrededor de un objeto aerodinámico, o dentro de un túnel de

viento. En aerodinámica vehicular, la gráfica de perfil de mayor utilidad y que aporta más información a los ingenieros es la gráfica de velocidad [5].

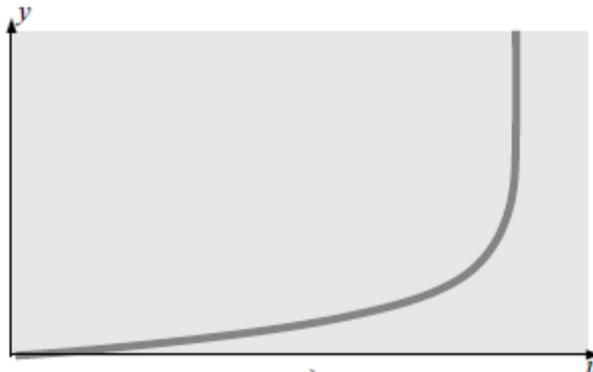


Figura 19. Gráfica de perfil de velocidad. [5]

### **Gráficas vectoriales**

Una gráfica vectorial en el contexto de la aerodinámica es una representación visual que muestra un patrón en la dirección y magnitud de las fuerzas o velocidades del flujo de aire alrededor de un perfil aerodinámico. Estas gráficas utilizan vectores (flechas) para indicar tanto la dirección en que se mueve el fluido como la intensidad de ese movimiento, lo que permite un análisis detallado del comportamiento del flujo en diferentes regiones. En una gráfica vectorial, cada vector representa la velocidad del aire o la fuerza ejercida en un punto específico alrededor del objeto. La dirección de la flecha muestra hacia dónde se mueve el aire o hacia dónde actúa la fuerza, mientras que la longitud de la flecha indica la magnitud de la velocidad o la fuerza. Suele representar un "campo de flujo", que es una distribución de vectores en un área determinada alrededor de un objeto aerodinámico, como el perfil de un ala, un automóvil, o cualquier otro cuerpo que interactúe con el aire. Esta gráfica, sobre la superficie inferior de un alerón delantero de un coche de competición, los vectores apuntan hacia atrás y ligeramente hacia abajo, indicando un flujo de aire acelerado que contribuye a la generación de sustentación negativa [5].

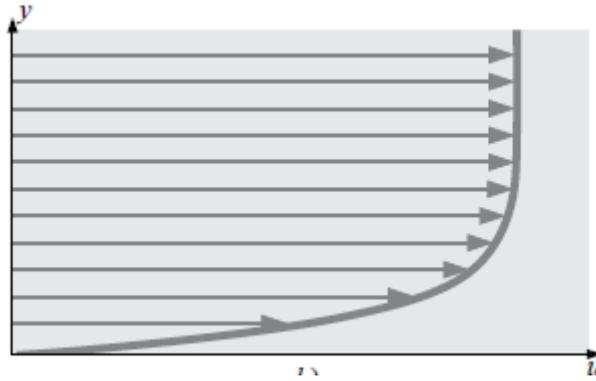


Figura 20. Gráfica vectorial de velocidad. [5]

### Gráficas de contornos

Las gráficas de contornos, también conocidas como mapas de contornos o gráficos de isovalores, son representaciones visuales utilizadas en la mecánica de fluidos para mostrar cómo varía una propiedad escalar del fluido, como la presión, temperatura o velocidad, en un plano o sección del dominio de flujo. Estas gráficas son fundamentales para analizar y comprender la distribución espacial de estas propiedades en todo el campo de flujo. En una gráfica de contornos, se dibujan líneas (conocidas como contornos o isolíneas) que conectan puntos con el mismo valor de la propiedad escalar en cuestión. Por ejemplo, en un campo de presión, una línea de contorno puede conectar todos los puntos donde la presión es constante. Frecuentemente, estas líneas de contorno están acompañadas por un sombreado o gradiente de color que varía según el valor de la propiedad, facilitando la interpretación visual. Por ejemplo, colores más cálidos (rojos, naranjas) pueden representar valores más altos, mientras que colores más fríos (azules, verdes) indican valores más bajos [5].



Figura 21. Gráfica de contornos de presión. [5]

---

## 3.8 ANÁLISIS DIFERENCIAL DEL FLUJO DE FLUIDOS

A continuación, abordaremos las ecuaciones diferenciales fundamentales que rigen el comportamiento de los fluidos, es decir, los principios más esenciales y universales a los cuales se adhieren todos los fluidos, sin excepción. Estas ecuaciones constituyen el fundamento teórico que describe cómo los fluidos se comportan bajo diferentes condiciones y en diversas geometrías [5].

En situaciones simples, donde el flujo es laminar y la geometría del problema es relativamente sencilla, estas ecuaciones pueden ser resueltas de manera directa y sin mayor dificultad. Sin embargo, cuando el flujo presenta características turbulentas, la complejidad del problema aumenta considerablemente. En tales casos, resolver estas ecuaciones de forma exacta se torna extremadamente complicado, lo que obliga a recurrir a soluciones aproximadas y/o métodos numéricos.

En particular, el flujo de aire alrededor de nuestro vehículo estará influenciado por fenómenos turbulentos, lo que nos conducirá a emplear modelos de turbulencia en la dinámica de fluidos computacional (CFD) para abordar adecuadamente el problema y obtener resultados confiables.

Las ecuaciones a las que nos referimos son dos: la ecuación de continuidad, que representa la conservación de la masa, y la ecuación de Navier-Stokes, que se deriva de la segunda ley de Newton aplicada a los fluidos. Estas ecuaciones se aplican en cada punto del campo de flujo, permitiendo así una resolución detallada y precisa del comportamiento del fluido en todo el dominio de estudio. De este modo, es posible capturar las complejidades del flujo, especialmente en situaciones donde la turbulencia juega un papel significativo.

### 3.8.1 ECUACIÓN DE LA CONTINUIDAD

La ecuación de la continuidad es una de las ecuaciones fundamentales en la mecánica de fluidos y se basa en el principio de conservación de la masa. Esta ecuación establece que, para un fluido en movimiento, la masa no se crea ni se destruye dentro de un volumen de control, lo que implica que la cantidad de masa que entra en un volumen determinado debe ser igual a la cantidad de masa que sale, más cualquier cambio en la masa contenida dentro del volumen. En el caso de fluidos

compresibles, la densidad  $\rho$  del fluido puede variar, y la ecuación de continuidad toma la forma más general. Matemáticamente, se denota:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot V) = 0$$

Donde:

$\frac{\partial \rho}{\partial t}$  representa la tasa de cambio de la densidad respecto al tiempo

$\nabla \cdot (\rho \cdot V)$  representa la divergencia del flujo de masa

Cuando el fluido es incompresible, la ecuación de continuidad se puede expresar de manera sencilla como:

$$\nabla \cdot V = 0$$

Aquí,  $\nabla \cdot V$  es la divergencia del campo de velocidades  $v$  y su valor cero indica que el flujo no tiene fuentes ni sumideros.

En términos integrales, para un flujo incompresible en un conducto de sección variable, la ecuación se expresa como:

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$$

Donde  $A_1$  y  $A_2$  son las áreas de las secciones transversales del conducto en dos puntos diferentes, y  $v_1$  y  $v_2$  son las velocidades del fluido en esos puntos. Esta relación muestra que, si el área de la sección transversal del conducto disminuye, la velocidad del fluido debe aumentar para que la masa se conserve.

En la aerodinámica, esta ecuación ayuda a comprender cómo se comporta el flujo de aire alrededor de cuerpos como alas de aviones, automóviles, o edificios. Por ejemplo, cuando el aire fluye sobre el ala de un avión, la velocidad del aire aumenta en la superficie superior, lo que es coherente con la ecuación de continuidad para mantener la masa constante. Sin esta ecuación, no sería posible predecir correctamente cómo los fluidos se comportarán en diferentes escenarios, desde el flujo en una simple tubería hasta el complejo flujo alrededor de un objeto en movimiento.

### 3.8.2 ECUACIÓN DE NAVIER STOKES

La ecuación de Navier-Stokes puede expresarse de diversas maneras dependiendo de las condiciones específicas del flujo del fluido. En nuestro caso, la adaptaremos a las características particulares de nuestro flujo. Consideraremos un fluido incompresible y newtoniano, como el aire, donde asumimos que el esfuerzo cortante es linealmente proporcional a la tasa de deformación cortante. En otras palabras, el tensor de esfuerzo es linealmente proporcional al tensor de la tasa de deformación.

Además, en nuestro análisis, asumimos un flujo incompresible y aproximadamente isotérmico, lo que implica que las variaciones de temperatura son mínimas o inexistentes. Bajo estas condiciones, la ecuación de Navier-Stokes se puede expresar de la siguiente manera:

$$\rho \cdot \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla\vec{P} + \rho \cdot \vec{g} + \mu \cdot \nabla^2\vec{V}$$

Donde:

$\rho$  es la densidad del fluido

$\frac{D\vec{V}}{Dt}$  es la derivada material del campo de velocidad  $v$ , que representa la aceleración total del fluido. Esta derivada combina la aceleración local (cambio de velocidad en un punto fijo) y la aceleración convectiva.

$\nabla\vec{P}$  es el gradiente de presión

$g$  es el vector de aceleración debida a la gravedad.

$\mu \cdot \nabla^2\vec{V}$  es el término de viscosidad, con  $\mu$  siendo la viscosidad dinámica del fluido y  $\nabla^2\vec{V}$  el laplaciano del campo de velocidad, que describe la difusión del momento en el fluido.

La ecuación de Navier-Stokes constituye el fundamento más profundo y esencial de la mecánica de fluidos, siendo la herramienta matemática que describe de manera completa el comportamiento dinámico de los fluidos bajo diversas condiciones. Esta ecuación es una ecuación diferencial parcial de segundo orden, caracterizada por su naturaleza no lineal e inherentemente inestable, lo que hace que su resolución sea extremadamente compleja.

---

Si tuviéramos la capacidad de resolver esta ecuación para cualquier geometría de manera exacta, gran parte de los desafíos teóricos en el campo de la mecánica de fluidos se verían significativamente reducidos. En ese escenario ideal, no sería necesario recurrir a modelos de turbulencia en la dinámica de fluidos computacional (CFD), ya que contaríamos con soluciones analíticas precisas para describir el comportamiento del flujo de aire alrededor del vehículo [5].

Esta capacidad nos permitiría predecir con exactitud todos los aspectos del flujo, incluyendo las regiones turbulentas, sin depender de aproximaciones o modelos numéricos. Sin embargo, debido a la complejidad de la ecuación de Navier-Stokes y la dificultad de obtener soluciones analíticas en geometrías complejas o en presencia de turbulencias, es imprescindible recurrir a modelos y simulaciones numéricas para abordar estos problemas. Por lo tanto, la ecuación de Navier-Stokes sigue siendo una pieza central en la teoría de fluidos, pero su aplicación práctica en muchos casos requiere el apoyo de métodos computacionales avanzados.

---

## 4 SIMULACIÓN AERODINÁMICA MEDIANTE CFD

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés: Computational Fluid Dynamics) es una disciplina dentro de la mecánica de fluidos que se encarga de estudiar y resolver problemas relacionados con el comportamiento de fluidos mediante el uso de técnicas numéricas avanzadas y algoritmos computacionales. Esta rama del conocimiento permite simular y analizar el flujo de líquidos y gases a través de la interacción de estos con superficies sólidas o contornos previamente definidos. Para llevar a cabo estos cálculos, es indispensable el uso de sistemas computacionales con alta capacidad de procesamiento, ya que los modelos matemáticos y físicos que describen el comportamiento de los fluidos requieren de importantes recursos computacionales para ser resueltos con precisión.

El fundamento teórico de la mayoría de las aplicaciones en CFD se basa en las ecuaciones de Navier-Stokes, que describen de manera completa y detallada los movimientos de fluidos tanto en flujos laminares como turbulentos. Estas ecuaciones representan las leyes de conservación de la masa, cantidad de movimiento y energía para un fluido en movimiento, permitiendo modelar con precisión la interacción entre fuerzas viscosas, inerciales y de presión en el flujo. Sin embargo, debido a la complejidad de estas ecuaciones, en algunos casos se opta por realizar simplificaciones que permitan resolver problemas específicos de manera más eficiente.

Una de estas simplificaciones consiste en omitir los términos relacionados con la viscosidad, dando lugar a las ecuaciones de Euler, las cuales son adecuadas para modelar flujos no viscosos o donde los efectos viscosos son despreciables. Estas ecuaciones permiten analizar el comportamiento general de un fluido sin entrar en los detalles de la vorticidad, lo que simplifica considerablemente los cálculos en casos donde los efectos viscosos no son predominantes.

En situaciones donde el flujo presenta pequeñas perturbaciones, como en flujos subsónicos o supersónicos, las ecuaciones de Euler y Navier-Stokes pueden ser linealizadas. Esto se logra bajo ciertos supuestos que permiten reducir el grado de complejidad de las ecuaciones, obteniendo así las denominadas ecuaciones potenciales linealizadas. Estas ecuaciones son particularmente útiles para estudiar perturbaciones en flujos alrededor de cuerpos aerodinámicos, donde las variaciones

---

de presión y velocidad son lo suficientemente pequeñas como para aplicar este tipo de aproximaciones, lo que permite un análisis más eficiente sin sacrificar en gran medida la precisión de los resultados.

En resumen, la Dinámica de Fluidos Computacional se fundamenta en el uso de modelos matemáticos complejos y su resolución mediante herramientas computacionales, con las ecuaciones de Navier-Stokes como el eje central de la mayoría de las simulaciones de flujo. Dependiendo de la naturaleza del problema, estas ecuaciones pueden ser simplificadas para facilitar el cálculo, permitiendo obtener soluciones útiles en un amplio rango de aplicaciones en ingeniería y ciencia.

#### **4.1 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

El método de elementos finitos (FEM, Finite Element Method) es una técnica numérica crucial en el análisis de dinámica de fluidos computacional, y en ANSYS Fluent, se emplea para resolver problemas complejos que involucran el flujo de fluidos, transferencia de calor y fenómenos asociados. En CFD, el objetivo es resolver las ecuaciones diferenciales parciales que describen el comportamiento de los fluidos (como las ecuaciones de Navier-Stokes) dentro de un dominio definido. Para ello, el método de elementos finitos descompone el dominio fluido en una malla de pequeños elementos geométricos, en los cuales se aplican las ecuaciones de flujo. En ANSYS Fluent, la geometría del dominio se importa o genera a través de herramientas como ANSYS Design Modeler y se discretiza en estos elementos mediante el proceso de mallado, una fase esencial para el éxito del análisis [12].

Una de las ventajas principales del FEM en ANSYS Fluent es su capacidad para manejar geometrías complejas de manera eficiente. El dominio fluido se divide en elementos finitos que pueden ser tetraédricos, hexaédricos o prismáticos, dependiendo de la geometría y la precisión requerida. Cada uno de estos elementos está asociado a un conjunto de puntos, llamados nodos, en los que se calculan las variables de interés como la presión, la velocidad, o la temperatura. Estas variables se aproximan mediante funciones de forma, que son funciones polinomiales de Taylor que interpolan los valores de las incógnitas dentro de cada elemento. El método de elementos finitos transforma las ecuaciones diferenciales originales en un sistema de

---

ecuaciones algebraicas que se resuelven numéricamente a nivel global, combinando las soluciones obtenidas en cada elemento.

En ANSYS Fluent, después de que el dominio ha sido discretizado y las ecuaciones de flujo han sido reformuladas usando el FEM, el siguiente paso es aplicar las condiciones de contorno y las condiciones iniciales. Estas condiciones definen cómo interactúan los fluidos en el dominio, como las velocidades en las entradas, las presiones en las salidas o las interacciones con superficies sólidas. El programa utiliza métodos numéricos avanzados para resolver las ecuaciones en cada paso de tiempo o iteración, lo que permite estudiar fenómenos complejos como el flujo turbulento, el comportamiento en regímenes subsónicos o supersónicos, y la transferencia de calor. Además, el FEM es adecuado para refinamiento local de la malla en zonas críticas, donde hay alta gradiente de flujo o interacción con las superficies, mejorando la precisión del resultado sin un aumento excesivo del tiempo computacional [12].

Una característica destacada del uso de FEM en ANSYS Fluent es su capacidad para adaptarse a diversos tipos de flujos y problemas multiparte. Además del análisis de fluidos, puede combinarse con el análisis estructural para resolver problemas de interacción fluido-estructura (FSI), donde el comportamiento del fluido y la deformación del sólido se resuelven simultáneamente. Por ejemplo, en el análisis aerodinámico de vehículos, el FEM en Fluent permite simular el flujo alrededor de la carrocería, optimizar la resistencia aerodinámica y, al mismo tiempo, predecir cómo las fuerzas aerodinámicas podrían afectar la estructura del vehículo. Este enfoque integrado, utilizando mallas dinámicas y adaptativas, y herramientas avanzadas de resolución numérica, convierte al método de elementos finitos en un componente fundamental para el análisis detallado y preciso en ANSYS Fluent, permitiendo tomar decisiones de diseño optimizadas en una amplia variedad de aplicaciones industriales [12].

## **4.2 SOFTWARE**

Para llevar a cabo el proyecto, utilizaré el software ANSYS, que ofrece una solución integral de herramientas de simulación altamente eficiente y versátil. ANSYS es ampliamente reconocido en la industria por su capacidad para realizar análisis avanzados en diversas disciplinas de ingeniería, incluyendo la mecánica de fluidos,

---

la dinámica estructural y la transferencia de calor. En este caso, el primer paso en el proceso de simulación será el diseño y modelado de las geometrías, que se llevará a cabo en ANSYS Design Modeler. Esta herramienta permite crear geometrías complejas y detalladas con precisión, utilizando una variedad de métodos de modelado que van desde la creación de formas básicas hasta el diseño de geometrías intrincadas, adaptándose a los requisitos específicos del proyecto.

Una vez que las geometrías estén diseñadas y modeladas en DesignModeler, el siguiente paso es la configuración de los parámetros de simulación, que se realizará en ANSYS Fluent. Fluent es un potente módulo de ANSYS especializado en la simulación de dinámica de fluidos y transferencia de calor. En esta etapa, se definirá el dominio de la simulación, se establecerán las condiciones de contorno, y se configurarán los parámetros necesarios para el análisis, como las propiedades del fluido, las condiciones iniciales y las restricciones. Fluent proporciona una amplia gama de opciones para definir estos parámetros, permitiendo un ajuste fino para reflejar con precisión las condiciones del mundo real y los comportamientos específicos del flujo [12].

Finalmente, procederé a realizar la simulación en Fluent, utilizando los parámetros configurados para analizar el comportamiento del fluido en la geometría diseñada. Fluent ejecutará la simulación resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes y otras ecuaciones relacionadas, generando resultados que incluirán perfiles de velocidad, campos de presión y posibles fenómenos de turbulencia. Los resultados obtenidos serán fundamentales para interpretar el rendimiento del diseño y para realizar las optimizaciones necesarias. Además, Fluent ofrece herramientas avanzadas de visualización y post-procesamiento que facilitarán la interpretación de los datos y la generación de informes detallados, lo que permitirá tomar decisiones informadas sobre los ajustes y mejoras en el diseño del proyecto.

---

## 5 METODOLOGÍA

Dado que resulta evidentemente inviable llevar a cabo nuestro proyecto utilizando automóviles reales o maquetas a escala y someterlos a experimentos en un túnel de viento, hemos decidido optar por una alternativa más accesible. Esta decisión está motivada tanto por la complejidad inherente a tales experimentos como, principalmente, por la carencia de recursos logísticos y económicos necesarios para su realización. En este contexto, centraremos nuestros esfuerzos en la realización de una simulación mediante dinámica de fluidos computacional.

