



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Análisis CFD de la influencia de la aerodinámica en el  
consumo energético de vehículos en formación

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

AUTOR/A: Alegre Ituarte, Javier

Tutor/a: Quintero Igeño, Pedro Manuel

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

---

# **Análisis CFD de la influencia de la aerodinámica en el consumo energético de vehículos en formación**

---

**Grado en Ingeniería Aeroespacial**  
Especialidad Aeronaves

**Realizado por:**  
Javier Alegre Ituarte

**Dirigido por:**  
Dr. Pedro Manuel Quintero Igeño

Valencia, 20 Mayo, curso 2021/22

A mi familia por apoyarme en todo momento

A mi tutor Dr. Pedro Manuel Quintero Igeño, por estar comprometido con el proyecto

A los @9 por todo este tiempo juntos soportándonos... y lo que nos queda

# Resumen

---

El presente documento aborda una investigación sobre el efecto en el consumo y la autonomía de vehículos eléctricos por la distancia de separación ante una estrategia de conducción en formación. Se analiza la posibilidad de obtener mayores autonomías y menores consumos con dicha estrategia para futuros vehículos de conducción autónoma que permitan reducciones de distancias de seguridad.

En un primer lugar, se estudian tanto las independencias de malla y dominio, así como la influencia del número de Reynolds en los resultados.

Por otra parte, se pretende realizar un estudio de un vehículo aislado para así poder proporcionar una comparativa de la autonomía real del vehículo estudiado con la obtenida a través de simulaciones CFD empleando el software *Star-CCM+* de *SIEMENS*, asegurando así una correlación con los modelos reales.

Finalmente, estudiando los casos con vehículos en formación, se podrán comparar los rangos obtenidos para diversas separaciones con el disponible originalmente sin estrategia de conducción.

**Palabras clave:** Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), Vehículos autónomos, Rango, Coeficiente de resistencia.

# Resumen

---

Aquest document aborda una investigació sobre l'efecte en el consum i l'autonomia de vehicles elèctrics per la distància de separació davant d'una estratègia de conducció en formació. S'analitza la possibilitat d'obtenir majors autonomies i menors consums amb aquesta estratègia de conducció per a futurs vehicles de conducció autònoma que permetin reduccions de les distàncies de seguretat.

En un primer lloc, s'estudien tant les independències de malla i domini, així com la influència del nombre de Reynolds als resultats.

D'altra banda, es pretén fer un estudi d'un vehicle aïllat per poder proporcionar així una comparativa de l'autonomia real del vehicle estudiat amb l'obtinguda a través de simulacions CFD emprant el programa *Star-CCM+* de *SIEMENS*, assegurant així una correlació amb els models reals.

Finalment, estudiant els casos amb vehicles en formació, es podran comparar els rangs obtinguts per a diverses separacions amb el disponible originalment sense estratègia de conducció.

**Paraules clau:** Dinàmica de Fluids Computacional (CFD), Vehicles autònoms, Rang, Coeficient de resistència

# Abstract

---

This document consists in the investigation on the effect on the consumption and autonomy of electric vehicles due to the driving distance separation with a driving strategy. The possibility of obtaining greater autonomy and lower consumption with this strategy is analyzed for future autonomous driving vehicles that allow reductions in safety distances.

In the first place, both the mesh and domain independences are studied, as well as the influence of the Reynolds number on the results.

On the other hand, it is intended to carry out a study of an isolated vehicle in order to provide a comparison of the real autonomy of the vehicle studied with the one obtained through CFD simulations using the *Star-CCM+* software from *SIEMENS*, thus ensuring a correlation with real models.

Finally, by studying the cases with vehicles in a platoon, it will be possible to compare the ranges obtained for various separations with that originally available without a driving strategy.

**Key Words:** Computational Fluid Dynamics (CFD), Autonomous Vehicles, Range, Drag Coefficient.

# Nomenclatura

---

$Re$	-	Número de Reynolds
$\rho$	-	Densidad del fluido
$L$	-	Longitud del vehículo
$H$	-	Altura del vehículo
$W$	-	Anchura del vehículo
$\mu$	-	Viscosidad del fluido
$C_L$	-	Coefficiente de sustentación
$C_D$	-	Coefficiente de resistencia
$D$	-	Resistencia aerodinámica
$A$	-	Área frontal del vehículo
$x/L$	-	Longitudes de vehículo
$\nu$	-	Viscosidad dinámica
$E$	-	Consumo eléctrico
$V$	-	Velocidad
$y+$	-	Distancia mínima entre la pared y el centroide de la primera celda
$R$	-	Rango o autonomía del vehículo eléctrico

# Índice general

---

Índice de figuras	VIII
Índice de tablas	x
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Descripción del problema . . . . .	2
1.3. Estado del arte . . . . .	2
1.4. Objetivos . . . . .	8
<b>2. Fundamentos teóricos</b>	<b>9</b>
2.1. Aerodinámica en los vehículos . . . . .	9
2.1.1. Fuerzas aerodinámicas. . . . .	9
Resistencia aerodinámica. . . . .	9
Drag de presión. . . . .	9
Drag de superficie. . . . .	10
Sustentación o <i>downforce</i> . . . . .	11
2.1.2. Tipos de flujo alrededor de un automóvil. . . . .	11
Flujo laminar. . . . .	11
Zonas de estancamiento. . . . .	11
Zonas de recirculación. . . . .	11
Número de Reynolds . . . . .	12
2.2. Consumo eléctrico en automóviles . . . . .	13
<b>3. Metodología</b>	<b>17</b>
3.1. Introducción . . . . .	17
3.1.1. Diagrama de flujo . . . . .	17
3.2. Mecánica de Fluidos Computacional . . . . .	18
3.2.1. Metodología CFD . . . . .	19
3.3. Modelos de turbulencia . . . . .	19
3.4. Capa límite: $y^+$ . . . . .	20
3.5. Configuración de la simulación . . . . .	22
3.5.1. Geometría . . . . .	22
3.5.2. Dominio computacional . . . . .	23
3.5.3. Mallado . . . . .	24
3.6. Configuración del caso . . . . .	28
3.6.1. Selección de modelos . . . . .	28
3.6.2. Condiciones de contorno . . . . .	28
3.7. Estudios de independencia . . . . .	29
3.7.1. Independencia de dominio . . . . .	29
3.7.2. Independencia de malla . . . . .	30
3.8. Túnel de viento . . . . .	31

<b>4. Resultados</b>	<b>35</b>
4.1. Introducción . . . . .	35
4.2. Análisis de los resultados CFD caso aislado . . . . .	35
4.2.1. Coeficiente de resistencia y de sustentación . . . . .	35
4.2.2. Influencia del número de Reynolds . . . . .	37
4.2.3. Análisis del campo de velocidad, de las estructuras del flujo mediante la visualización del campo de vorticidad y del cortante sobre la superficie del vehículo . . . . .	38
4.2.4. Cálculo del consumo y autonomía . . . . .	43
4.3. Vehículos en formación . . . . .	43
4.3.1. Coeficientes de resistencia y autonomía . . . . .	44
Conducción a 120 km/h . . . . .	44
Conducción a 100 km/h . . . . .	47
4.3.2. Análisis de los resultados . . . . .	49
4.4. Análisis del campo de velocidad para vehículos en formación . . . . .	50
<b>5. Conclusiones</b>	<b>52</b>
5.1. Conclusiones generales . . . . .	52
5.2. Estudios futuros . . . . .	53
<b>6. Pliego de condiciones y Presupuesto</b>	<b>54</b>
6.1. Pliego de condiciones . . . . .	54
6.1.1. Condiciones técnicas . . . . .	54
6.1.2. Condiciones del puesto de trabajo . . . . .	55
6.2. Presupuesto . . . . .	55
6.2.1. Coste de personal. . . . .	55
6.2.2. Coste de equipo informático. . . . .	56
6.2.3. Presupuesto total del proyecto . . . . .	57

# Índice de figuras

---

1.1. Consumo eléctrico y de combustibles para vehículos a diferentes velocidades. [3] . . . . .	3
1.2. Histograma $C_D$ de automóviles en producción, 1980-2021. [4] . . . . .	4
1.3. Área frontal de coches, factor $f$ de vehículos Europeos. [5, 6] . . . . .	5
1.4. Comparación del Opel GT y VW-Scirocco. [6] . . . . .	5
1.5. Visualización del campo de velocidad obtenida mediante CFD. [7] . . . . .	6
1.6. Diferencia del punto de separación del fluido y su influencia en el $C_D$ . . . . .	7
1.7. Streamlines de magnitud de velocidad para 2 vehículos en formación a distancias diversas: a) $x/L = 0,25$ , b) $x/L = 1$ y c) $x/L = 1,5$ . [8] . . . . .	7
2.1. Distribución del coeficiente de presiones alrededor del vehículo. . . . .	10
2.2. Desglose de las fuerzas sobre sección de superficie. . . . .	10
2.3. Separación del fluido en un descapotable. [9] . . . . .	12
2.4. Capas límite a lo largo del techo de un autobús. [9] . . . . .	12
2.5. Diagrama de las componentes del consumo energético de un vehículo eléctrico. [10] . . . . .	14
2.6. Distribución del consumo energético específico total del Tesla Roadster respecto de la velocidad. [10] . . . . .	15
3.1. Diagrama de flujo seguido en la realización de este trabajo . . . . .	18
3.2. Perfil de velocidad de un flujo turbulento. [12] . . . . .	20
3.3. Perfil de velocidad $U+$ en función de la distancia a la pared $y+$ . [12] . . . . .	21
3.4. Geometría Tesla Model S. [13] . . . . .	22
3.5. Geometría simplificada del Tesla Model S con plano de simetría. . . . .	23
3.6. Dominio para la geometría dada referenciada a las dimensiones principales de la tabla 3.1 . . . . .	24
3.7. Zonas de mallado con crecimiento de celdas de forma hexaédrica. . . . .	25
3.8. Zonas de control de la malla para mayor precisión. . . . .	27
3.9. $y+$ en las paredes del automóvil. . . . .	27
3.10. Dominio con las partes identificadas para su asignación de condiciones de contorno. . . . .	29
3.11. Coeficiente de resistencia para las diferentes resoluciones de malla. . . . .	31
3.12. Túnel de viento subsónico a escala 1:43 de la Universidad Politécnica de Valencia. . . . .	32
3.13. Campo de velocidades en el plano de simetría del modelo a escala con la varilla para una $V_{inf} = 24m/s$ . . . . .	32
3.14. Tesla Model S con su varilla e introducido en el túnel de viento subsónico. . . . .	33
3.15. $C_D$ de mediciones del túnel y mediante CFD. . . . .	34
4.1. Distribución del coeficiente de resistencia a lo largo del vehículo. . . . .	36
4.2. Coeficiente de resistencia para diversos números de Reynolds y su tendencia exponencial. . . . .	37