El primer paso de nuestro proyecto consistirá en la construcción digital de un modelo de automóvil utilizando un software especializado. Para ello, será necesario, en primer lugar, seleccionar el prototipo que se empleará en el proceso. Tal como se mencionó en la introducción, nuestro objetivo principal es analizar la diferencia de rendimiento en términos de aerodinámica de un automóvil con respecto a la geometría simplificada del Ahmed body y analizar cómo afecta la variación de la velocidad al impacto energético de un vehículo. Con este propósito, obtendremos diversos parámetros característicos, entre ellos los coeficientes de arrastre y de sustentación, así como gráficas de perfiles de velocidad, presión, turbulencia, etc.

En primer lugar, procederemos al análisis del Ahmed Body, un cuerpo geométrico básico que simula de manera general la estructura de un coche. Este modelo es ampliamente utilizado en estudios de aerodinámica básica de vehículos debido a su simplicidad y representatividad. Posteriormente, desarrollaremos un modelo de automóvil con el mayor nivel de detalle posible dentro de las limitaciones del proyecto, que será representativo de un vehículo contemporáneo, caracterizado por una geometría más refinada y optimizada aerodinámicamente.

Como conclusión de este proyecto, resulta fundamental llevar a cabo una comparación detallada entre el rendimiento aerodinámico de la geometría simplificada del Ahmed body y el prototipo de un vehículo contemporáneo, así como se ve afectado el consumo de combustible debido a la aerodinámica cuando un vehículo opera a distintas velocidades. Esta comparación permitirá evaluar las diferencias clave en la eficiencia aerodinámica entre un modelo básico, diseñado principalmente con fines educativos y de investigación, y un diseño moderno que refleja años de avances tecnológicos y optimización en la industria automovilística. El Ahmed Body,

---

con sus formas geométricas elementales, ofrece una plataforma ideal para entender los principios básicos del flujo de aire alrededor de un automóvil, proporcionando datos útiles sobre la distribución de la presión, la formación de turbulencias, y la generación de vórtices. Sin embargo, su simplicidad limita su capacidad para replicar las complejas interacciones del flujo que se observan en vehículos reales, lo que hace que su rendimiento aerodinámico sea relativamente modesto en comparación con los automóviles contemporáneos.

Por otro lado, el prototipo de vehículo contemporáneo utilizado en este proyecto incorpora una serie de innovaciones y optimizaciones aerodinámicas que han sido desarrolladas a lo largo de las últimas décadas. Estos avances incluyen una geometría cuidadosamente diseñada para reducir la resistencia al aire, mejorar la estabilidad y minimizar el consumo de combustible, reflejando así las prioridades actuales de la industria automovilística. Al comparar los resultados obtenidos mediante simulaciones de dinámica de fluidos computacional para ambos modelos, se espera evidenciar cómo la evolución en el diseño de carrocerías ha contribuido a mejorar significativamente el rendimiento aerodinámico de los vehículos. Esta comparación no solo subrayará la importancia de la aerodinámica en el diseño automovilístico moderno, sino que también destacará el valor de utilizar modelos simplificados como el Ahmed Body en la fase inicial de análisis y desarrollo, antes de proceder a diseños más complejos y detallados.

Del mismo modo, el objetivo secundario en este proyecto es demostrar cómo un leve incremento en la velocidad de un vehículo puede tener un impacto significativo en el consumo de combustible. Aunque los cambios en la velocidad puedan parecer pequeños, su efecto sobre la resistencia aerodinámica y, por ende, el consumo energético, puede ser considerable. Mediante simulaciones detalladas y análisis en ANSYS Fluent, se buscará evidenciar cómo la resistencia del aire aumenta de manera no lineal con la velocidad, generando una mayor demanda de potencia del motor y, por lo tanto, un incremento proporcional en el consumo de combustible. Esta investigación proporcionará una visión clara de cómo optimizar la velocidad de operación para lograr una mayor eficiencia en el consumo de energía y reducir costos operativos.

Para realizar una simulación en Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), se deben seguir una serie de pasos fundamentales, que abarcan desde la preparación de la

geometría hasta el análisis de resultados. A continuación, se detallan cada uno de los pasos involucrados.

## 5.1 ELECCIÓN DEL MODELO DE ANÁLISIS

El primer paso en una simulación CFD es seleccionar el modelo de sistema de análisis más adecuado para el estudio. Este modelo define las ecuaciones y aproximaciones matemáticas que se utilizarán para representar el comportamiento del flujo de fluido dentro del sistema en cuestión. La elección del modelo de análisis depende de varios factores, como la naturaleza del flujo (laminar o turbulento), las características del problema (transitorio o estacionario), y la precisión requerida. En nuestro caso, dentro del programa ANSYS, hemos escogido el sistema Fluid Flow (Fluent). Una vez escogido el sistema de análisis, abrimos un proyecto nuevo dentro de la interfaz de ANSYS Workbench.

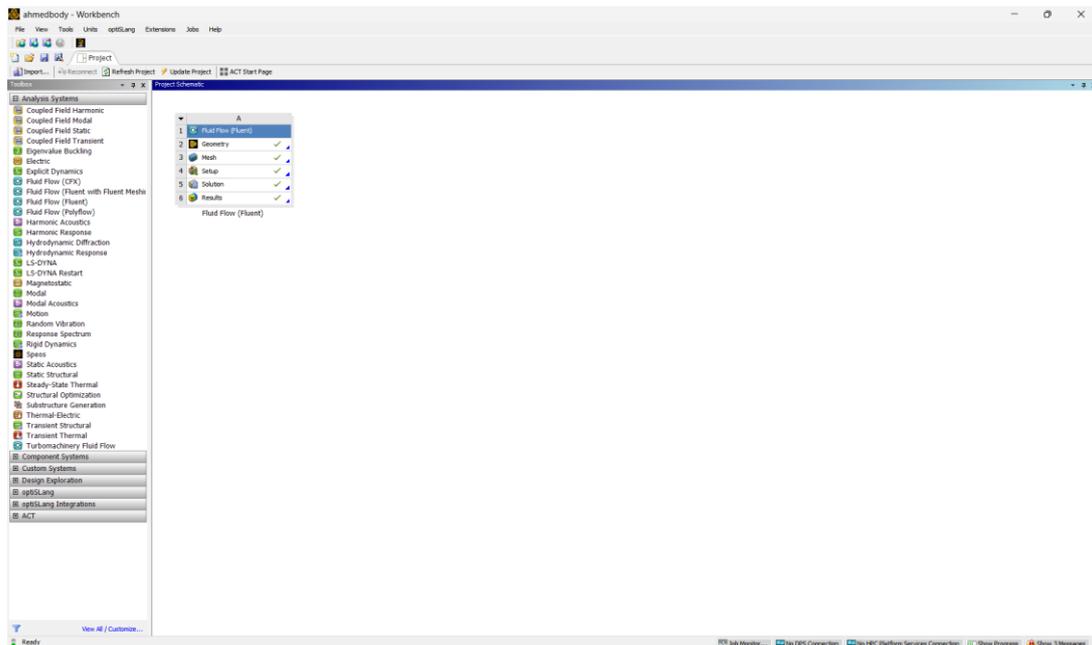


Figura 22. Proyecto en ANSYS Workbench

## 5.2 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA

El siguiente paso es diseñar la geometría. En nuestro caso modelaremos las geometrías tridimensionales del Ahmed Body y el vehículo en el software CAD (computer-aided design) ANSYS Design Modeler, mediante la operación Geometry. En el caso del vehículo, será necesario llevar a cabo una serie de simplificaciones geométricas para reducir la complejidad de la simulación y reducir el tiempo de cálculo, como son el redondeado de los perfiles de los retrovisores, omisión de llantas y tapado de entradas de refrigeración delanteras.

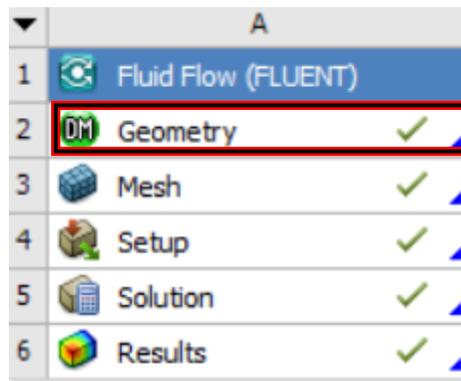


Figura 23. Operación Geometry

El modelado del Ahmed Body y el prototipo de vehículo en ANSYS Design Modeler comienza con la creación de la geometría base utilizando la herramienta de bocetado o sketching. En el plano XY, se dibuja un boceto 2D que representa el perfil lateral del vehículo, capturando las líneas básicas de la carrocería como el frente, techo y parte trasera. A partir de este boceto, se pueden añadir detalles adicionales como el parabrisas, las ventanas y las curvas características del diseño del vehículo, que, en nuestro caso, como se ha comentado, se han omitido para simplificar la solución y hacer el proceso de resolución más eficiente, sin comprometer significativamente la precisión de los resultados clave y reducir el tiempo de simulación. Además, también se han creado bocetos adicionales en los planos YZ y XZ para definir las secciones frontal y superior de los prototipos, proporcionando una geometría completa y coherente. Estos bocetos 2D se convierten en entidades tridimensionales mediante operaciones de extrusión y revolución, dependiendo de la forma de cada parte del vehículo. La extrusión se ha empleado para generar el cuerpo principal, mientras que la revolución se aplica para las ruedas o partes con geometrías circulares.

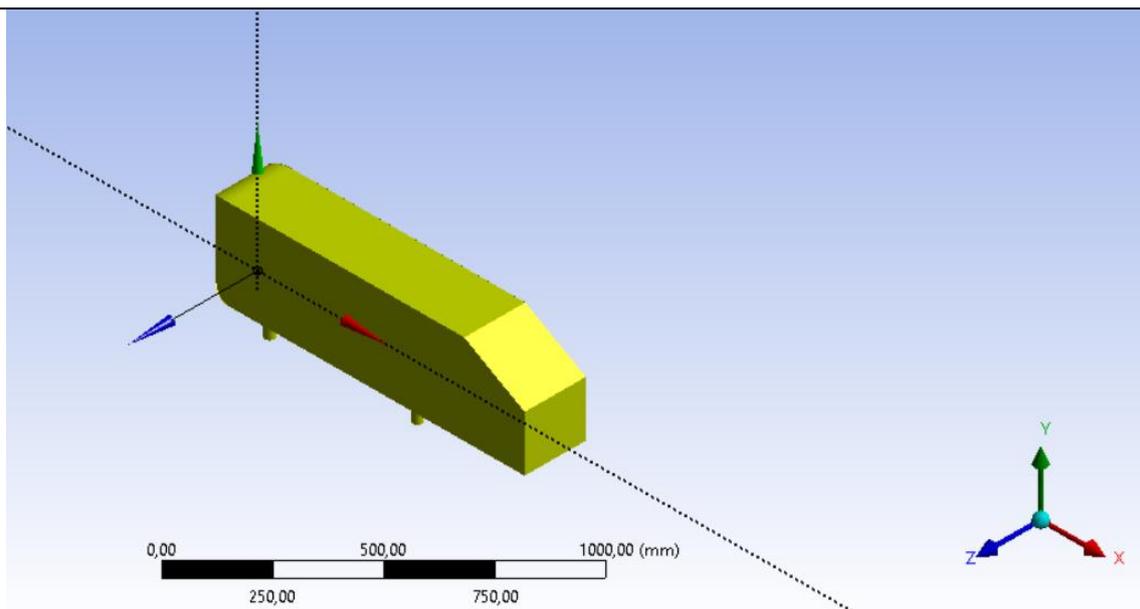


Figura 24. Modelado del Ahmed Body

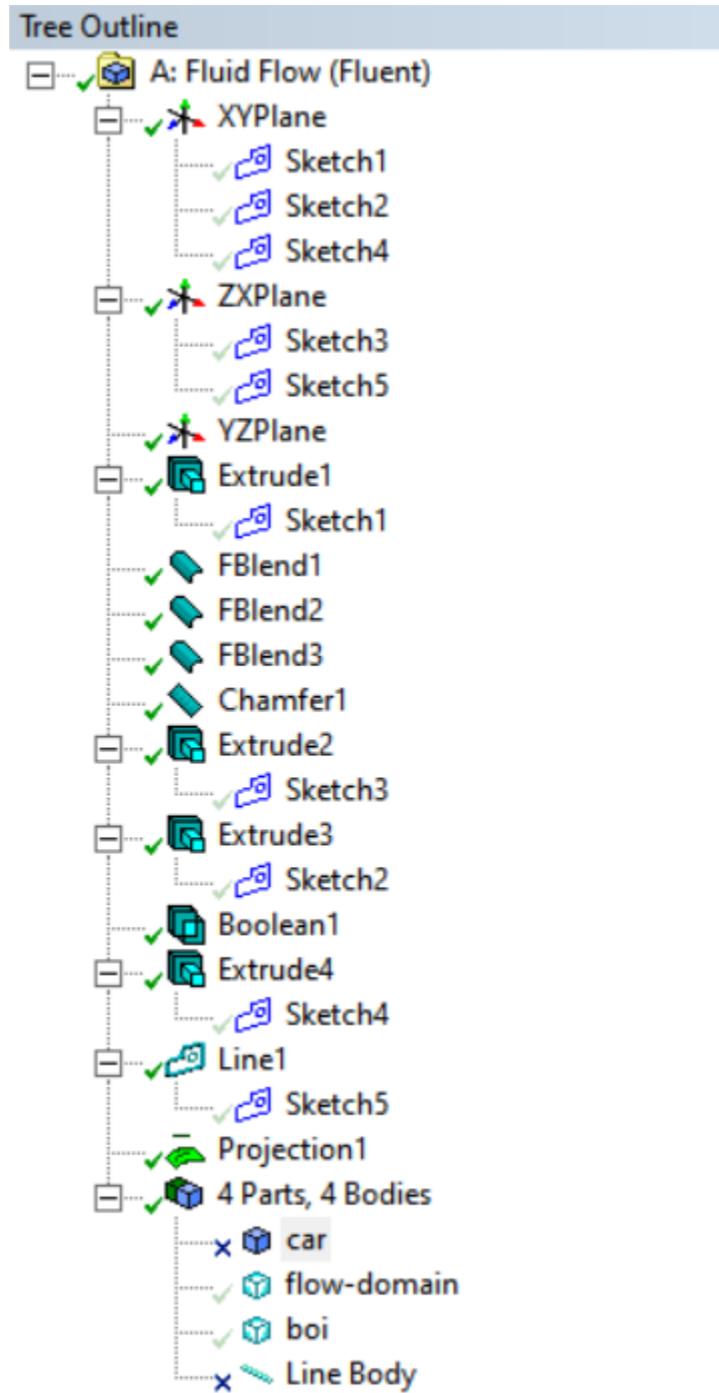


Figura 25. Conjunto de operaciones para el modelado del Ahmed Body

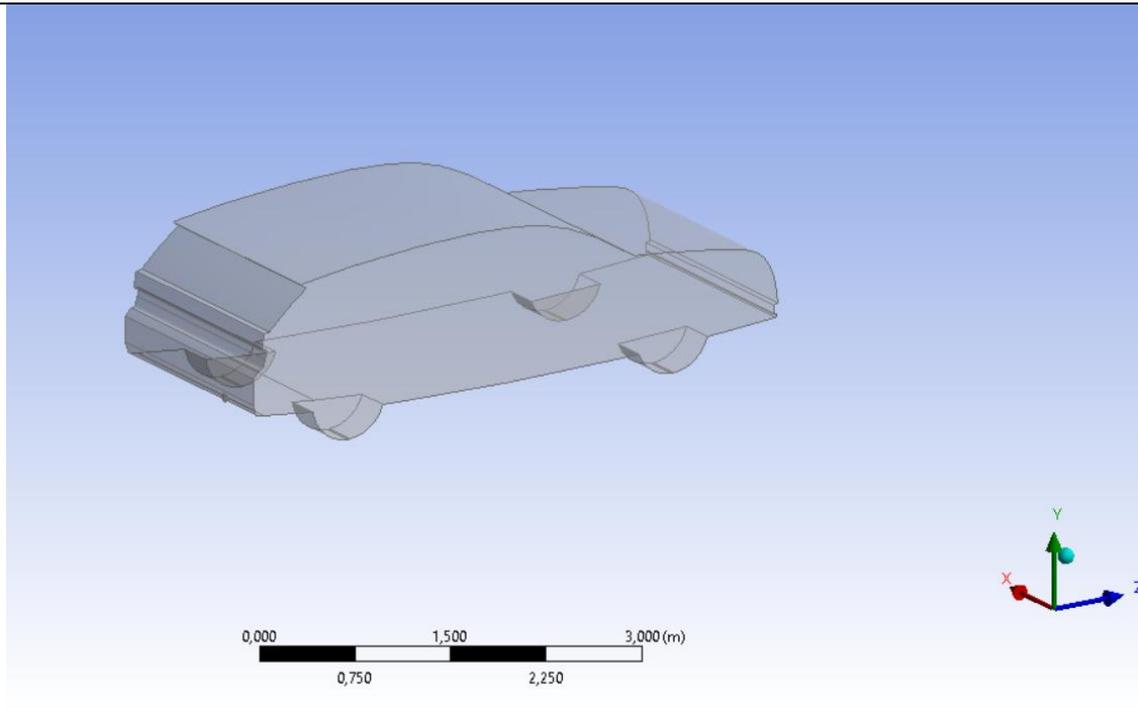


Figura 26. Modelado del prototipo de vehículo

Una vez que las geometrías bases de los modelos están definidas, se procede a crear el entorno de simulación, que incluye el dominio fluido. Este dominio representa el volumen de aire que rodeará los vehículos durante la simulación. Para simular el flujo aerodinámico, es fundamental definir un volumen de control, que en este caso simula un túnel de viento virtual. El túnel de viento puede ser modelado como un volumen rectangular o cilíndrico, dentro del cual se situará el prototipo del vehículo. En nuestro caso, se ha decidido emplear un túnel de viento rectangular, ya que es más sencillo llevar a cabo el mallado del mismo y la presencia de superficies planas hacen que el proceso de mallado sea menos costoso computacionalmente [12]. Este proceso de mallado se explica en el siguiente paso, en el apartado 5.3. El túnel debe ser lo suficientemente grande para permitir que el flujo de aire se desarrolle adecuadamente alrededor del vehículo, minimizando los efectos de los bordes del dominio sobre los resultados de la simulación. Este dominio fluido es crucial, ya que permite al software CFD calcular cómo interactúa el flujo de aire con la geometría del vehículo, afectando aspectos como el arrastre y la sustentación. Las dimensiones del volumen de control en una simulación de CFD dependen de la geometría del objeto y del tipo de flujo que se analiza. Para la parte de entrada (inlet), es recomendable que la distancia entre el objeto y la frontera de entrada sea entre 3 y 5 veces la longitud característica del

---

cuerpo, lo que permite que el flujo se desarrolle adecuadamente antes de interactuar con la geometría, es decir, que el flujo sea completamente laminar antes de interactuar con la superficie más saliente del vehículo. En nuestro caso, la longitud del vehículo es de 4 metros de longitud, la distancia de entrada debería ser de 12 a 20 metros. En cuanto a la distancia de salida (outlet), donde se capturan los vórtices y el flujo de estela, debe ser mayor, generalmente entre 5 y 10 veces la longitud del objeto, es decir, entre 20 y 40 metros [13]. Sin embargo, utilizando estas dimensiones, a la hora de simular ambos cuerpos para obtener sus características aerodinámicas, el tiempo de simulación se extendía hasta las 36 horas, haciendo imposible el uso de un volumen de control tan grande. Finalmente, las dimensiones escogidas para los volúmenes de control prismáticos han sido de una distancia frontal de 7 metros y trasera de 12 metros para el Ahmed Body y 4 metros de distancia frontal y 5 metros de distancia trasera para el vehículo. El tamaño reducido del túnel de viento virtual del vehículo se debe a que, acorde con el número de procesadores que dispone nuestro portátil y debido a la complejidad de la geometría del vehículo, el tiempo de simulación no se extienda más allá de las 24 horas. Aunque este volumen de control sea de reducido tamaño, no nos afecta para la correcta interpretación de los resultados. Por el contrario, con el Ahmed Body si se ha podido hacer un volumen de control de mayor tamaño sin verse apenas afectado el tiempo de simulación, debido a la simplicidad de sus perfiles aerodinámicos.