4.3. Campo de velocidades en el plano de simetría del vehículo aislado para una $V_{inf} = 33$ m/s. . . . .	38
4.4. Campo de velocidades desde la planta del vehículo aislado para una $V_{inf} = 33$ m/s. . . . .	39
4.5. Vorticidad alrededor del automóvil. . . . .	40
4.6. Cortante y líneas de corriente de cortante sobre la superficie del vehículo y con la velocidad sobre el plano de simetría para el caso de 33 m/s aislado. . . . .	42
4.7. Drag ratio y autonomía según la separación ( $X/L$ )(Longitudes de coche) a 120 km/h. . . . .	46
4.8. Drag ratio y autonomía según la separación ( $X/L$ )(Longitudes de coche) a 100 km/h. . . . .	48
4.9. Velocidad del fluido para separaciones de 4 a 1 $x/L$ (Vehículos de separación) a 33 m/s - En orden de arriba a abajo. . . . .	50
4.10. Velocidad del fluido para separaciones de 0.5 a 0 $x/L$ (Vehículos de separación) a 33 m/s - En orden de arriba a abajo. . . . .	51

# Índice de tablas

---

3.1. Dimensiones principales de la geometría empleada. . . . .	23
3.2. Tipos de refinamiento de malla según zonas. . . . .	26
3.3. Independencia del dominio para diferentes dimensiones analizadas. . . .	30
3.4. Independencia de malla con la selección para futuras simulaciones. . . .	30
4.1. Componentes de los coeficientes sobre el automóvil. . . . .	36
4.2. Independencia del número de Reynolds. . . . .	37
4.3. Resultados de coeficiente de resistencia y su ratio respecto al aislado para vehículos en formación a 120 km/h. ( $x/L$ )(Longitudes de coche) .	44
4.4. Resultados de la autonomía para vehículos en formación a 120 km/h. ( $x/L$ )(Longitudes de coche) . . . . .	45
4.5. Resultados de coeficiente de resistencia y su ratio respecto al aislado para vehículos en formación a 100 km/h. ( $x/L$ )(Longitudes de coche) .	47
4.6. Resultados de la autonomía para vehículos en formación a 100 km/h. ( $x/L$ )(Longitudes de coche) . . . . .	47
6.1. Coste de mano de obra. . . . .	56
6.2. Coste de equipo informático. . . . .	57
6.3. Coste total del proyecto. . . . .	57

# 1. Introducción

---

## 1.1. Motivación

Con la actual crisis climática que está experimentando el planeta, se está llevando a cabo una transición energética en diversos aspectos de la industria. Intentado a su vez, emitir menos gases de efecto invernadero o contaminantes para retrasar o incluso revertir el cambio que se está sufriendo.

El coche eléctrico, apareció por primera vez en Alemania sobre el año 1880 por parte de Andreas Flocken, fabricando un automóvil eléctrico con un motor de 0,7 kW, una batería de 100 kg y una velocidad de 15 km/h. En pocos años, sobre el año 1899 un vehículo eléctrico belga consiguió ser el primer vehículo en superar los 100 km/h, ganando así más popularidad. En los primeros años del 1900, existía una moda de dicho automóvil en la alta sociedad, pues su simplicidad al no tener que cambiar marchas y puesto que eran más silenciosos que cualquier otro vehículo lo hacían muy atractivo. No obstante, debido a su alto coste y los avances tecnológicos de Henry Ford con la cadena de montaje y el desarrollo del Ford T, el vehículo eléctrico pasó a un segundo plano dejando vía libre al vehículo de propulsión interna desapareciendo por completo sobre el año 1935. Sin embargo, este ha vuelto a aparecer en el mercado en los últimos años por la comercialización de estos vehículos por marcas punteras en el sector automovilístico. En dicha industria; pese a que lentamente, se están implantando este tipo de vehículos y aunque actualmente no hayan sido completamente bien recibidos por el público; sobre todo en cuanto a la autonomía y velocidad de carga, va a ser un cambio inevitable eventualmente. Este cambio, se está realizando no solo por la parte de la reducción de las emisiones, si no también por normativas que se están implantando en los diversos países occidentales con el fin de adelantar este cambio en la industria a energías más limpias. [1]

La autonomía de estos vehículos eléctricos, no solo es una de las mayores preocupaciones de los compradores, si no que es uno de los mayores retos de la industria pues no hay nuevas tecnologías que hayan producido grandes cambios en los últimos años, es por esto, que parece que esté estancada y se estén considerando otras alternativas. Esta autonomía, se ve principalmente afectada a velocidades altas, donde el consumo eléctrico se dispara comparado con los vehículos de combustión. En cambio, para condiciones urbanas o velocidades más bajas, las tecnologías eléctricas destacan por su eficiencia.

Sin embargo, con los últimos desarrollos de inteligencia artificial y procesamiento de datos, se están consiguiendo realizar vehículos cada vez más autónomos, con el objetivo de conseguir la categoría 5 o automatización completa, con la cual no haría falta ningún input humano por medio de volante o pedales. [2] Esto, se está realizando con avances en sensores y formas de comunicación de alta velocidad así como con tecnologías ya aplicadas como el control de crucero adaptativo, que mantiene la distancia de seguridad gracias a sensores Lidar. [3] Actualmente, la mayoría de vehículos pre-

sentan categorías entre 0 y 2, siendo Tesla de las marcas más avanzadas con categoría 3 pudiendo manejarse solo el automóvil, pero con la expectativa de la intervención de un conductor.

Con estas nuevas tecnologías, se podrían por lo tanto aplicar para realizar una optimización de la aerodinámica de los vehículos. Como serán vehículos completamente autónomos, en este trabajo se propone reducir las distancias de seguridad al no depender estas de la reacción de un humano; así, se conseguirá situar a los vehículos a rebufo de otro, consiguiendo por lo tanto mayores autonomías y menores consumos. Situaciones similares, se pueden observar en competiciones automovilísticas como la Nascar o la Fórmula 1, o incluso en camiones en carretera, que aunque no respeten las distancias de seguridad, están experimentando el efecto propuesto. Esta estrategia de conducción, conocida como (CACC) *Cooperative Adaptive Cruise Control* o Control de Crucero Adaptativo Cooperativo, ayudaría a aumentar la autonomía al reducir el consumo a las altas velocidades comentadas anteriormente.

## 1.2. Descripción del problema

El estudio de vehículos en formación, por lo tanto, plantea situar los vehículos a diversas distancias de separación para estudiar los efectos aerodinámicos sobre la resistencia, el consumo y autonomía de dichos automóviles. Hoy en día, esto no sería viable pues se tienen que respetar las distancias de seguridad por la velocidad de reacción de la respuesta humana. Sin embargo, como se ha comentado anteriormente, la implementación de vehículos autónomos y el desarrollo de redes de comunicación cada vez más rápidas, permitiría la automatización completa y la conexión entre estos; y por lo tanto, ante cualquier situación en la carretera, una respuesta inmediata de todos los vehículos.

Este estudio, se realizará en el presente trabajo mediante simulaciones CFD, en las que con una referencia de la resistencia aerodinámica de un coche completamente aislado, se puedan obtener comparaciones en cuanto al consumo ( $kW \cdot h$ ) o de autonomía (km) a diversas separaciones entre automóviles.

Analizando pues dichos resultados y comparaciones, se podrá por tanto ver como influiría la implementación de esta estrategia de formación (CACC) en carretera.

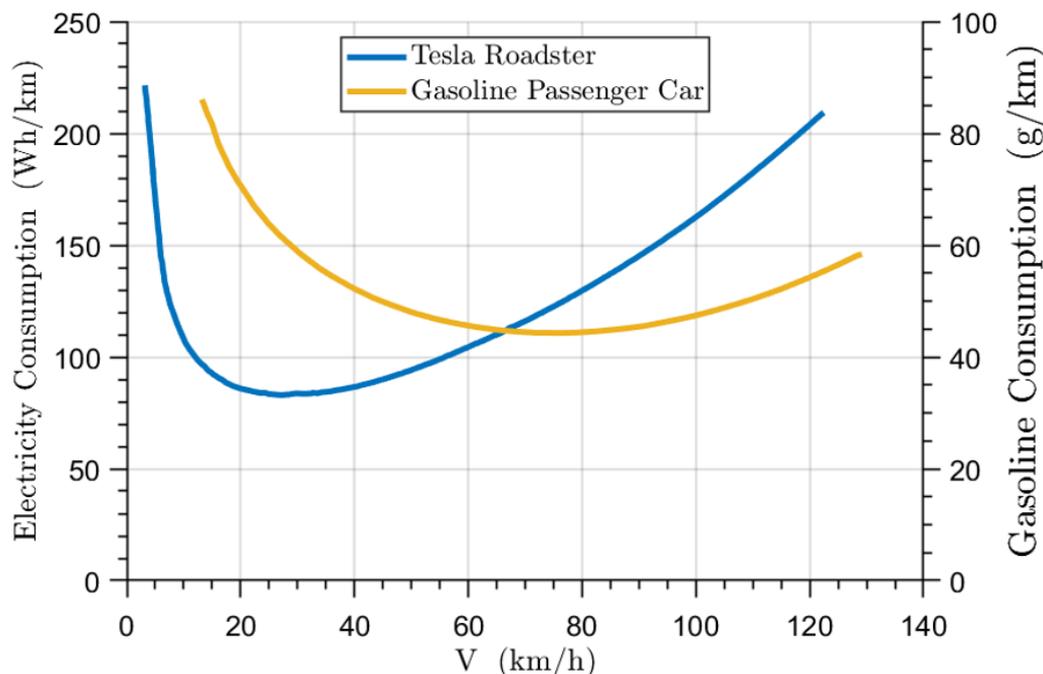
## 1.3. Estado del arte

La aerodinámica juega un papel muy importante en muchos aspectos de los automóviles, ya sea en la seguridad, la estabilidad del vehículo, el confort así como en el rendimiento y consumo de este.