El siguiente paso clave es utilizar la operación de boolean subtraction o sustracción booleana para restar la geometría del vehículo del volumen del túnel de viento. Esto crea una cavidad dentro del dominio fluido que corresponde al espacio ocupado por el prototipo del vehículo. De esta manera, el flujo de aire simulado dentro del túnel de viento interactuará adecuadamente con las superficies del vehículo. Además, se ha aplicado un refinamiento adicional de la malla en las áreas cercanas a la superficie del vehículo para capturar con mayor precisión las características del flujo, como la separación de capas límite y la formación de vórtices.

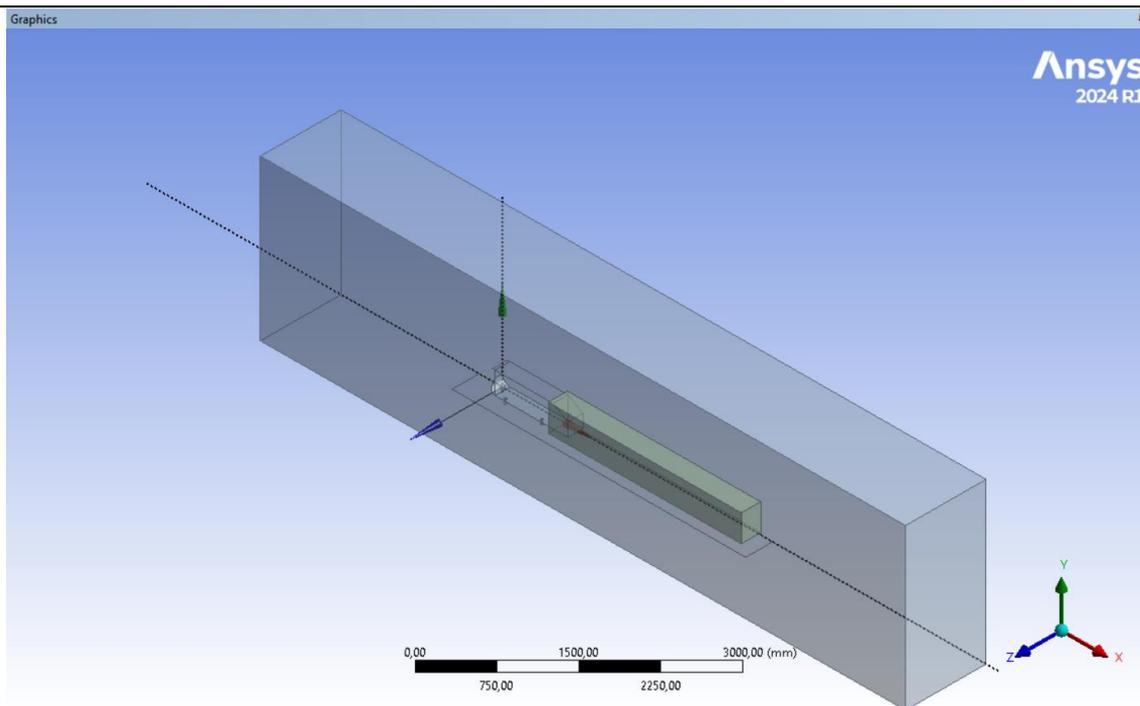


Figura 27. Volumen de control del Ahmed Body

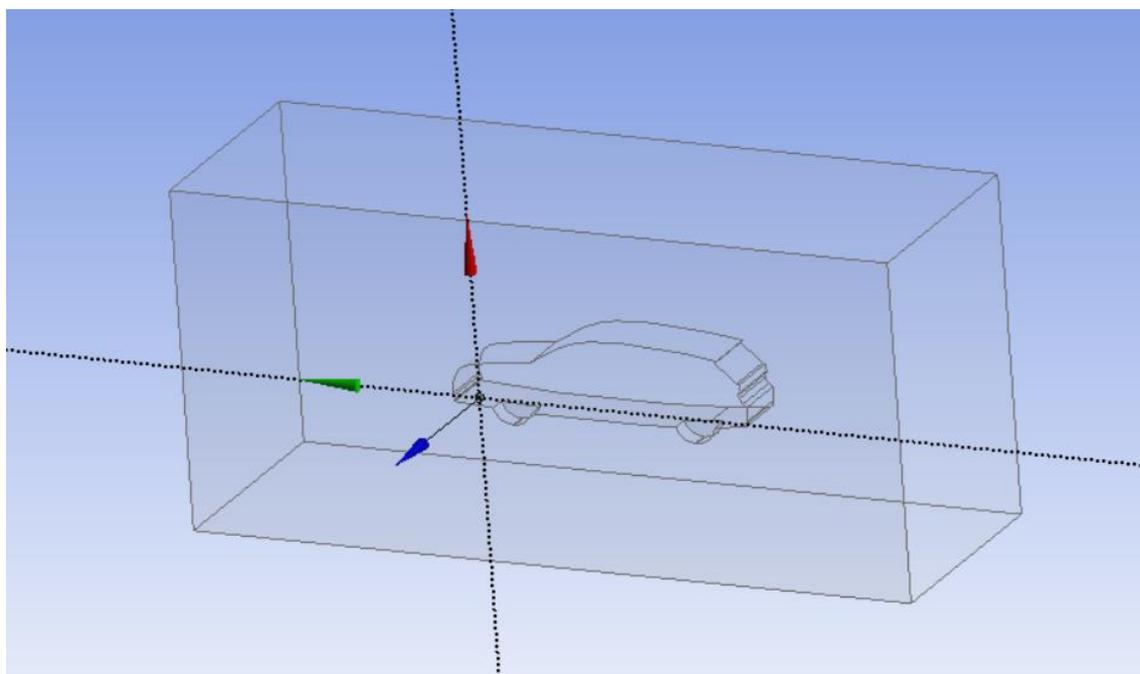


Figura 28. Volumen de control del prototipo de vehículo

### 5.3 GENERACIÓN DE LA MALLA.

Una vez definida la geometría, se procede a discretizar el dominio mediante la generación de una malla prismática que envuelve la geometría, que simula digitalmente un túnel de viento. La malla divide el dominio fluido en pequeñas celdas o elementos, donde se resolverán las ecuaciones de flujo. Este proceso se lleva a cabo con la operación Mesh.

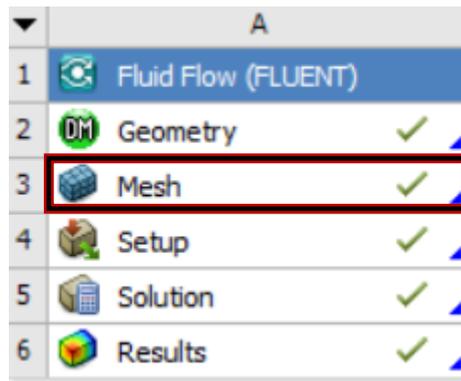


Figura 29. Operación Mesh

El proceso de mallado de un volumen de control en ANSYS Fluent comienza una vez que la geometría ha sido completamente definida y preparada. El objetivo del mallado es dividir el dominio fluido y la geometría del objeto en elementos más pequeños, llamados celdas o elementos, sobre los cuales el software resolverá las ecuaciones del flujo. Para comenzar el mallado, se accede al módulo de Mesh de ANSYS, donde se selecciona el volumen de control que previamente ha sido creado. En este paso, es importante definir una malla que sea lo suficientemente fina en las áreas de interés, especialmente en la superficie del vehículo y en las zonas donde se espera que ocurran gradientes elevados de velocidad, presión o turbulencia, como sucede en la parte trasera, pero sin generar un número de celdas excesivo que incremente innecesariamente el costo computacional.

En el menú de Mesh, se pueden seleccionar diferentes tipos de mallas: estructurada, no estructurada, o híbrida. En nuestro caso, para un volumen de control rectangular, es común utilizar una malla no estructurada con elementos tetraédricos, ya que esta opción se adapta bien a las geometrías complejas, como los vehículos, y a la curvatura del flujo [12]. Es recomendable emplear herramientas de refinamiento local, que permiten ajustar el tamaño de las celdas en zonas específicas del dominio. Por

ejemplo, cerca de la superficie del vehículo (en la capa límite), se suele aplicar un refinamiento de malla para capturar con mayor precisión los fenómenos del flujo en esta región crítica. Esto se puede lograr definiendo una región de influencia o utilizando funciones automáticas de refinamiento como la opción "proximity and curvature", que refina la malla en función de la proximidad entre las superficies y su curvatura. Como se puede observar en las figuras, hay un mayor número de celdas tetraédricas en el contorno de las superficies de los prototipos, especialmente en las cavidades de las ruedas.

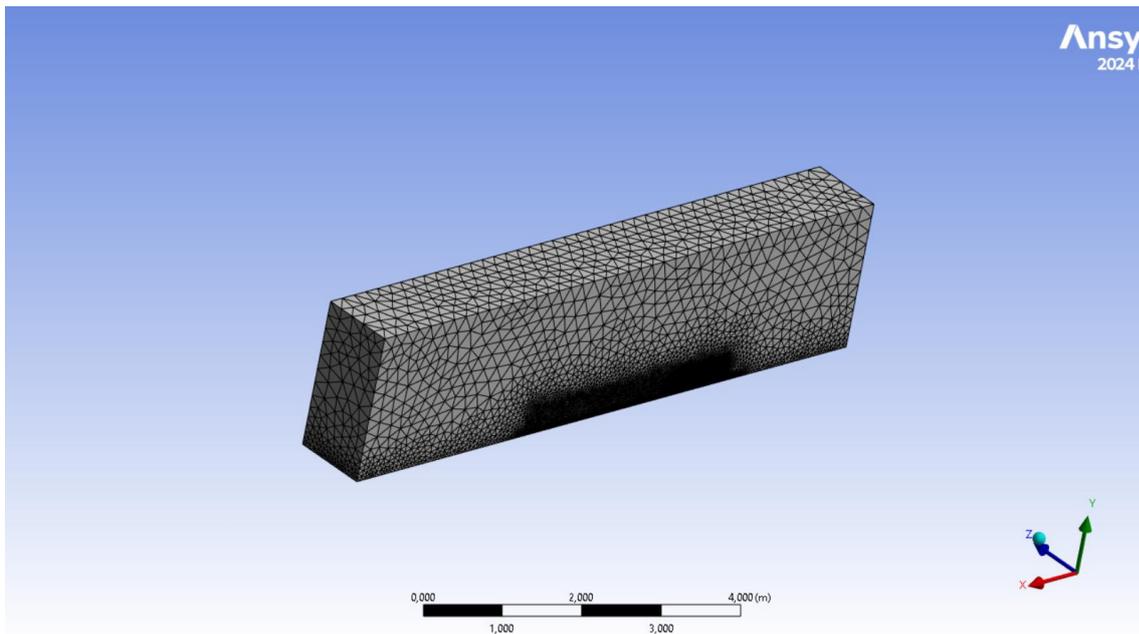
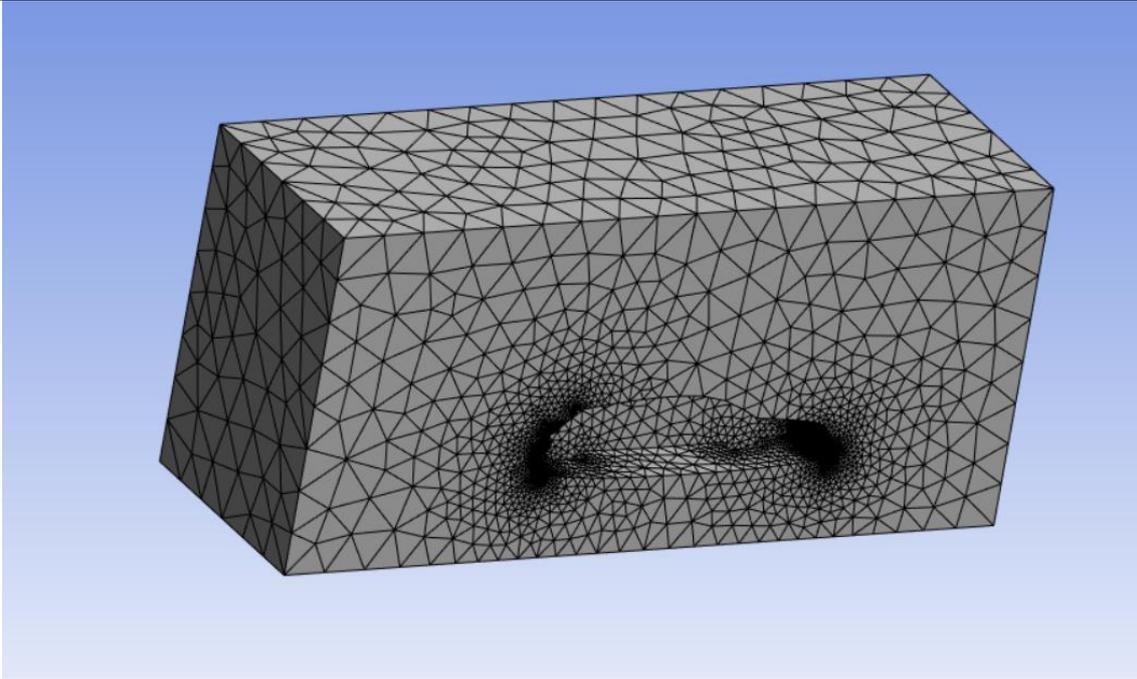


Figura 30. Mallado del volumen de control del Ahmed body



*Figura 31. Mallado del volumen de control del prototipo de vehículo*

Finalmente, el mallado en el dominio fluido debe extenderse más allá de la geometría principal, asegurando que las fronteras de entrada, salida y laterales estén bien representadas. Una malla más gruesa en las áreas alejadas del objeto ayuda a reducir el número total de celdas y, por lo tanto, el tiempo de cómputo, mientras que la malla más densa en las cercanías del vehículo mejora la precisión. Además, en simulaciones aerodinámicas, es fundamental asegurar un refinamiento adecuado en las regiones de estela del objeto para capturar correctamente la recirculación y los vórtices generados. Una vez definida la malla, es necesario verificar la calidad, asegurando que el aspect ratio y el skewness de las celdas estén dentro de los rangos recomendados para evitar inestabilidades numéricas y garantizar una solución precisa en la simulación [12].

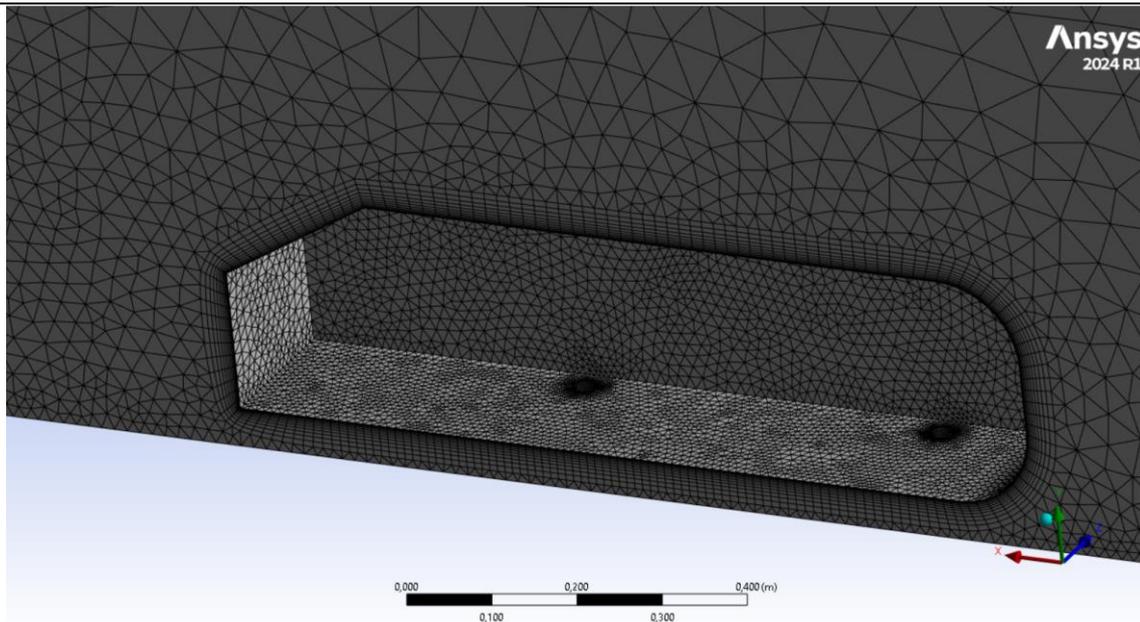


Figura 32. Detalle del mallado del volumen de control del Ahmed Body

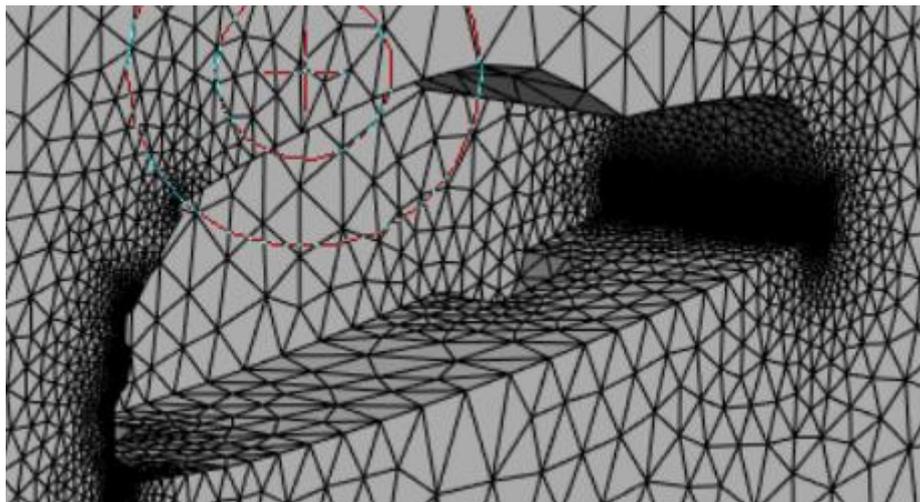


Figura 33. Detalle del mallado del volumen de control del prototipo de vehículo

En ANSYS Fluent, una vez que el volumen de control ha sido mallado, es esencial nombrar adecuadamente las distintas superficies o fronteras del dominio fluido para definir las condiciones de contorno de la simulación. Utilizando la operación "Create Named Selection", se nombran las paredes del volumen de control con etiquetas específicas que describen su función en la simulación. La superficie de entrada del flujo se nombra como "velocity-inlet", donde se aplicarán las condiciones de velocidad de entrada. La pared opuesta, que corresponde a la salida del flujo, se denomina

"pressure-outlet", donde se especificarán las condiciones de presión de salida. La pared lateral exterior y las paredes superiores del dominio fluido, que representan los límites del túnel de viento virtual, se agrupan bajo el nombre "domain-walls". La superficie correspondiente al contorno de los modelos se define como "body". Finalmente, la superficie inferior, que representa el suelo o la carretera en simulaciones vehiculares, se nombra como "Ground", sobre la cual se aplicarán condiciones de pared, como la condición de no deslizamiento y la pared correspondiente al plano de simetría como "simmetry". Esta pared de simetría es sobre la cual se realizará el estudio, sobre este plano se llevará a cabo la representación de los diagramas de velocidades y presiones, así como la trayectoria descrita por el flujo. Este proceso de asignar nombres claros y descriptivos a las superficies es crucial para la correcta configuración de las condiciones de contorno y garantizar una simulación precisa y coherente en Fluent.

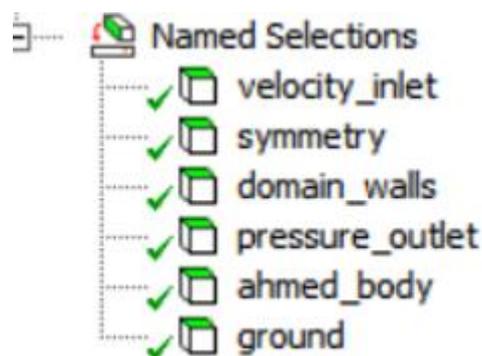


Figura 34. Named selections de las superficies del volumen de control del Ahmed Body

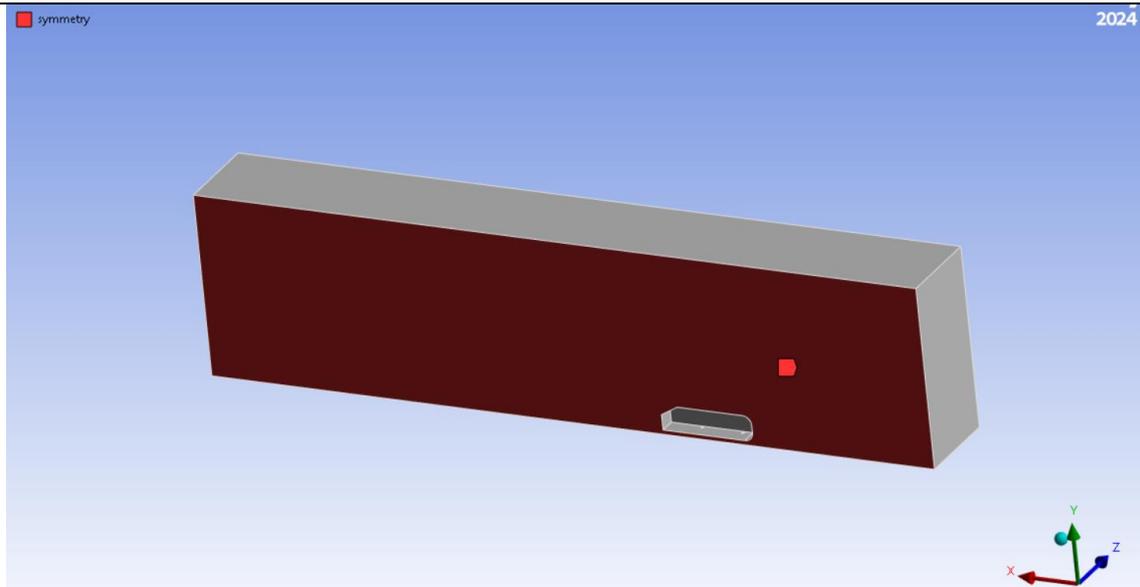


Figura 35. Detalle de la named selection "simmetry" del Ahmed Body

## 5.4 CONFIGURACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

Una vez que se ha generado la malla, es necesario definir la configuración de los parámetros de simulación. Esto se hace en el apartado Setup.

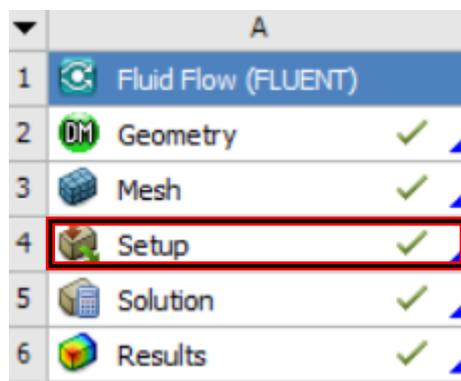


Figura 36. Operación Setup

El primer paso es establecer como queremos que sean de precisos los cálculos. Hemos establecido double precision, que se refiere a una configuración en el software de resolución matemática que establece el uso de doble precisión para los cálculos. Esto significa que el solucionador empleará un formato numérico de 64 bits en lugar de 32 bits para realizar operaciones matemáticas, lo que aumenta la exactitud y reduce los errores de redondeo [12]. En otras palabras, al activar la opción de doble precisión, se mejora la precisión de los resultados obtenidos, lo cual es crucial para resolver problemas complejos o sensibles donde la exactitud es fundamental.

También hemos indicado que sean 8 los núcleos del procesador los encargados de llevar a cabo las simulaciones.

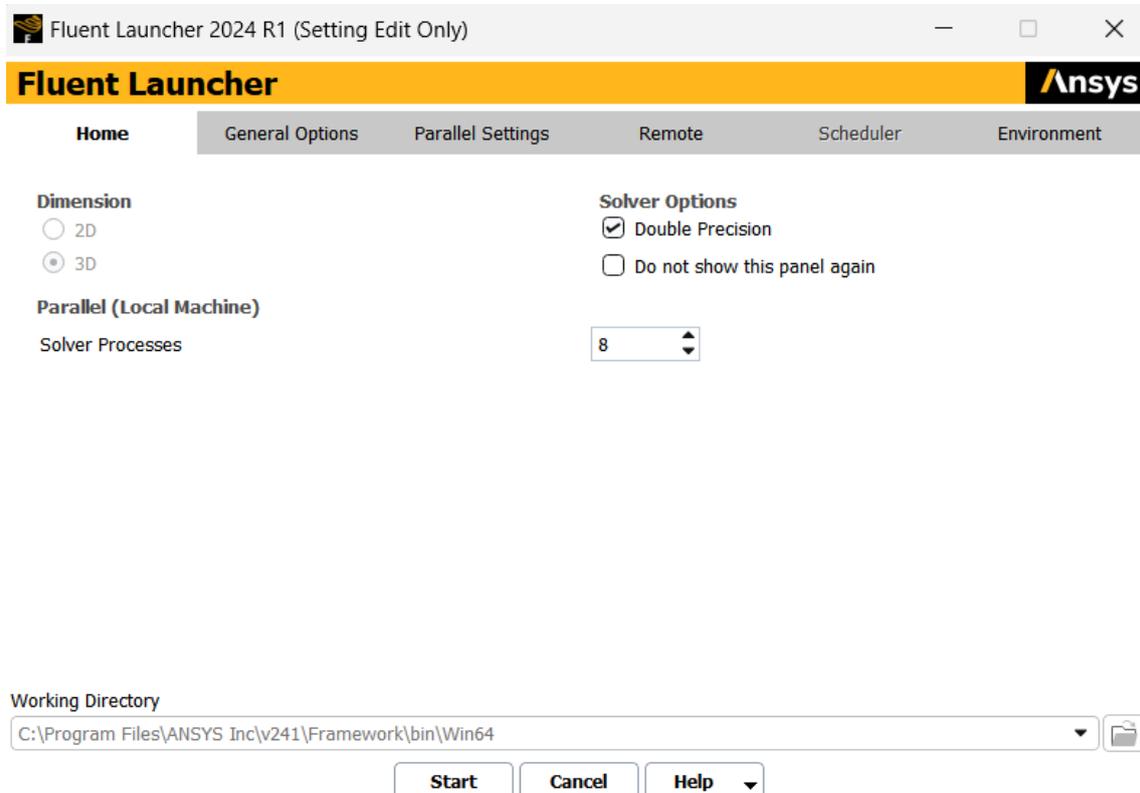


Figura 37. Configuración de los parámetros de simulación 1

Posteriormente, se establecen unos criterios fundamentales de resolución. En el contexto de un software de simulación, cuando se especifica que los parámetros generales de resolución deben ser configurados con un tipo "pressure based" y una formulación de velocidad "absolute", se está definiendo el enfoque y la metodología del solucionador para resolver problemas de dinámica de fluidos. El tipo "pressure based" indica que el solucionador utiliza una formulación basada en la presión para calcular las soluciones, lo cual es común en problemas de flujo donde la presión es una variable clave. Por otro lado, una formulación de velocidad "absolute" significa que las velocidades se miden en términos absolutos, sin considerar efectos relativos o referencias adicionales, lo que puede simplificar la interpretación de los resultados y la convergencia de la solución en ciertas simulaciones. Además, se configura el flujo para que opere en un estado transitorio, lo que facilita la convergencia de los resultados al permitir que el solucionador ajuste las condiciones a medida que el flujo

evoluciona con el tiempo. También se aplica la aceleración de la gravedad en el eje vertical, lo que incorpora el efecto de la gravedad en la simulación, asegurando que el comportamiento del flujo refleje de manera más precisa las condiciones reales. Aunque se haya determinado el flujo como transitorio, pasados unos segundos el flujo se estabiliza convirtiéndose en un estado estacionario [12].

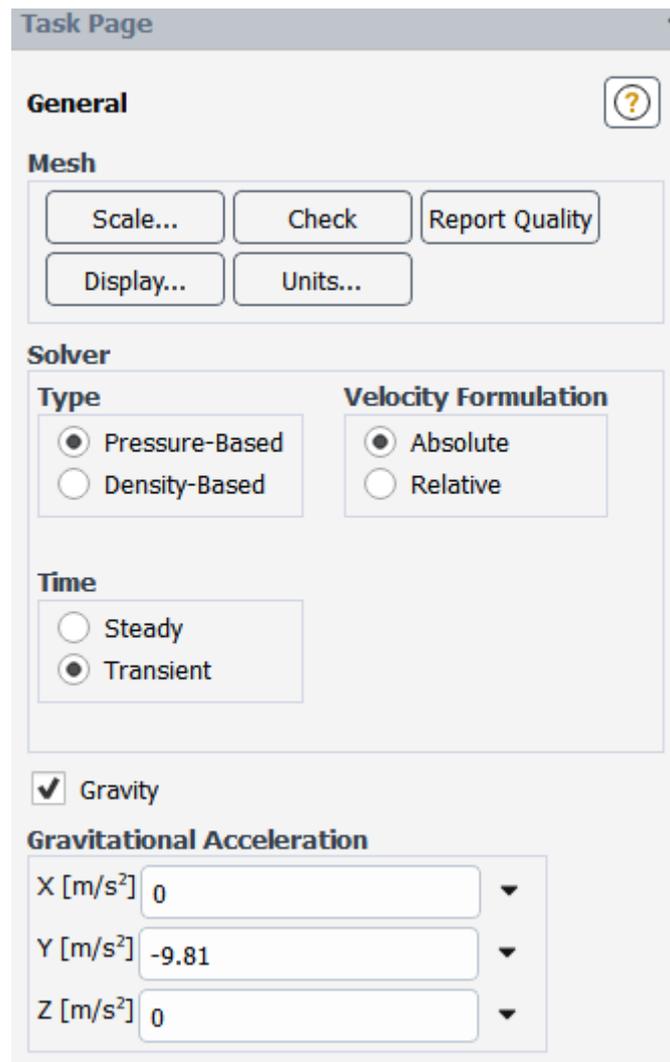


Figura 38. Configuración de los parámetros de simulación 2

En ANSYS Fluent, la definición de las condiciones de contorno también se realiza en esta etapa y es un paso clave para garantizar que la simulación de flujo se configure correctamente y refleje con precisión las condiciones físicas del problema. Para un análisis típico de flujo aerodinámico en un volumen de control, una de las primeras condiciones que se establece es en la entrada, o "velocity-Inlet", donde se especifica

una velocidad constante del flujo. Esta condición de contorno define la velocidad con la que el fluido (aire en nuestro caso), entra en el dominio fluido. La velocidad puede ser uniforme o variar según el problema, pero en nuestro caso, se emplea una velocidad constante para simplificar la simulación y centrarse en el comportamiento del flujo alrededor de los prototipos. La imagen de debajo se corresponde con la asignación de esta velocidad de entrada en el Ahmed body, correspondiente a 28 m/s o 100 km/h. Además, se puede definir la dirección del flujo en la entrada, quedando alineada con el eje longitudinal del vehículo.

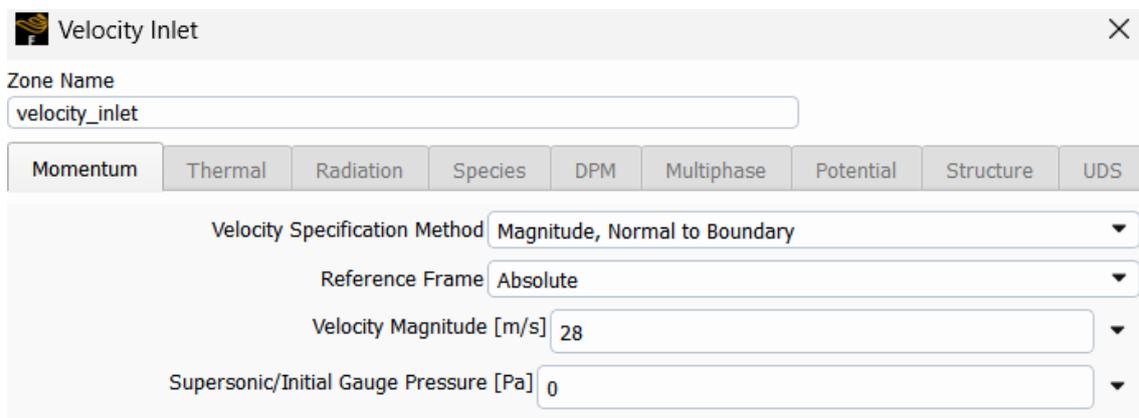


Figura 39. Velocidad de entrada del fluido

En la frontera opuesta, denominada "Outlet", se establece una condición de presión constante. En esta condición, se asume que el fluido abandona el dominio fluido con una presión predeterminada, generalmente igual a la presión atmosférica en simulaciones externas. La presión constante en la salida es esencial para asegurar que el flujo de aire no encuentre resistencia adicional al salir del volumen de control y que las condiciones en esta zona no afecten el comportamiento del flujo aguas arriba, en las cercanías del objeto de estudio. Esto permite que el programa resuelva correctamente la distribución de presión y velocidad dentro del dominio fluido, asegurando una transición suave del flujo desde el interior del túnel de viento hacia el exterior. También ayuda a definir las características de la estela y la recirculación del flujo, que son fundamentales en estudios aerodinámicos.

Finalmente, es importante resaltar que estas condiciones de contorno se combinan con otras fronteras, como las paredes laterales y el suelo, para crear un entorno de simulación coherente. La velocidad constante en la entrada y la presión constante en

---

la salida actúan como limitadores principales que definen el comportamiento del flujo dentro del volumen de control, permitiendo a ANSYS Fluent resolver las ecuaciones de Navier-Stokes y obtener resultados precisos en cuanto a velocidad, presión y turbulencia alrededor del objeto. Al establecer estas condiciones de contorno correctamente, se logra un equilibrio adecuado entre la entrada y salida del fluido, minimizando errores numéricos y garantizando que los resultados de la simulación sean realistas y aplicables a situaciones del mundo real.

También es obligatorio describir cómo el fluido interactúa con las paredes de la malla, si se trata de superficies deslizantes o no deslizantes, con o sin fricción, y si hay transferencia de calor. Las condiciones de contorno son esenciales para definir correctamente el comportamiento del fluido dentro del dominio simulado. Se ha optado por la condición de no deslizamiento, una suposición fundamental que se aplica en las fronteras entre un fluido y una superficie sólida. Esta condición establece que la velocidad del fluido en la interfaz con una superficie sólida es igual a la velocidad de la superficie misma. En otras palabras, en la pared de un objeto sólido, el fluido se mueve a la misma velocidad que la pared, lo que significa que no hay deslizamiento relativo entre el fluido y la superficie. Esta condición es importante para modelar con precisión el comportamiento del flujo cerca de las superficies y es esencial para calcular correctamente el perfil de velocidad y la distribución de la presión en las simulaciones CFD. La condición de no deslizamiento refleja la realidad de que las fuerzas viscosas entre el fluido y la superficie impiden que el fluido se desplace a una velocidad diferente de la de la superficie sólida.

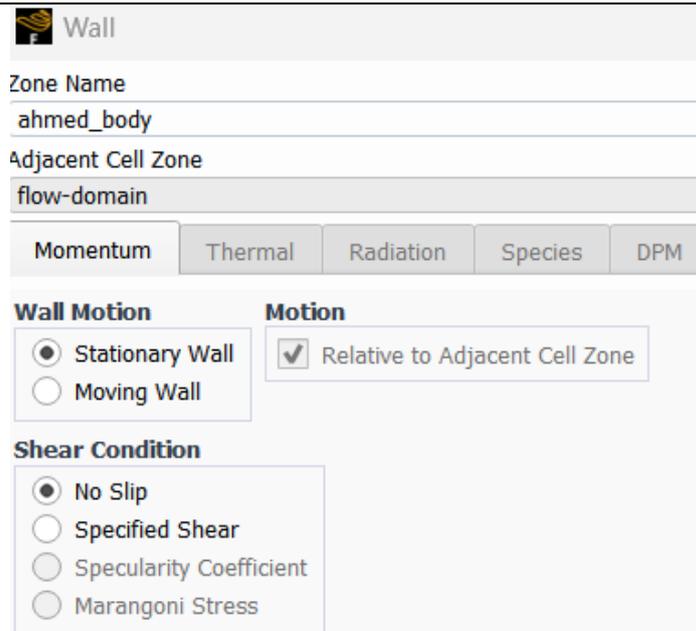


Figura 40. Configuración de los parámetros de simulación 3

Una vez establecidas las condiciones anteriores, es hora de seleccionar el modelo de flujo. En este paso, se selecciona el modelo matemático que rige el comportamiento del fluido en el sistema. Para la gran mayoría de los problemas de mecánica de fluidos, las ecuaciones fundamentales son las ecuaciones de Navier-Stokes, que describen el movimiento del fluido teniendo en cuenta la conservación de la masa, la cantidad de movimiento y la energía. Además, se debe elegir un modelo de turbulencia adecuado cuando el flujo es turbulento. Como se comentó en el apartado 3.6.1, se ha elegido el modelo de turbulencia k-epsilon realizable. También se fijan las propiedades del fluido, que como se ha comentado, es el aire, entre las que destacan densidad, viscosidad, presión y temperatura. No se añaden características termodinámicas, puesto que el estudio no se centra en la transferencia de calor.