Es de especial interés estudiar los efectos de la resistencia aerodinámica a velocidades elevadas. En la Figura 1.1, se refleja la curva típica del consumo de vehículos eléctricos y de combustión; con un mínimo de estos sobre los 25 km/h y sobre los 72 km/h respectivamente. Esta diferencia entre los mínimos, se debe principalmente a que

los vehículos de combustión, se ven limitados por las revoluciones del motor y su mayor eficiencia se encuentra en la marcha más alta, es por esto que se obtiene una velocidad más alta. Los motores eléctricos, no tienen dichas limitaciones, pero a bajas revoluciones y bajo torque pueden ser menos eficientes ya que también tienen que suministrar energía a otros sistemas, elevando así el mínimo.

Las diferentes formas de las curvas, llevan a la conclusión de que los vehículos eléctricos son una buena alternativa a bajas velocidades o en entornos urbanos, mientras que los vehículos de combustión siguen siendo mejor opción velocidades mayores.



**Figura 1.1:** Consumo eléctrico y de combustibles para vehículos a diferentes velocidades. [3]

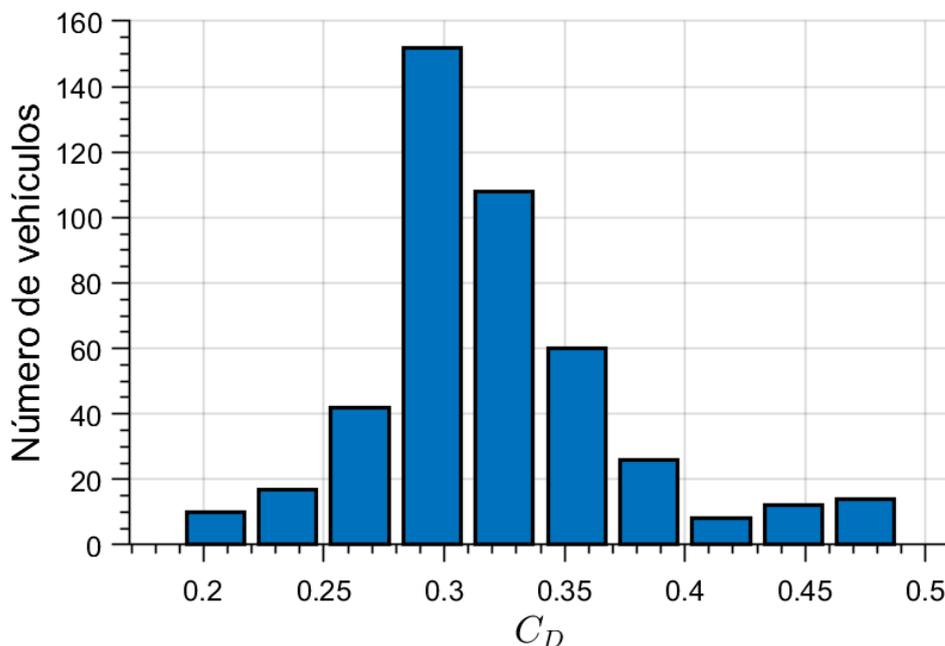
Sin embargo, este punto negativo de los vehículos eléctricos a altas velocidades, va a tratarse de resolver en el presente trabajo mediante la propuesta de la conducción en formación de varios vehículos, para que así, el consumo eléctrico a velocidades típicas de cruceo 100 – 120 km/h se vea reducido.

Una de las fuerzas que actúan sobre un automóvil, es la resistencia aerodinámica, que viene definida como:

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_D \cdot V^2 \quad (1.1)$$

El consumo de los vehículos, está directamente relacionado con el coeficiente de resistencia aerodinámica como se observa en la Ecuación 1.1, es por ello, que con una reducción de dicho coeficiente se puede disminuir el consumo drásticamente. A lo largo de los años, se han desarrollado diseños de todo tipo; buscando un bajo  $C_D$ , consiguiendo mayor *downforce* y por tanto provocando un mayor  $C_D$  o simplemente haciendo un diseño práctico para el usuario. Observando la Figura 1.2, se ha representado el  $C_D$  de los automóviles de los últimos años, de estos, se obtiene que el coeficiente aerodinámico

medio de estos es de  $C_D = 0,33$  de los 450 modelos analizados [4] y es que hoy en día, muy pocos automóviles tienen valores por debajo de  $C_D = 0,30$ .



**Figura 1.2:** Histograma  $C_D$  de automóviles en producción, 1980-2021. [4]

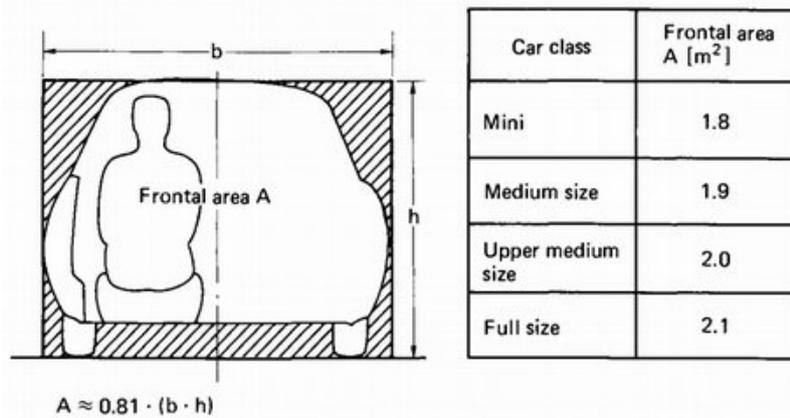
La cantidad de vehículos en la figura anterior, indica el potencial de crecimiento en cuanto a mejoras que aún existe.

No obstante, el objetivo de explotar dicho potencial, pretende reflejar mejoras en cuanto al consumo de combustible. Es decir, se busca un bajo consumo y no directamente un coeficiente de resistencia bajo.

La ecuación 1.1 permite por tanto, dos vías distintas de reducir la resistencia aerodinámica: reducir el área frontal  $A$  o mejorar la forma de los componentes aerodinámicos que caracterizan el coeficiente  $C_D$ .

La opción de reducir el área, ya no es viable pues esta ya se ha visto reducida a sus límites. Esto está demostrado en la Figura 1.3; donde se representan las dimensiones generales para realizar el cálculo del área frontal de un automóvil estándar, en las que los fabricantes, con muy pocas variaciones, han llegado prácticamente a las mismas dimensiones de vehículos, obteniendo una relación con muy buena estimación  $A = 0,81b h$ , la cual sigue siendo aplicable hoy en día [5].

No obstante, aunque interese tener un área frontal mínima para reducir la resistencia, actualmente el área de los vehículos está aumentando por la comodidad de los pasajeros así como por medidas de seguridad. Es por esto, que es de especial interés buscar otras formas de reducción de la resistencia aerodinámica.



**Figura 1.3:** Área frontal de coches, factor  $f$  de vehículos Europeos. [5, 6]

La otra forma de reducir la resistencia, es por tanto mediante la optimización de su forma. Este método empezó a tener especial interés en la industria a partir de la primera crisis del petróleo en los años 1973-74, a partir de la cual, los ingenieros empezaron a realizar modificaciones en el carenado de los vehículos y cambiando pilares de posición entre otros (Fig 1.4), para así ver cómo afectaban a la resistencia del vehículo. Este proceso, se llevó a cabo con diversas modificaciones, pudiendo obtener iteraciones que les llevaran al diseño óptimo.



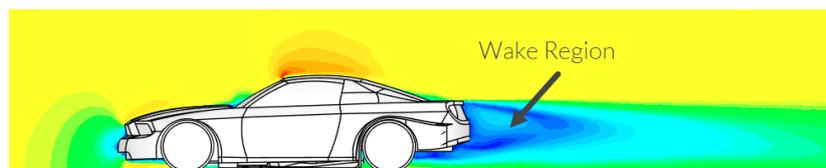
**Figura 1.4:** Comparación del Opel GT y VW-Scirocco. [6]

Este proceso actualmente sigue siendo aplicado, y aunque es muy costoso pues requiere de tiempo en túneles de viento y de simulaciones computacionales muy detalladas, permite llegar a los diseños óptimos previamente a que entren en producción.

A través de este proceso se podría obtener un vehículo muy aerodinámico. Sin embargo, esto no sería posible sin una reducción del peso, y por ende de la potencia. Esta reducción actualmente no resulta muy atractiva, por lo que no se están produciendo vehículos con dichas características.

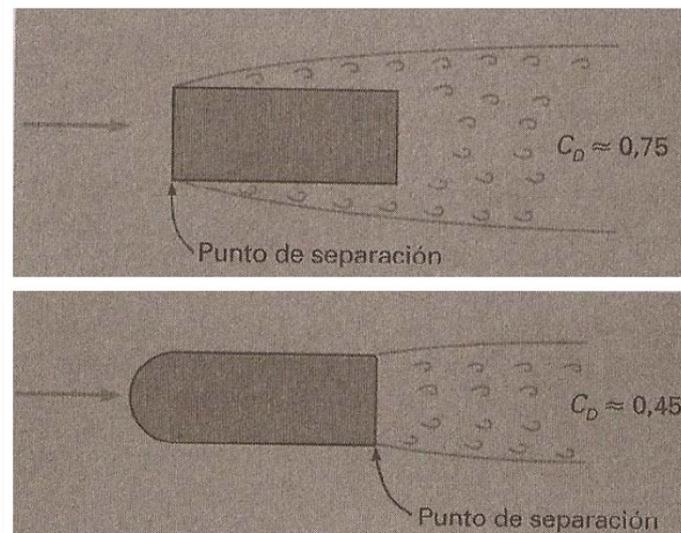
No obstante, a parte de las dos formas presentadas, existe otro método de reducir la resistencia aerodinámica; esta es la comentada en el trabajo mediante la conducción en formación. Esta alternativa, no trata de realizar modificaciones de diseño sobre los automóviles, si no de reducir la distancia de separación entre ambos para aprovechar la estela turbulenta del vehículo de delante.