Temperatura	288 K
Presión	101325 Pa
Densidad	1,225 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad	1,7894 · 10 <sup>-5</sup> Pa· s

Tabla 1. Propiedades del fluido de estudio (aire)

---

Por último, se establecen los criterios de convergencia, que son fundamentales para asegurar que la simulación numérica sea precisa y confiable. Estos criterios incluyen la definición de tolerancias específicas para los residuales de las ecuaciones que gobiernan el flujo, así como para las variables de interés como la velocidad, la presión y la temperatura. Además, se determinan los umbrales que indican cuándo la simulación ha alcanzado una solución estable y convergente, es decir, cuando los cambios en los resultados entre iteraciones sucesivas son lo suficientemente pequeños como para considerarse insignificantes. Estos criterios garantizan que el solucionador ha encontrado una solución que no solo es numéricamente estable, sino también representativa de la realidad física del problema simulado, evitando resultados erróneos o no convergentes. Por lo tanto, es necesario definir el número de pasos de tiempo (time steps) y el número de iteraciones por paso de tiempo. En el contexto de simulaciones numéricas, el paso de tiempo se refiere a la duración de cada intervalo de tiempo en el que se actualizan las variables del sistema en la simulación y las iteraciones por paso de tiempo se refiere al número de veces que el solucionador realiza cálculos dentro de cada intervalo de tiempo definido en la simulación. Cada iteración ajusta y refina las soluciones de las ecuaciones del modelo para mejorar la precisión y la estabilidad de la simulación en ese paso de tiempo. Un mayor número de iteraciones por paso de tiempo puede aumentar la exactitud de la simulación, especialmente en problemas transitorios complejos, al permitir ajustes más finos en cada intervalo de tiempo. Sin embargo, esto también puede incrementar el tiempo de cálculo y el uso de recursos computacionales.

Para establecer el número de pasos de tiempo mínimos y el número de iteraciones por paso de tiempo máximos es necesario recurrir a un conjunto de ecuaciones. Este proceso se va a explicar para el caso del Ahmed Body.

Primero hay que obtener la frecuencia estimada de desprendimiento de vórtices. En el análisis dimensional, el número de Strouhal es un número adimensional que describe los mecanismos de flujo oscilante. En nuestro caso, el número de Strouhal es:

$$S = 0,2$$

El diámetro hidráulico de la sección frontal del Ahmed Body se calcula como:

$$D_h = 4 \cdot \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro}} = 4 \cdot \frac{0,112 \text{ m}^2}{1,354 \text{ m}} = 0,331 \text{ m}$$

La frecuencia de derramamiento, que es la tasa a la que se producen fenómenos de desprendimiento de vórtices se expresa:

$$n = \frac{S \cdot v}{D_h} = \frac{0,2 \cdot 28 \text{ m/s}}{0,331 \text{ m}} = 16,92 \text{ Hz}$$

Luego el periodo de derramamiento de vórtices se calcula como el inverso de la frecuencia:

$$T = \frac{1}{n} = 0,0591 \text{ s}$$

Este periodo se parte en 50 divisiones, quedando aproximadamente separadas por un intervalo de 0,001 s. Para 20 periodos, el tiempo total será de  $20 \cdot 0,0591 = 1,182 \text{ s}$ , luego el número mínimo de pasos de tiempo será:

$$N = \frac{1,182}{0,001} = 1182$$

Se ha decidido emplear un número máximo de 80 iteraciones por paso de tiempo. Es un número conservador, ya que en la mayoría de cada paso de tiempo la solución converja antes de cumplirse las 80 iteraciones.

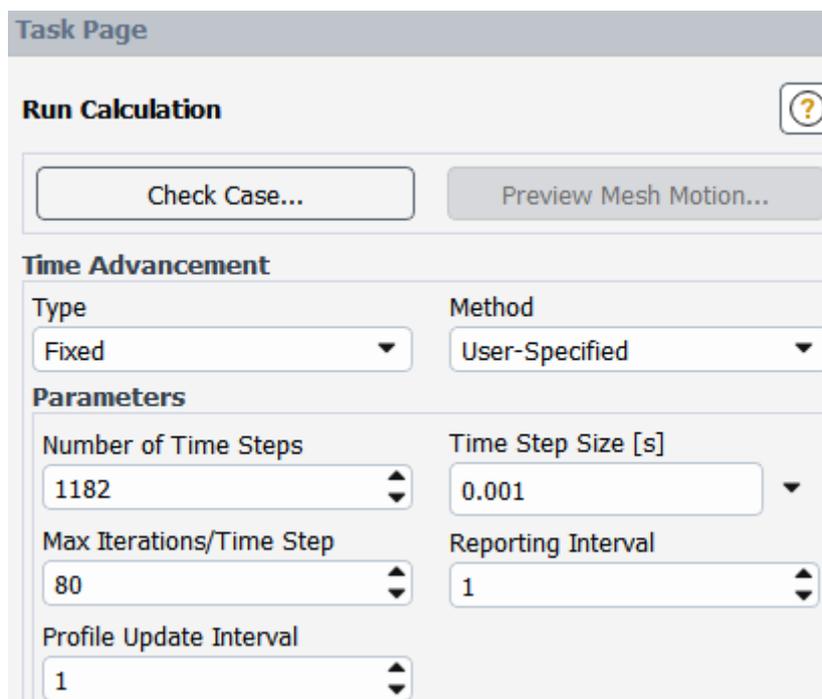


Figura 41. Configuración de los parámetros de simulación 4

---

La fase del Setup ya está concluida, habiéndose definido de manera exhaustiva todos los parámetros de resolución necesarios para la simulación, así como las características y propiedades del fluido involucrado. Esto incluye la configuración de criterios de convergencia, ajustes de discretización, y la especificación de condiciones de frontera, entre otros aspectos cruciales. Con todos estos elementos establecidos, el entorno de simulación está listo para proceder a la fase de ejecución, donde se realizarán las simulaciones según los parámetros previamente configurados para obtener resultados precisos y significativos.

## **5.5 RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA.**

Después de configurar el estudio, el software CFD procede a resolver las ecuaciones de flujo en cada celda de la malla mediante métodos numéricos. Como se comentó en el apartado, resuelve las ecuaciones aplicando el método de elemento finitos (MEF). La salida de la simulación incluye datos sobre el flujo, como velocidades, presiones, temperaturas, y fuerzas. En esta etapa de resolución, se ha solicitado adicionalmente al programa que calcule las fuerzas de arrastre y sustentación, así como los coeficientes correspondientes. Aunque los prototipos están seccionados a lo largo de su plano de simetría, no es necesario multiplicar las fuerzas totales obtenidas por dos para reflejar el impacto total en la geometría completa, ya que el programa lo tiene en cuenta [12]. Los coeficientes de arrastre y sustentación tampoco se multiplican por un factor de dos, ya que estos valores son específicos de las geometrías y reflejan la relación entre las fuerzas y las características geométricas independientemente del número de secciones. Esta distinción asegura que las fuerzas y los coeficientes se interpreten correctamente en el contexto de la simulación. Se realiza en el apartado Solution de la interfaz de Ansys workbench.

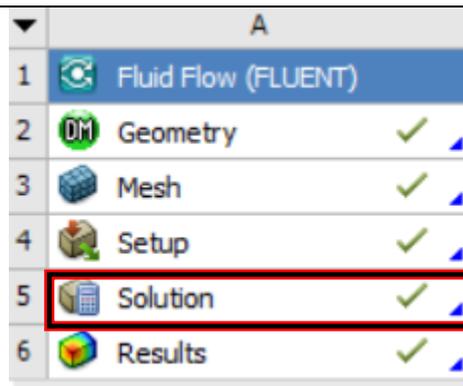


Figura 42. Operación Solution

En el caso del Ahmed body, su eje longitudinal coincide con la dirección del eje x negativo, luego para obtener la magnitud de su fuerza de arrastre se calcula en el vector  $(1,0,0)$ , ya que la fuerza de arrastre se opone al avance del vehículo. Del mismo modo, para obtener el valor de la fuerza de sustentación, se calcula en el vector  $(0,1,0)$ , coincidiendo con el eje vertical. En cambio, el eje longitud del modelo de vehículo se ha diseñado para que su eje esté alineado con el eje z negativo, luego la fuerza de arraste se calcula en la dirección  $(0, 0, -1)$  y la fuerza de sustentación en  $(0, 1, 0)$ .

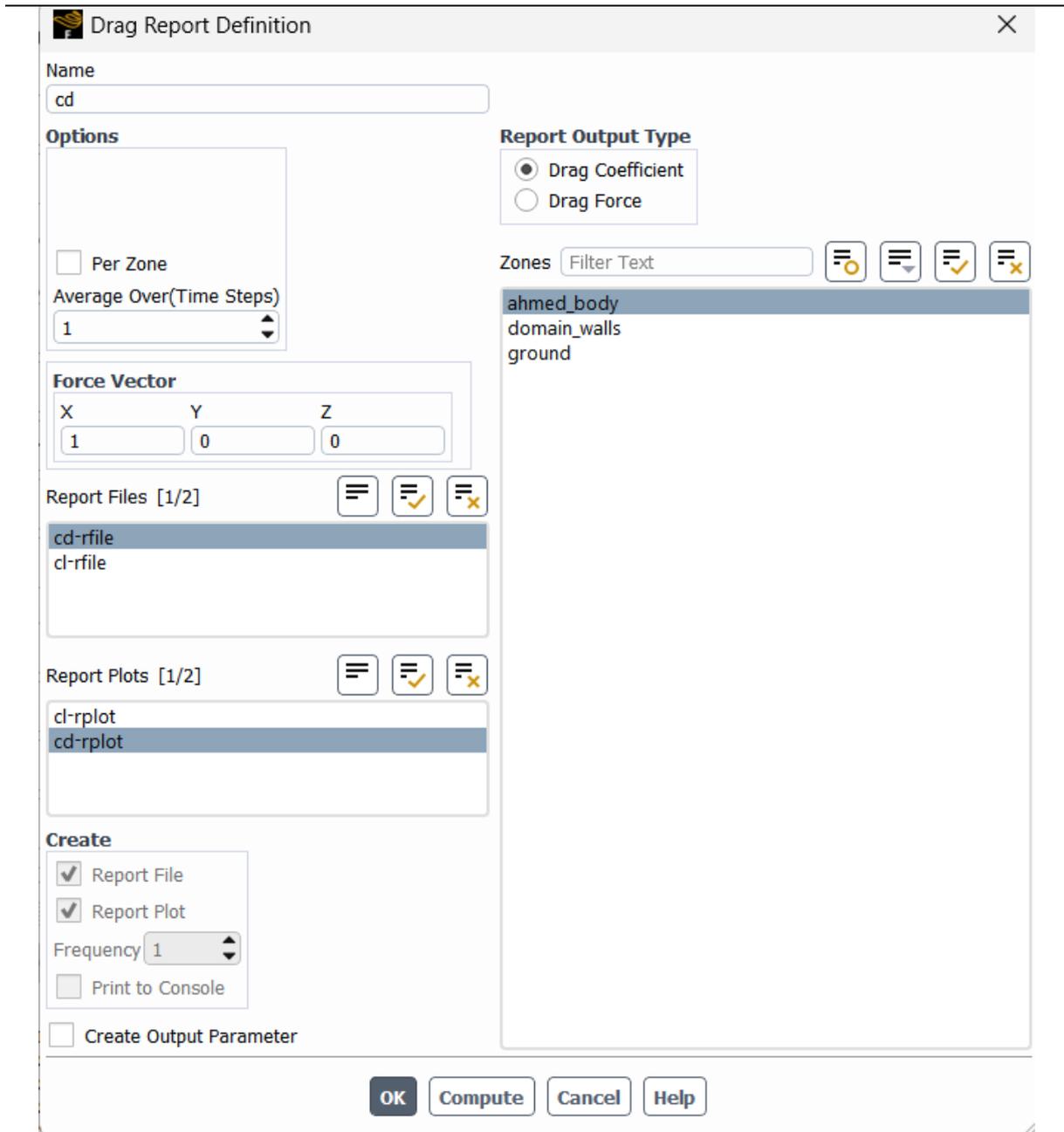


Figura 43. Obtención del coeficiente de arrastre

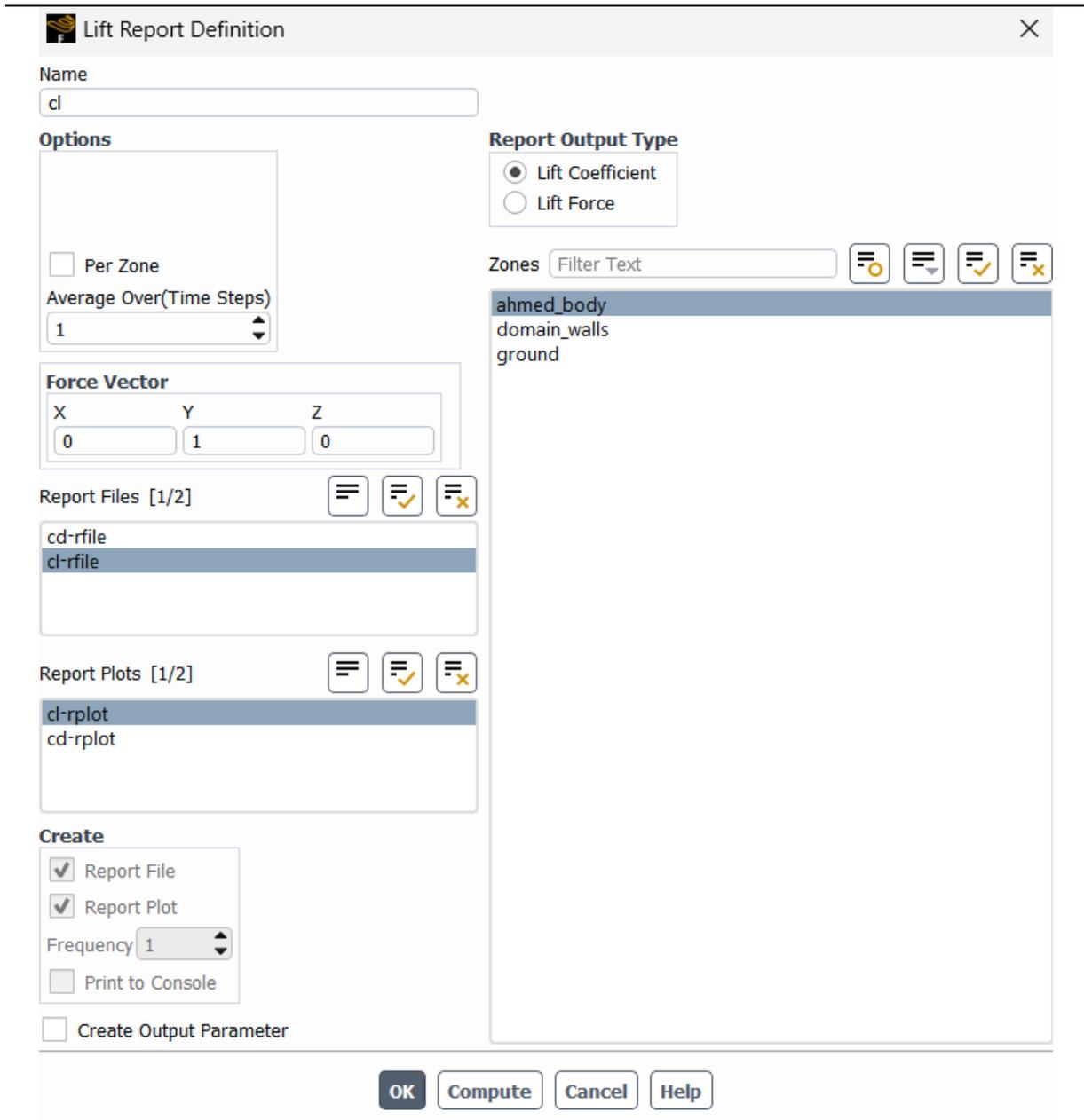


Figura 44. Obtención del coeficiente de sustentación

## 6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo se centra en el análisis detallado de los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas con el software Fluent para cada uno de los modelos de automóvil estudiados. Se examinan los datos generados por las simulaciones, evaluando el comportamiento aerodinámico de los vehículos bajo diversas condiciones de flujo de aire y velocidades. El objetivo principal de este análisis es identificar patrones, comparar el rendimiento aerodinámico entre los distintos modelos y comprender cómo los diferentes diseños afectan a parámetros clave como la resistencia aerodinámica, la generación de vórtices y el comportamiento del flujo alrededor de la carrocería. Además, se investigan las zonas de separación del flujo y los puntos donde se generan fuerzas de arrastre y sustentación, lo que permite una evaluación crítica del diseño aerodinámico de cada modelo. Este análisis se realiza en el apartado Results de la interfaz workbench de Ansys.

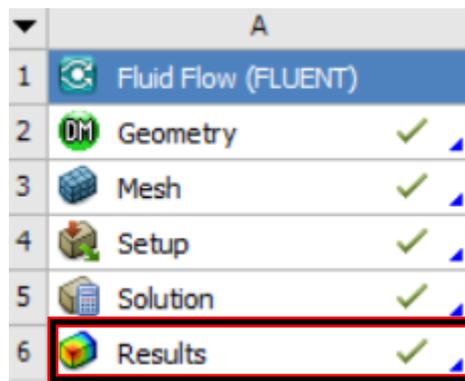


Figura 45. Operación Results

Como se ha mencionado anteriormente, las velocidades relativas de los modelos respecto al aire en las simulaciones son de 100 km/h para el Ahmed Body, mientras que para el vehículo se consideraron tres escenarios diferentes: a 72 km/h, a 100 km/h y a 120 km/h. Estas velocidades permiten comparar el comportamiento aerodinámico bajo diferentes condiciones de flujo, proporcionando una visión clara de cómo la resistencia aerodinámica y las fuerzas de sustentación varían en función de la velocidad y el tipo de modelo, permitiendo así evaluar las diferencias entre ambos en términos de eficiencia y estabilidad aerodinámica.

A continuación, se presentan en las imágenes de debajo los resultados correspondientes a las secciones frontales mitades proyectadas de los vehículos y las fuerzas de arrastre, desglosadas en sus componentes de presión y fricción, obtenidos a través de las simulaciones realizadas en ANSYS para cada diseño. Estos datos permitirán obtener matemáticamente los coeficientes de arrastre, a partir de las ecuaciones presentadas en el apartado 3.5.1. Tal como se explicó en el apartado 5, referente al dominio computacional, aunque trabajamos únicamente con la mitad del automóvil en las simulaciones, no es necesario multiplicar por dos los valores de cada esfuerzo calculado para obtener la fuerza total ejercida sobre el vehículo en su conjunto, ya que el programa tiene en cuenta la totalidad de los cuerpos, pero si es necesario multiplicar por dos las áreas proyectadas [12]. Esto garantiza una correcta interpretación y comparación de los resultados en términos de aerodinámico total del vehículo.