Todo objeto, cuando se encuentra en movimiento provoca perturbaciones en el aire, las cuales variarán en magnitud dependiendo del tamaño, velocidad y de la forma de este. Este rastro, es conocido como estela o *Wake*, la cual provoca una zona de baja presión en la parte trasera del vehículo que "succiona" o tira del coche hacia atrás. Esta zona azul de la Figura 1.5, dependiendo de la perturbación que haya provocado, puede desplazarse aguas abajo varios órdenes de longitud. Esta zona de baja presión, conjunta con la de alta presión de la parte delantera del automóvil, provocarán la resistencia de presión del vehículo; siendo esta la mayor contribuyente a la magnitud global de la resistencia.



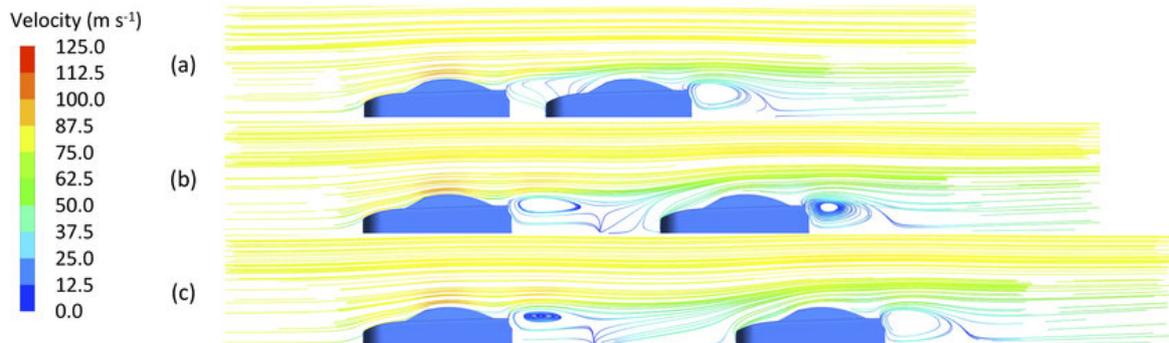
**Figura 1.5:** Visualización del campo de velocidad obtenida mediante CFD. [7]

Por este motivo, los ingenieros tratan de disminuir al máximo el tamaño de esta estela. Una de las formas, es mediante el retraso del punto de separación inevitable del fluido con el cuerpo. En la Figura 1.6, se observa como dependiendo de la forma delantera, el fluido retrasa su separación, disminuyendo por tanto en gran magnitud el  $C_D$  ya que la estela ha reducido su tamaño. En los vehículos, esto lleva a analizar cuidadosamente el diseño de la parte frontal, pues será un factor determinante en el punto de separación de la estela.



**Figura 1.6:** Diferencia del punto de separación del fluido y su influencia en el  $C_D$ .

Esta conducción en formación presentada en el trabajo, tratará de aprovechar esta estela turbulenta tras los vehículos para reducirla y así disminuir la resistencia. Esto se conseguirá introduciendo un segundo coche en la estela del primero a diversas distancias de separación (Figura 1.7). Esta estela, que previamente podía tener varios órdenes de longitud, se verá por tanto reducida pues el coche introducido la estará perturbando.



**Figura 1.7:** Streamlines de magnitud de velocidad para 2 vehículos en formación a distancias diversas: a)  $x/L = 0,25$ , b)  $x/L = 1$  y c)  $x/L = 1,5$ . [8]

Sin embargo, la mayor ventaja la verá el vehículo introducido en la estela del primero, pues impactará contra aire que ya ha sido perturbado por lo que su aportación al aire será menor. Así pues, aunque la estela global pueda incluso aumentar en tamaño, la resistencia individual de cada uno de los vehículos será menor ya que se está aprovechando dicha estela para el beneficio del conjunto.

## 1.4. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto radica en realizar un análisis computacional que permita analizar diversos casos de estrategias de formación, para así poder ver el efecto que tendría sobre el consumo, autonomía y resistencia aerodinámica. Estos parámetros, se van a tratar de cuantificar pudiendo así compararlos con datos publicados por el fabricante del vehículo escogido para el estudio.

Adicionalmente, se busca comprender y analizar la aerodinámica externa de un vehículo y su interacción cuando se sitúa otro automóvil aguas abajo del primer vehículo. Por otra parte, se persigue aumentar los conocimientos de las herramientas CFD, por lo que esto requerirá una serie de objetivos más específicos:

- *Diseño y optimización del proceso de mallado.* Se busca configurar el caso CFD desde la geometría del vehículo a estudiar, modelando zonas de especial importancia por el desprendimiento del flujo para una buena convergencia.
- *Resolución del caso base.* Se busca obtener una solución del problema base de un vehículo completamente aislado, que permita analizar con pocas modificaciones, los casos de vehículos en formación.
- *Estrategia de mallado.* Se persigue obtener un mallado que permita obtener una buena solución, para la potencia computacional disponible para la realización de este trabajo.
- *Resolución casos de vehículos en formación.* A partir de la resolución del caso base, poder obtener la solución del problema para vehículos en formación situados a diferentes distancias de separación.
- *Obtención parámetros de interés.* A partir de los resultados de las simulaciones, poder trasladarlos para obtener valores de autonomía y consumo.