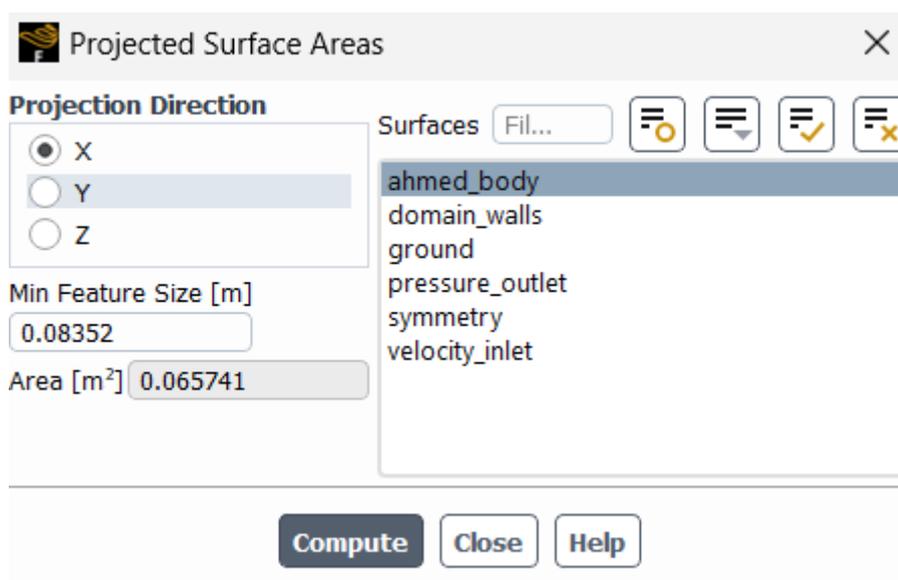


Figura 46. Área frontal proyectada del Ahmed Body

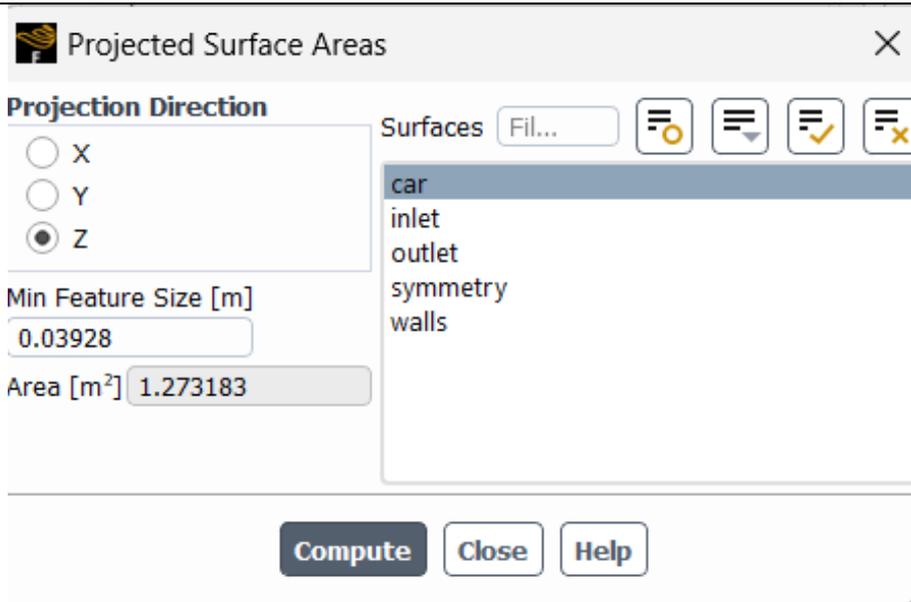


Figura 47. Área frontal proyectada del vehículo

Forces - Direction Vector (1 0 0)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
ahmed_body	7.1979185	1.4228218	8.6207403
-----			
Net	7.1979185	1.4228218	8.6207403

Figura 48. Fuerzas de arrastre del Ahmed body a 100 km/h

Forces - Direction Vector (0 0 -1)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
car	114.42897	7.0215846	121.45056
-----			
Net	114.42897	7.0215846	121.45056

Figura 49. Fuerzas de arrastre del vehículo a 72 km/h

Forces - Direction Vector (0 0 -1)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
car	224.68552	12.919956	237.60548
-----			
Net	224.68552	12.919956	237.60548

Figura 50. Fuerzas de arrastre del vehículo a 100 km/h

Forces - Direction Vector (0 0 -1)			
Zone	Forces [N]		
	Pressure	Viscous	Total
car	318.37779	17.914912	336.29271
-----			
Net	318.37779	17.914912	336.29271

Figura 51. Fuerzas de arrastre del vehículo a 120 km/h

MODELO	$C_D$	$F_{D\text{ PRESIÓN}}(N)$	$F_{D\text{ FRICCIÓN}}(N)$	$F_D(N)$
Ahmed Body	0,1366	7,1979	1,4228	8,6207
Vehículo 72 km/h	0,1947	114,429	7,0216	121,4506
Vehículo 100 km/h	0,1943	224,6855	12,9199	237,6055
Vehículo 100 km/h	0,1941	318,3778	17,9149	336,2927

Tabla 2. Resultados de Fuerzas Y Coeficientes de Arraste

La mayor contribución a la fuerza de arrastre en los modelos analizados proviene de su componente asociada a la presión, más que de la fricción o viscosidad, y esto queda claramente reflejado en los resultados obtenidos para todos los diseños simulados. En todos los casos, la componente de presión representa aproximadamente el 90% del total de la fuerza de arrastre, lo que indica que la mayor resistencia al avance que experimentan los vehículos se debe al diferencial de presión que se genera entre la parte frontal y la parte trasera del vehículo, causado por la separación del flujo de aire y la formación de zonas de baja presión detrás de la carrocería. Por el contrario, la fricción, que está relacionada con los efectos viscosos

del aire al interactuar con la superficie del vehículo, tiene una influencia mucho menor, contribuyendo solo con un pequeño porcentaje al arrastre total. Este comportamiento es típico en geometrías donde el flujo turbulento y la separación del aire juegan un papel predominante, como es el caso de los vehículos automotores y el Ahmed Body, donde la aerodinámica está marcada principalmente por las diferencias de presión, lo que justifica que los esfuerzos de diseño se centren en minimizar estas zonas de alta resistencia para mejorar la eficiencia.

A continuación, se presentan en las figuras de debajo resultados correspondientes al coeficiente y a las fuerzas de sustentación, desglosadas en sus componentes de presión y fricción, obtenidos a través de las simulaciones realizadas en ANSYS para cada diseño. Estos resultados permiten evaluar el comportamiento aerodinámico de los modelos en términos de la capacidad de generar sustentación negativa o downforce, ofreciendo una visión clara de cómo la presión y la fricción contribuyen a estas fuerzas, y cómo influyen en la estabilidad y el rendimiento del vehículo.

Forces - Direction Vector (0 1 0)			
Forces [N]			
Zone	Pressure	Viscous	Total
ahmed_body	4.1017619	0.027348168	4.12911
-----			
Net	4.1017619	0.027348168	4.12911

Figura 52. Fuerzas de sustentación del Ahmed Body a 100 km/h

Forces - Direction Vector (0 1 0)			
Forces [N]			
Zone	Pressure	Viscous	Total
car	-77.816991	0.6260531	-77.190938
-----			
Net	-77.816991	0.6260531	-77.190938

Figura 53. Fuerzas de sustentación del vehículo a 72 km/h

```

Forces - Direction Vector (0 1 0)
Zone      Forces [N]
car       Pressure      Viscous      Total
          -154.34675    1.1508602   -153.19589
-----
Net       -154.34675    1.1508602   -153.19589
    
```

Figura 54. Fuerzas de sustentación del vehículo a 100 km/h

```

Forces - Direction Vector (0 1 0)
Zone      Forces [N]
car       Pressure      Viscous      Total
          -208.91712    1.5834842   -207.33364
-----
Net       -208.91712    1.5834842   -207.33364
    
```

Figura 55. Fuerzas de sustentación del vehículo a 120 km/h

MODELO	$C_L$	$F_{L\text{ PRESIÓN}}(N)$	$F_{L\text{ FRICCIÓN}}(N)$	$F_L(N)$
Ahmed Body	0,0654	4,1018	0,0273	4,1291
Vehículo 72 km/h	-0,1237	-77,8170	0,6261	-77,1909
Vehículo 100 km/h	-0,1253	-154,3468	1,1509	-153,1959
Vehículo 120 km/h	-0,1200	-208,9171	1,5835	-207,3336

Tabla 3. Resultados de Fuerzas Y Coeficientes de Sustentación

En lo que respecta al vehículo, es crucial señalar que al aumentar la velocidad de 72 km/h a 100 km/h y luego a 120 km/h, las fuerzas de sustentación y arrastre casi se duplican y triplican, respectivamente. Este fenómeno se debe a que ambas fuerzas

---

aerodinámicas son directamente proporcionales al cuadrado de la velocidad, lo que implica que un pequeño incremento en la velocidad del vehículo provoca un aumento considerable tanto en la resistencia al avance como en la sustentación. El coeficiente de sustentación y la fuerza de sustentación tienen signo negativo en el vehículo debido a la generación de una fuerza descendente o downforce, que es esencial para mejorar la estabilidad y adherencia del vehículo al suelo, especialmente a altas velocidades. En la aerodinámica de los automóviles, una sustentación positiva (signo positivo) levantaría el vehículo, lo que reduciría la tracción y podría causar pérdida de control, similar a lo que ocurre en un avión cuando despega. Sin embargo, en los automóviles, el objetivo es el opuesto: generar una fuerza descendente que mantenga el vehículo firmemente en contacto con la carretera.

Este efecto se logra mediante el diseño de elementos aerodinámicos como alerones, difusores y la propia forma de la carrocería, que canalizan el flujo de aire de manera que la presión sobre la parte superior del vehículo sea mayor que la de la parte inferior. Según el principio de Bernoulli, esto crea una diferencia de presión que empuja el automóvil hacia abajo, lo que se refleja en un coeficiente y fuerza de sustentación negativos. Estos valores negativos son deseables, ya que mejoran la tracción, el manejo y la estabilidad del vehículo, particularmente en curvas y a altas velocidades.

Sin embargo, acorde con los resultados, el Ahmed body no tiene ni el coeficiente ni la fuerza de sustentación negativas debido a su diseño simplificado. A diferencia de un automóvil real, el Ahmed Body se utiliza principalmente para estudiar y entender el comportamiento del flujo de aire alrededor de una geometría básica, sin incorporar elementos aerodinámicos específicos destinados a generar downforce. Aunque el Ahmed Body tiene una inclinación en la parte trasera (slant angle), que afecta la separación del flujo y la presión en la parte trasera, esta inclinación no es suficiente para generar una fuerza de sustentación negativa significativa. En su diseño, la inclinación se centra en la simulación de la separación del flujo y la formación de vórtices, más que en la generación de downforce.

Con el objetivo de complementar nuestro estudio aerodinámico, procederemos a analizar las gráficas generadas por ANSYS, que simulan las líneas de corriente del flujo de aire, así como los campos de velocidad y presión. En primer lugar, nos enfocaremos en el Ahmed Body para entender los fenómenos básicos del flujo, como la separación del aire y la formación de vórtices, que son fundamentales para la

---

aerodinámica de un automóvil. Esta comprensión inicial nos permitirá establecer una base sólida antes de avanzar al análisis del modelo de vehículos específico, proporcionando una visión más detallada de cómo estos fenómenos afectan la resistencia al avance y la sustentación.

## 6.1 AHMED BODY

Los diagramas de velocidad y presión que se generan en torno a este modelo ayudan a comprender fenómenos como el estancamiento, la recirculación del flujo, la formación de vórtices y el desprendimiento de la capa límite. Estos conceptos son clave para entender la resistencia aerodinámica y cómo el diseño influye en la eficiencia de un vehículo. La combinación de estos fenómenos crea una compleja interacción de fuerzas que afecta el desempeño aerodinámico de cualquier automóvil, lo cual se puede visualizar claramente en los diagramas asociados al Ahmed Body.

En la parte frontal del Ahmed Body, el flujo de aire que se mueve hacia el cuerpo impacta directamente en la superficie, creando un punto de estancamiento. En esta zona, la velocidad del aire se reduce drásticamente a cero, lo que resulta en un aumento de presión en la parte frontal del cuerpo. Este comportamiento es crucial, ya que una mayor presión en esta área contribuye a la resistencia frontal del vehículo, uno de los componentes principales de la resistencia aerodinámica. En los diagramas de velocidad, esta región se manifiesta con tonos azules, indicando baja velocidad, mientras que en el diagrama de presiones se verá una zona de alta presión (colores más cálidos), que es directamente proporcional al estancamiento del flujo.

A medida que el flujo de aire se desplaza hacia la parte superior del Ahmed Body, la velocidad aumenta debido a la curvatura suave del cuerpo y la ausencia de obstrucciones significativas. Este aumento de velocidad provoca una disminución en la presión, siguiendo el principio de Bernoulli, que establece que, en un fluido en movimiento, la presión disminuye cuando la velocidad aumenta. Esta región de alta velocidad y baja presión es crucial para reducir la resistencia aerodinámica, ya que genera una distribución de presión favorable en la parte superior del vehículo. En los diagramas de velocidad, se observan colores más cálidos que representan este incremento de velocidad, mientras que el diagrama de presiones muestra una

---

disminución significativa en esta zona, lo que es esencial para un flujo eficiente sobre el cuerpo.

El desprendimiento de la capa límite es un fenómeno crítico que ocurre en la parte trasera del Ahmed Body, especialmente en la región del ángulo inclinado o slant angle. En esta zona, el flujo de aire no puede seguir pegado a la superficie del cuerpo debido a la geometría del vehículo y se separa, creando una región de recirculación de flujo. Este desprendimiento genera un área de baja velocidad y presión en la estela del Ahmed Body, lo que aumenta la resistencia aerodinámica. Los diagramas de velocidad muestran esta región de baja velocidad con tonos azules y verdes en la parte trasera del cuerpo, mientras que el diagrama de presiones refleja una caída pronunciada en la presión, lo que genera una fuerza que tira hacia atrás del vehículo y contribuye significativamente al arrastre aerodinámico.

En la parte trasera del Ahmed Body, el desprendimiento del flujo genera la formación de vórtices. Estos vórtices son estructuras de flujo circular que se forman debido a la diferencia de presiones entre las zonas de alta velocidad (baja presión) y las zonas de baja velocidad (alta presión) en la estela. Los vórtices incrementan la turbulencia y amplifican la resistencia aerodinámica, ya que la energía se disipa en la estela del vehículo. En los diagramas de velocidad, estos vórtices pueden visualizarse como áreas de flujo inestable con velocidades fluctuantes, mientras que en los diagramas de presión se ven como zonas de baja presión, que resultan del flujo separado. Cuanto mayor es la magnitud de los vórtices, mayor será la resistencia aerodinámica y el consumo de energía del vehículo.

Por último, el slant angle (o ángulo de inclinación trasera) del Ahmed Body tiene un papel crucial en la aerodinámica del flujo en la parte trasera del vehículo. Un ángulo inclinado suavemente permite que el flujo permanezca adherido a la superficie del cuerpo por más tiempo, lo que reduce la magnitud del desprendimiento de la capa límite y, por tanto, disminuye la zona de baja presión y los vórtices en la estela. Sin embargo, un ángulo más pronunciado provoca una separación temprana del flujo, aumentando la recirculación, los vórtices y la resistencia aerodinámica. El control de este ángulo es fundamental para optimizar el diseño aerodinámico del vehículo, ya que afecta directamente la eficiencia y el consumo de combustible. Por tanto, tanto en los diagramas de velocidad como de presión, el diseño adecuado del slant angle

---

es esencial para minimizar los efectos adversos del flujo separado en la parte trasera del vehículo.

La figura 58, correspondiente al diagrama de la trayectoria del flujo, nos ofrece una visión clara sobre los conceptos de flujo laminar y turbulento. En la parte delantera del Ahmed Body, el flujo de aire se mueve inicialmente en una capa laminar, es decir, en capas suaves y ordenadas. El aire se acerca al modelo desde la parte frontal, donde la forma relativamente redondeada ayuda a que el flujo se adhiera a la superficie del cuerpo durante una cierta distancia. A medida que el aire avanza a lo largo del Ahmed Body, especialmente cuando llega a la transición desde la parte delantera a la zona de inclinación trasera, el flujo tiende a separarse de la superficie del cuerpo. La inclinación de la parte trasera (slant angle) induce la separación del flujo, creando una zona de baja presión detrás del modelo. Esta separación del flujo se evidencia por la formación de una región turbulenta que se aleja del cuerpo. La separación del flujo en la parte trasera del Ahmed Body genera vórtices significativos. Estos vórtices son remolinos de aire que se forman debido a la interacción entre el flujo separado y el aire que rodea el modelo. En el Ahmed Body, se observa un vórtice principal que se forma en la parte superior trasera del modelo y un vórtice secundario en la parte inferior.

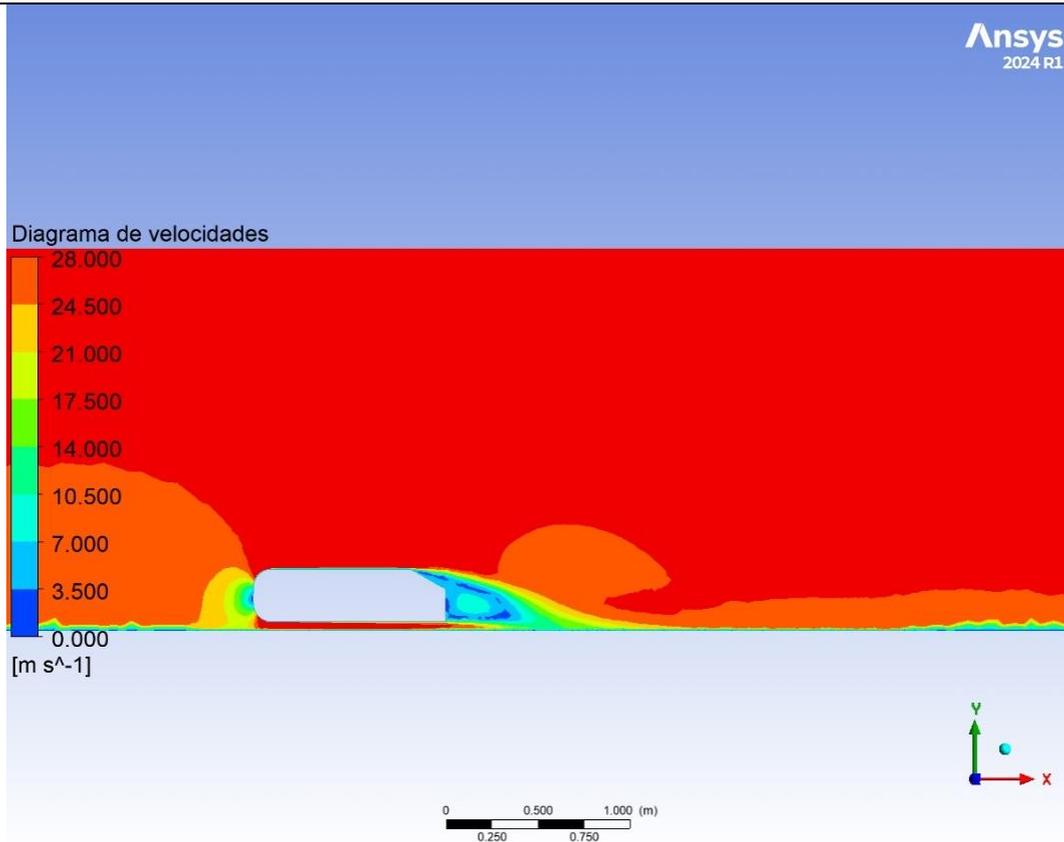


Figura 56. Diagrama de velocidades del Ahmed Body

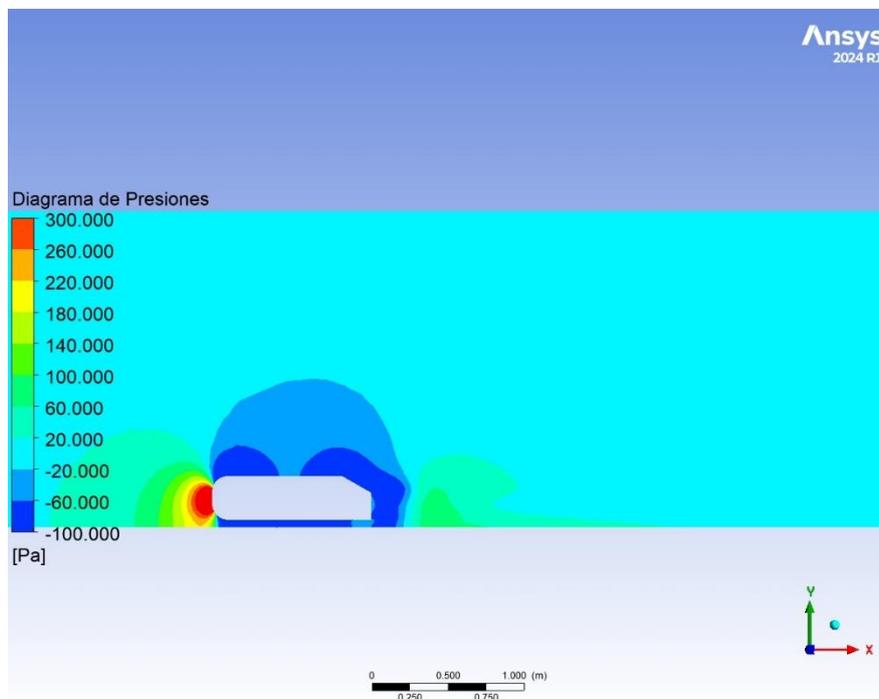


Figura 57. Diagrama de presiones del Ahmed Body

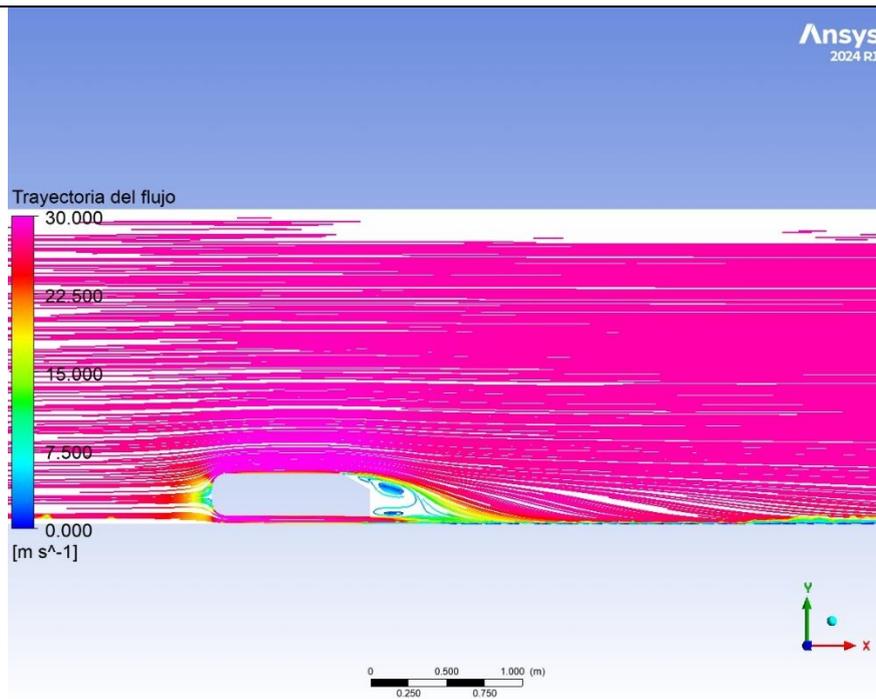


Figura 58. Diagrama de trayectoria del flujo del Ahmed Body

## 6.2 MODELO DE VEHÍCULO

El diagrama de velocidades alrededor de un vehículo muestra cómo se comporta el flujo de aire a medida que este interactúa con las distintas superficies del automóvil. Cuando el aire impacta en la parte frontal del vehículo, se produce un punto de estancamiento, donde la velocidad del aire disminuye considerablemente hasta casi detenerse. En esta región, el flujo se encuentra con una obstrucción directa y la energía cinética del aire se transforma en presión. Este fenómeno crea una zona de alta presión en el frente del vehículo, lo que contribuye a la resistencia aerodinámica. El aire, al no poder atravesar el vehículo, se ve forzado a desviarse hacia los lados y la parte superior, acelerándose conforme se aleja del punto de estancamiento.

El flujo de aire en la parte superior del vehículo, representado en color naranja en la figura 59, mantiene la velocidad de entrada porque no interactúa directamente con la carrocería del coche. Este flujo sigue una trayectoria paralela al techo del vehículo sin verse afectado por la geometría del mismo, lo que indica que no se producen perturbaciones significativas que alteren su velocidad o dirección. Dado que no se encuentra con obstáculos ni cambios bruscos en la forma del cuerpo, el flujo se

---

mantiene en un régimen laminar, caracterizado por capas de aire que se deslizan suavemente entre sí sin mezclarse ni generar turbulencia. Esto es típico en las regiones alejadas de superficies sólidas y angulaciones pronunciadas, donde el aire fluye de manera estable y uniforme, manteniendo las características de la velocidad de entrada. En esta área, el flujo laminar no experimenta los efectos de la fricción ni la separación que suelen ocurrir en las superficies del vehículo, lo que contribuye a una aerodinámica más eficiente en esa región.

A medida que el aire fluye por el capó y el techo del vehículo, la velocidad aumenta, siendo superior a la velocidad de entrada, apareciendo zonas con color rojo, un comportamiento que se explica por el principio de Bernoulli. Según este principio, en un flujo de fluido, cuando la velocidad aumenta, la presión disminuye. En el diagrama de presiones, se observa que esta aceleración del aire sobre el techo genera una zona de baja presión. Este efecto es deseable en términos aerodinámicos, ya que ayuda a reducir la resistencia del vehículo. Sin embargo, también puede generar una pequeña fuerza de sustentación, lo que en algunos casos puede tener un impacto negativo en la estabilidad del vehículo a altas velocidades. Controlar este equilibrio entre velocidad y presión es clave para el diseño eficiente del vehículo.

El flujo de aire comienza a enfrentar problemas mayores en la parte trasera del vehículo, donde la forma del automóvil provoca un desprendimiento de la capa límite. La capa límite es la fina capa de aire en contacto con la superficie del vehículo, que, en condiciones ideales, sigue el contorno del automóvil sin separarse. Sin embargo, debido a la geometría de la parte trasera, que en nuestro caso es abrupta e inclinada, el aire se separa de la superficie, creando una zona de recirculación. En el diagrama de velocidad, estas zonas se visualizan como regiones de baja velocidad y turbulencia en colores azules. En el diagrama de presiones, la recirculación se traduce en áreas de baja presión detrás del vehículo, contribuyendo de manera significativa a la resistencia aerodinámica por arrastre.

Un fenómeno asociado con la recirculación del flujo es la formación de vórtices en los bordes traseros del vehículo, especialmente en las esquinas entre el techo y la parte posterior. Estos vórtices surgen debido a la diferencia de presiones entre las zonas de alta velocidad (y baja presión) en el flujo libre y las zonas de baja velocidad (y alta presión) en el área de estancamiento y recirculación. Los vórtices no solo incrementan la turbulencia en la estela del vehículo, sino que también intensifican la resistencia

---

aerodinámica. En el diagrama de velocidades, los vórtices se visualizan como patrones de flujo circular y de baja velocidad en la parte trasera, mientras que en el diagrama de presiones se manifiestan como una caída drástica de presión detrás del vehículo.

Finalmente, es importante entender cómo el diseño de la parte trasera del vehículo afecta el comportamiento del flujo de aire. Si la forma trasera es abrupta, como en los sedanes, el flujo se separará temprano, generando una estela grande y turbulenta con una gran bajada de presión. Por otro lado, si la parte trasera es suavemente inclinada, como en los vehículos tipo "fastback", el flujo puede permanecer pegado a la superficie por más tiempo, reduciendo la zona de recirculación y la resistencia aerodinámica. Este es un principio crucial en el diseño de vehículos, ya que un flujo más adherido y controlado en la parte trasera reduce significativamente el arrastre aerodinámico y mejora la eficiencia del vehículo.

La formación de vórtices en la parte trasera del vehículo es un fenómeno aerodinámico clave que ocurre cuando el flujo de aire se separa de la superficie del vehículo, generando zonas de baja presión y turbulencias. En el diagrama de trayectoria de flujo, correspondiente a la figura 61, se puede observar cómo, al moverse el aire alrededor del vehículo, las partículas de aire siguen trayectorias suaves en la parte frontal y lateral, pero al llegar a la parte trasera, el flujo pierde adherencia con la superficie debido a la abrupta caída de la geometría. Esto provoca la separación del flujo, donde el aire ya no sigue el contorno del vehículo y en su lugar forma remolinos o vórtices.

Estos vórtices generan una zona de baja presión detrás del vehículo, conocida como región de estela, lo que resulta en una fuerza de arrastre (drag) significativamente mayor. Esta resistencia aumenta la demanda de potencia del motor, afectando negativamente el consumo de combustible y la eficiencia aerodinámica. En vehículos con diseños aerodinámicos optimizados, se busca reducir la formación de estos vórtices utilizando formas que minimicen la separación del flujo, o mediante el uso de dispositivos como difusores o alerones que controlen el flujo de aire y disminuyan la resistencia al avance. Los vórtices no solo incrementan el consumo energético, sino que también afectan la estabilidad del vehículo, especialmente a altas velocidades.

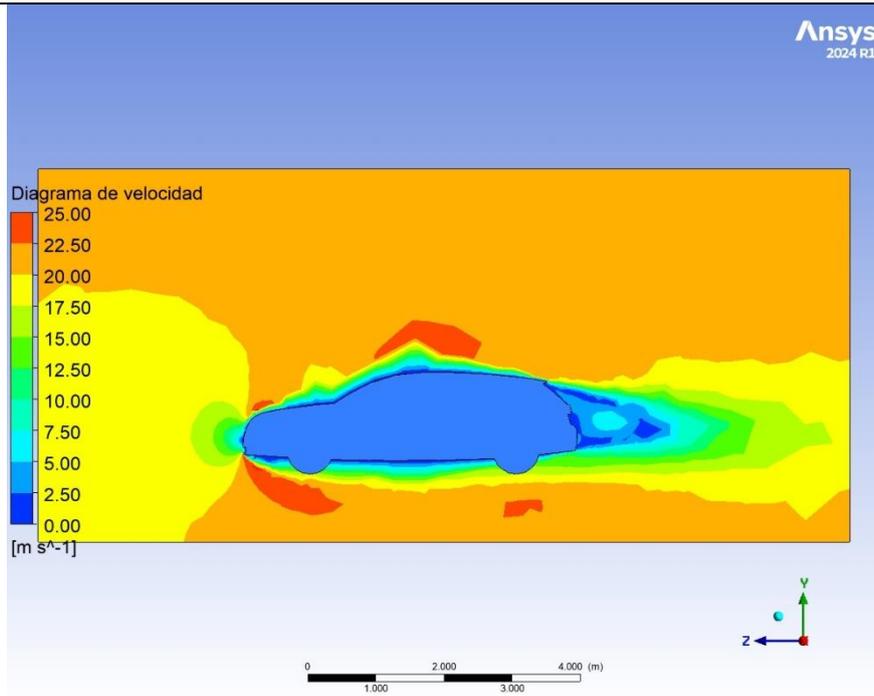


Figura 59. Diagrama de velocidades del vehículo

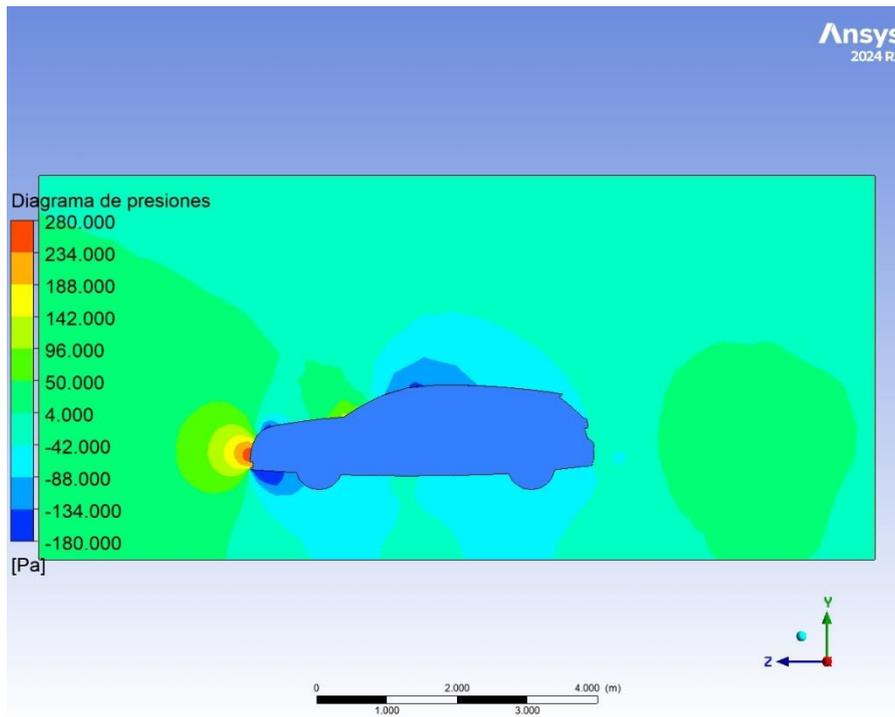


Figura 60. Diagrama de presiones del vehículo

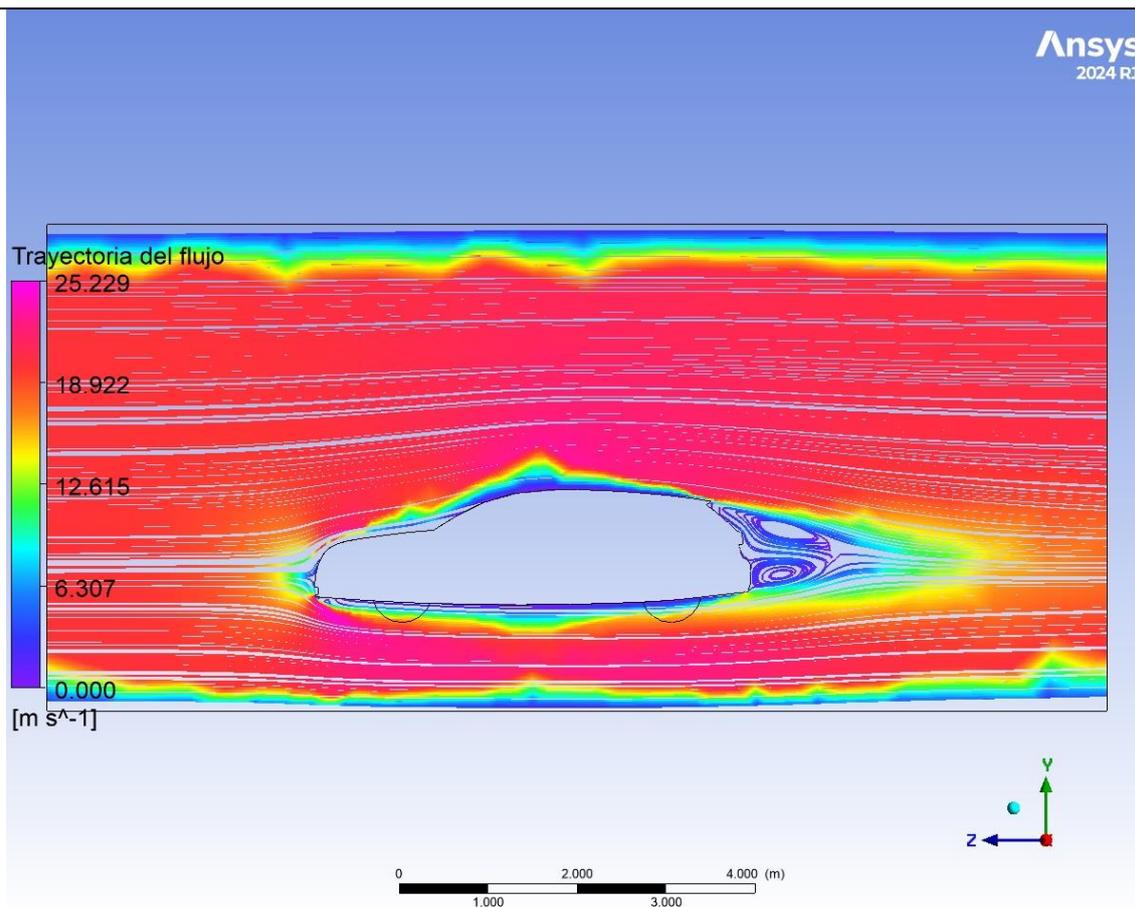


Figura 61. Diagrama de trayectoria del flujo del vehículo

---

### 6.3 IMPACTO ENERGÉTICO EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD

En este apartado, se va a realizar el cálculo de los litros de gasolina necesarios para vencer la fuerza de arrastre o resistencia aerodinámica del modelo de vehículo, es decir, solo se tendrá en cuenta el consumo de gasolina asociada a la aerodinámica, no al peso del propio vehículo. El objetivo es demostrar que un ligero cambio en la velocidad del vehículo tiene un gran impacto en el consumo energético. Es importante comprender la relación entre la energía que el vehículo debe consumir para superar esta resistencia y la eficiencia del motor. La fuerza de arrastre es la resistencia que el aire ofrece al movimiento del vehículo y aumenta con la velocidad. Como se explicó en el apartado 3.5.1, esta resistencia es proporcional al cuadrado de la velocidad, lo que significa que cuanto más rápido se desplaza un automóvil, mayor es la resistencia del aire que tiene que vencer. Por lo tanto, antes de comenzar con los cálculos, es lógico pensar que el consumo de gasolina será superior cuando el automóvil circula a 120 km/h que cuando lo hace a 100 km/h o a 72 km/h.

Para realizar esta estimación, tomaremos como punto de partida los resultados obtenidos para la fuerza de arrastre en el modelo de vehículo. En las ecuaciones inferiores, el subíndice 1 hará relación a la velocidad de 72 km/h, el subíndice 2 a 100 km/h y el subíndice 3 a 120 km/h. Por lo tanto, atendiendo a los resultados obtenidos en el apartado 5, las fuerzas de arrastre totales quedan:

$$F_{d1} = 121,4506 \text{ N}$$

$$F_{d2} = 237,6055 \text{ N}$$

$$F_{d3} = 336,2927 \text{ N}$$

El siguiente paso en el análisis consiste en calcular la potencia consumida como consecuencia de la resistencia aerodinámica que experimenta el vehículo durante su movimiento. Para ello, es necesario multiplicar la fuerza de arrastre por la velocidad a la que se desplaza el automóvil en cada caso. La potencia, que es una medida de la tasa a la cual se realiza trabajo o se consume energía, se obtiene en este caso al relacionar directamente la magnitud de la fuerza que el vehículo debe vencer debido a la resistencia del aire y la velocidad con la que se mueve a través de dicho medio.

Matemáticamente, la potencia se expresa como  $P = F \cdot v$ . Este cálculo es fundamental porque permite cuantificar la energía requerida por el vehículo para superar el impacto aerodinámico a una velocidad determinada, proporcionando una medida clave para evaluar el consumo energético y la eficiencia del diseño en términos de aerodinámica. A medida que la velocidad aumenta, la potencia consumida también crece de manera significativa, ya que la fuerza de arrastre es proporcional al cuadrado de la velocidad, lo que subraya la importancia de este cálculo en el análisis del rendimiento vehicular. Para que el resultado de la potencia quede en vatios (W), es necesario que la velocidad quede expresada en m/s. De ahí que 72 km/h, 100 km/h y 120 km/h se transformen a 20 m/s, 28 m/s y 33,33 m/s.

$$P_1 = F_{d1} \cdot v_1 = 121,4506 \cdot 20 = 2429,0120 \text{ W}$$

$$P_2 = F_{d2} \cdot v_2 = 237,6055 \cdot 28 = 6652,9540 \text{ W}$$

$$P_3 = F_{d3} \cdot v_3 = 336,2927 \cdot 33,33 = 11208,6357 \text{ W}$$

Se ha definido una distancia representativa de 100 kilómetros, correspondiente al trayecto entre las ciudades de Santander y Bilbao, sobre la cual se calcularán los litros de gasolina consumidos por el vehículo. Esta distancia ha sido elegida como un caso de estudio para evaluar el impacto del consumo de combustible relacionado exclusivamente con la resistencia aerodinámica a lo largo de un recorrido concreto. Al establecer esta distancia, es posible calcular de manera precisa el consumo de combustible en función de las condiciones aerodinámicas y, proporcionando una referencia realista y relevante para cuantificar la eficiencia del vehículo en una situación de conducción específica. A continuación, se calcula el tiempo que tardará el automóvil en recorrer esa distancia en cada caso:

$$t_1 = \frac{d}{v_1} = \frac{100 \text{ km}}{72 \text{ km/h}} = 1,3889 \text{ h} = 5000 \text{ s}$$

$$t_2 = \frac{d}{v_2} = \frac{100 \text{ km}}{100 \text{ km/h}} = 1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$$

$$t_3 = \frac{d}{v_3} = \frac{100 \text{ km}}{120 \text{ km/h}} = 0,8333 \text{ h} = 3000 \text{ s}$$

El siguiente paso es calcular la energía necesaria requerida por el automóvil para vencer la fuerza de arrastre durante la distancia de 100 km. Esto se hace multiplicando la potencia consumida por el tiempo empleado en recorrer esos 100 km.

$$E_1 = P_1 \cdot t_1 = 2429,012 \cdot 5000 = 12145060 \text{ J} = 12,15 \cdot 10^3 \text{ KJ}$$

$$E_1 = P_1 \cdot t_1 = 6652,954 \cdot 3600 = 23950634,4 \text{ J} = 23,95 \cdot 10^3 \text{ KJ}$$

$$E_1 = P_1 \cdot t_1 = 11208,6357 \cdot 3000 = 33625907,1 \text{ J} = 33,63 \cdot 10^3 \text{ KJ}$$

El Poder Calorífico Inferior de la gasolina es de 43500 kJ/kg y su densidad es 0,720 kg/l. Debido al rendimiento limitado del vehículo, no es posible aprovechar todo el Poder Calorífico Inferior (PCI) del combustible. Esto se debe a que una parte significativa de la energía liberada durante la combustión se pierde en forma de calor y fricción, tanto en el motor como en los sistemas auxiliares. Como resultado, solo una fracción del PCI se convierte en energía útil para mover el vehículo, mientras que el resto se disipa, reduciendo la eficiencia global del proceso de conversión de energía en trabajo mecánico. Por lo tanto, para obtener la energía útil disponible para el vehículo, es necesario multiplicar el Poder Calorífico Inferior (PCI) por el rendimiento del motor, que se ha establecido en un 38%, atendiendo a los datos que proporcionan las marcas de automóviles actuales. Esto nos permite calcular la cantidad real de energía que se aprovecha del combustible, ya que no toda la energía contenida en el PCI se convierte en trabajo útil debido a las pérdidas.

$$PCI' = PCI \cdot \eta = 43500 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} \cdot 0,38 = 16530 \text{ KJ/Kg}$$

A partir de los datos anteriores, y conociendo las energías de las fuerzas de arrastre es posible calcular cuantos litros tiene que consumir el motor para vencer la fuerza aerodinámica en cada caso. Matemáticamente, se calcula como:

$$V_1 = \frac{\text{masa de combustible}}{\text{densidad de combustible}} = \frac{\frac{12,15 \cdot 10^3 \text{ KJ}}{16,53 \cdot 10^3 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}}}{0,720 \frac{\text{kg}}{\text{l}}} = 1,0209 \text{ l}$$

$$V_2 = \frac{\text{masa de combustible}}{\text{densidad de combustible}} = \frac{\frac{23,95 \cdot 10^3 \text{ KJ}}{16,53 \cdot 10^3 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}}}{0,720 \frac{\text{kg}}{\text{l}}} = 2,0123 \text{ l}$$

$$V_2 = \frac{\text{masa de combustible}}{\text{densidad de combustible}} = \frac{\frac{33,63 \cdot 10^3 \text{ KJ}}{16,53 \cdot 10^3 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}}}{0,720 \frac{\text{kg}}{\text{l}}} = 2,8257 \text{ l}$$

Estos resultados demuestran que aumentar la velocidad de 72 km/h a 100 km/h (un incremento del 39%) y luego a 120 km/h (un incremento del 67%) conlleva un consumo de gasolina que prácticamente se duplica y triplica, respectivamente, debido a la necesidad de superar la resistencia aerodinámica. A una velocidad de 72 km/h, el consumo de combustible es de 1,0209 €/100 km, mientras que al incrementar la velocidad a 100 km/h y 120 km/h, el consumo aumenta a 2,0123 €/100 km y 2,8257 €/100 km, respectivamente. Este comportamiento se debe a que la fuerza de arrastre crece exponencialmente con la velocidad, lo que exige una mayor potencia del motor y un considerable aumento en el consumo de combustible.

Considerando que la vida útil de un automóvil es de aproximadamente 350.000 km y que el precio promedio de la Gasolina 95 en el año 2024 es de 1,626 €/litro, el ahorro económico resultante de una disminución en la velocidad será:

$$(2,8257 - 2,0123) \frac{\text{litros}}{100 \text{ km}} \cdot \frac{1,626 \text{ €}}{\text{litro}} \cdot 350000 \text{ km} = 4.629,06 \text{ €}$$

$$(2,8257 - 1,0209) \frac{\text{litros}}{100 \text{ km}} \cdot \frac{1,626 \text{ €}}{\text{litro}} \cdot 350000 \text{ km} = 10.271,12 \text{ €}$$

Circular en una autopista a 100 km/h en lugar de hacerlo al límite máximo permitido de 120 km/h supone una significativa reducción económica en términos de consumo de combustible. Este ahorro, debido únicamente a la disminución de la fuerza de arrastre aerodinámica, puede superar los 4.500 euros a lo largo de la vida útil del vehículo. La fuerza de arrastre aumenta de manera exponencial con la velocidad, lo que implica que pequeñas reducciones en la velocidad pueden generar grandes beneficios en el consumo y, por ende, en los costos operativos del automóvil.

Debido a los efectos aerodinámicos, un conductor que transite por carreteras secundarias a velocidades de 70-80 km/h experimentará un ahorro significativo en costos de combustible, superior a 10.000€ en comparación con un conductor que opere su vehículo a altas velocidades en autopistas durante la vida útil del mismo. Este ahorro se debe a que, a mayores velocidades, como las que se encuentran en las autopistas, la resistencia aerodinámica aumenta considerablemente, lo que incrementa el consumo de combustible. En contraste, a velocidades más bajas, como las de las carreteras secundarias, la resistencia al avance es menor, lo que resulta en una reducción del gasto en combustible y, por ende, en un ahorro económico substancial a lo largo de la vida del vehículo.

---

## 7 CONCLUSIONES

El análisis aerodinámico de cuerpos como el Ahmed Body es una herramienta fundamental para entender los fenómenos asociados a la dinámica de fluidos que afectan tanto a los vehículos convencionales como a las formas simplificadas que se utilizan en la investigación y el diseño. Al comparar un modelo de vehículo con el Ahmed Body, se exploran conceptos clave como las fuerzas de arrastre y sustentación, los regímenes de flujo (laminar y turbulento), los efectos de los vórtices y la aplicación de la ecuación de Bernoulli en el diseño aerodinámico de automóviles.

El Ahmed Body es una geometría simplificada que reproduce características aerodinámicas similares a las de un automóvil real. Este modelo, desarrollado por S. R. Ahmed en 1984, permite investigar los efectos de la separación del flujo en la carrocería de un vehículo, la formación de vórtices, y el impacto de la geometría en las fuerzas de resistencia y sustentación. Si bien no tiene una apariencia idéntica a un automóvil de producción, el Ahmed Body conserva las propiedades aerodinámicas clave, como la inclinación de la parte trasera (slant angle) que es crucial en la generación de vórtices.

En un automóvil real, la geometría es mucho más compleja, con múltiples elementos aerodinámicos, incluidos alerones, difusores, y detalles en la carrocería diseñados específicamente para gestionar el flujo de aire. Sin embargo, ambos modelos comparten principios aerodinámicos fundamentales que permiten el estudio comparativo de fenómenos como el arrastre aerodinámico y la sustentación.

En el contexto de un vehículo, la fuerza de arrastre o resistencia aerodinámica es la fuerza que actúa en dirección opuesta al movimiento del vehículo a través del aire. Esta fuerza depende en gran medida de la forma del cuerpo, la velocidad del vehículo, la densidad del aire, y el área frontal del vehículo. El Ahmed Body, con su forma simple, destaca por tener un flujo notablemente separado en la parte trasera debido a su inclinación, lo que genera una alta presión en la parte delantera y una baja presión detrás, creando un gradiente de presión que contribuye a la resistencia.

En comparación, un modelo de vehículo real tiene formas más refinadas, con la intención de minimizar la separación del flujo y reducir la resistencia. Los fabricantes emplean soluciones como bordes redondeados, spoilers y difusores para controlar la separación del flujo y minimizar las zonas de presión baja detrás del vehículo. El

---

objetivo es reducir el coeficiente de arrastre ( $C_d$ ), un número adimensional que refleja la eficiencia aerodinámica del vehículo. Un vehículo de diseño optimizado puede alcanzar valores de  $C_d$  tan bajos como 0.15, mientras que el Ahmed Body tiene un coeficiente de arrastre de aproximadamente 0.29 a 0.33 dependiendo del ángulo de inclinación (a escala 4:1).

La fuerza de sustentación, que en un automóvil se expresa en términos de "levantamiento" o "downforce", es otra consideración crucial. En el Ahmed Body, los cambios en el ángulo de inclinación trasera influyen significativamente en la magnitud de la sustentación. Una inclinación mayor provoca una mayor separación del flujo, lo que genera una mayor sustentación. En los automóviles, se busca controlar esta fuerza para generar una sustentación negativa y mejorar el agarre, ya que una sustentación positiva en exceso puede hacer que el vehículo pierda adherencia al suelo, disminuyendo el control y la estabilidad a altas velocidades. El uso de alerones y difusores ayuda a generar una sustentación negativa (downforce), que mejora la tracción y la maniobrabilidad, especialmente en vehículos deportivos. En nuestro estudio, como se puede observar en el apartado 6, el Ahmed Body tiene una sustentación positiva y el vehículo la tiene negativa. Esto quiere decir que el diseño simplificado del Ahmed Body no logra generar downforce, el cual es clave para mantener la estabilidad.

El comportamiento del flujo de aire alrededor de un objeto depende de varios factores, incluyendo su velocidad y la geometría del objeto. En el caso de un automóvil o el Ahmed Body, el flujo de aire que rodea la superficie puede estar en dos regímenes principales: laminar o turbulento.

El flujo laminar es un flujo suave y ordenado en el que las partículas de aire se mueven en capas paralelas sin mezclarse. Este tipo de flujo ocurre típicamente en la parte delantera del Ahmed Body o de un vehículo, donde la velocidad relativa del aire es baja y la superficie es relativamente lisa. El flujo laminar es deseable en términos de resistencia aerodinámica, ya que genera menos fricción en la superficie del vehículo.

Sin embargo, a medida que el aire fluye hacia atrás, la velocidad relativa aumenta y se generan inestabilidades en el flujo, lo que provoca una transición hacia un flujo turbulento. En esta fase, las partículas de aire comienzan a mezclarse, creando pequeñas corrientes y vórtices que incrementan la resistencia aerodinámica debido a

---

la fricción y a la energía perdida en la formación de estos remolinos. En el Ahmed Body, esta transición del flujo laminar al turbulento suele ocurrir en la parte media del cuerpo, y los vórtices principales se desarrollan en la parte trasera debido a la separación del flujo. En un vehículo real, esta transición es controlada cuidadosamente a través del diseño de la carrocería para minimizar la resistencia.

El flujo turbulento en los vehículos puede ser gestionado mediante aditamentos aerodinámicos como difusores y aletas, que ayudan a controlar la separación del flujo en la parte trasera y a reducir la magnitud de los vórtices. Los difusores, por ejemplo, aceleran el flujo de aire debajo del vehículo, reduciendo la presión y ayudando a generar un downforce adicional, lo cual no se observa en el Ahmed Body, que carece de esos detalles refinados.

La ecuación de Bernoulli, que relaciona la presión y la velocidad de un fluido en movimiento, es crucial en el análisis aerodinámico. Según esta ecuación, cuando la velocidad del aire aumenta, la presión disminuye. Este principio se aplica tanto en el Ahmed Body como en un modelo de vehículo para entender la distribución de presión alrededor de la carrocería.

En la parte delantera del Ahmed Body, el aire se desacelera debido al impacto directo con el cuerpo, lo que genera un área de alta presión. En contraste, en la parte trasera, donde el aire se separa de la superficie, la velocidad del aire aumenta, lo que produce una zona de baja presión que contribuye a la resistencia. Un fenómeno similar ocurre en los vehículos reales, pero el diseño refinado busca evitar una caída brusca de la presión en la parte trasera, utilizando alerones y spoilers para controlar el flujo y evitar grandes separaciones.

En los vehículos, las alas y alerones aprovechan el principio de Bernoulli para generar downforce. Estos elementos están diseñados para que el aire fluya más rápido por la parte inferior que por la superior, lo que genera una presión más baja en la parte inferior, creando una fuerza hacia abajo que ayuda a mejorar la tracción. En comparación, el Ahmed Body no tiene estos elementos aerodinámicos adicionales, lo que lo hace menos eficiente en términos de generar downforce controlado.

Los vórtices son remolinos de aire que se forman debido a la separación del flujo en las esquinas y bordes del vehículo o el Ahmed Body. Estos vórtices representan una pérdida de energía en el flujo de aire y aumentan la resistencia aerodinámica. En el

---

Ahmed Body, los vórtices más significativos se generan en la parte trasera, donde el flujo se separa bruscamente debido a la inclinación de la superficie trasera. Estos vórtices contribuyen a la resistencia de forma significativa y son un fenómeno clave en la aerodinámica automotriz.

En los vehículos reales, los ingenieros buscan minimizar la intensidad de los vórtices mediante el uso de alerones, spoilers, y esquinas redondeadas, lo que reduce la separación del flujo y controla mejor el comportamiento del aire en la parte trasera.

El análisis aerodinámico del Ahmed Body comparado con un modelo de vehículo real revela las complejidades y retos de optimizar la resistencia al avance y la sustentación en el diseño automotriz. Mientras que el Ahmed Body ofrece una representación simplificada y es ideal para estudios básicos de separación del flujo y generación de vórtices, los vehículos reales requieren un diseño mucho más refinado para minimizar la resistencia y maximizar el downforce. Elementos como los alerones, difusores y spoilers demuestran la aplicación avanzada de principios aerodinámicos para controlar el flujo y mejorar la estabilidad a altas velocidades, algo que en el Ahmed Body no se contempla. Las fuerzas de arrastre y sustentación, junto con la transición entre flujos laminares y turbulentos, son componentes esenciales que ambos modelos abordan, pero de maneras que reflejan la complejidad de un vehículo en uso real.

Por otro lado, el impacto de la resistencia aerodinámica en el consumo de gasolina es significativo, especialmente cuando se incrementa la velocidad de un vehículo. Al pasar de 72 km/h a 100 km/h, la resistencia aerodinámica aumenta de forma exponencial, ya que esta fuerza es proporcional al cuadrado de la velocidad. Esto significa que, aunque el incremento de velocidad puede parecer relativamente pequeño (28 km/h), la resistencia al avance casi se duplica. Además, al aumentar la velocidad a 120 km/h, la resistencia aerodinámica continúa creciendo exponencialmente, haciendo que el consumo de combustible sea aún mayor. Como resultado, el motor debe trabajar mucho más para superar esta mayor oposición del aire, lo que incrementa de forma notable el consumo de combustible. Este comportamiento ilustra cómo los aumentos en la velocidad, incluso moderados, pueden tener un impacto significativo en la eficiencia del consumo de gasolina. A velocidades más bajas, como 72 km/h, la fricción aerodinámica es menor y otros factores como la fricción de los neumáticos y la eficiencia del motor tienen una mayor influencia en el consumo. Sin embargo, a medida que la velocidad se incrementa, la

---

resistencia aerodinámica domina, requiriendo más energía para mantener la velocidad. Esto se traduce en una mayor demanda de gasolina, ya que el vehículo debe quemar más combustible para generar la potencia necesaria. En resumen, el aumento de velocidad de 72 km/h a 100 km/h y 120 km/h provoca casi el doble y triple de consumo de combustible debido únicamente a la resistencia aerodinámica.

---

## 8 BIBLIOGRAFIA

- [1] «ELBIBLIOTE,» [En línea]. Available: <https://elbibliote.com/resources/Temas/html/1667.php>. [Último acceso: Agosto 2024].
- [2] L. M. Ortego, «DIARIOMOTOR,» 31 Marzo 2013. [En línea]. Available: <https://www.diariomotor.com/tecmovvia/2013/03/31/aerodinamica-y-eficiencia/>. [Último acceso: Agosto 2024].
- [3] D. Plaza, «Motor.es,» 21 Marzo 2023. [En línea]. Available: <https://www.motor.es/que-es/cfd>. [Último acceso: Agosto 2024].
- [4] WIKIPEDIA, «WIKIPEDIA,» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Fluido>. [Último acceso: Agosto 2024].
- [5] Y. A. Çengel y J. M. Cimbala, Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones, México: The McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A., 2012.
- [6] WIKIPEDIA, «WIKIPEDIA,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Ley\\_de\\_Sutherland](https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Sutherland). [Último acceso: Agosto 2024].
- [7] D. Pérez López, Análisis del comportamiento aerodinámico de un autobús en condiciones de viento frontal, Carcedo, J; Santisteban Díaz, A.: Proyecto final de carrera, Universidad de Cantabria., 2017.
- [8] INTEREMPRESAS, 21 Mayo 2010. [En línea]. Available: [https://www.interempresas.net/Equipamiento\\_Municipal/Articulos/40721-Baden-inteligente.html](https://www.interempresas.net/Equipamiento_Municipal/Articulos/40721-Baden-inteligente.html). [Último acceso: Agosto 2024].
- [9] «Wikipedia,» 20 junio 2024. [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Principio\\_de\\_Bernoulli](https://es.wikipedia.org/wiki/Principio_de_Bernoulli).
- [10] M. Fernández Osma, «AerodinamicaF1,» Septiembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.aerodinamicaf1.com/2019/09/la-capa-limite/>.
- [11] M. Fernández Osma, «AerodinamicaF1,» Octubre 2019. [En línea]. Available: <https://www.aerodinamicaf1.com/2019/10/flujo-laminar-y-turbulento/>.
- [12] ANSYS, ANSYS Fluent Tutorial Guide., Canonsburg, 2017.
- [13] H. Versteeg y W. Malalasekera, An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, Pearson, 2007.