## 2. Fundamentos teóricos

---

### 2.1. Aerodinámica en los vehículos

#### 2.1.1. Fuerzas aerodinámicas.

En la aerodinámica de vehículos, la resistencia aerodinámica es el principal foco de interés y en especial, su coeficiente  $C_D$ . No se puede negar su importancia pues determina el rendimiento del vehículo, su consumo, las emisiones, la velocidad punta...aspecto verdaderamente importantes para un automóvil.

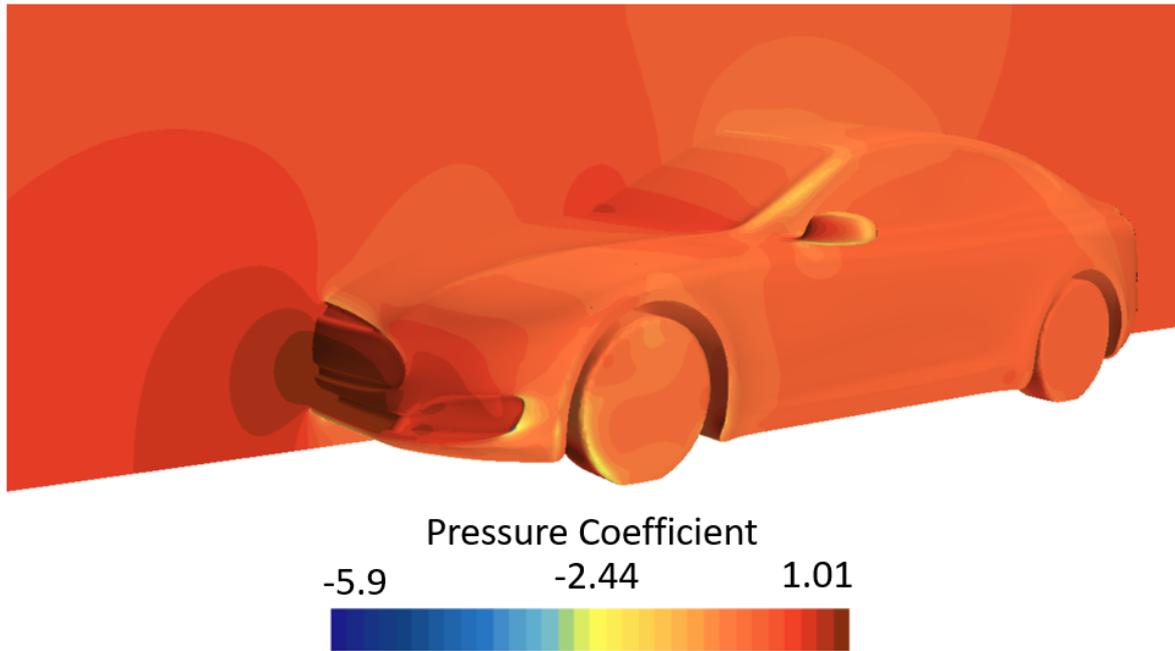
No obstante, la aerodinámica de automóviles no se simplifica en la resistencia, pues el flujo alrededor de un vehículo también será responsable de la estabilidad direccional, la respuesta ante ráfagas laterales, que las gotas de agua no se acumulen en ventanas, del sonido aerodinámico, de refrigerar el motor, así como de generar *downforce* en los vehículos de competición. Es decir, la aerodinámica juega un papel importante en el diseño de un vehículo.

#### Resistencia aerodinámica.

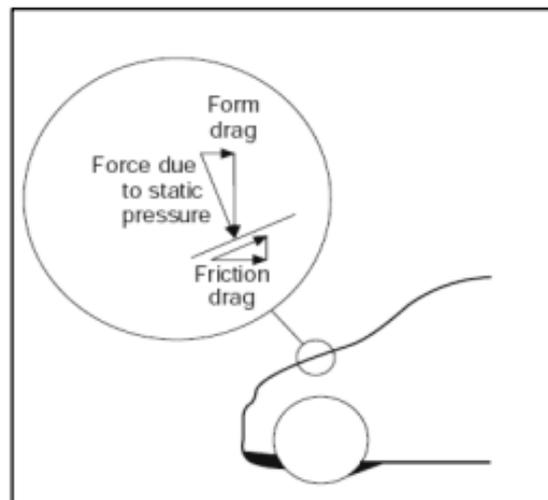
Definida previamente en la ecuación 1.1, un cuerpo expuesto a una corriente de aire experimentará diferencias de presión a lo largo de su superficie. Dividiéndola en 5 elementos, permitirá una mejor comprensión de dicha fuerza actuando en el automóvil.

#### Drag de presión.

Este componente se puede situar en la superficie exterior del coche. Cuando un vehículo se mueve inmerso en un flujo de aire, la superficie del automóvil experimentará variaciones del coeficiente de presión sobre diferentes puntos del automóvil como se muestra en la Figura 2.1 la distribución de presión sobre el Tesla estudiado. En la figura, se puede comprobar como el coeficiente de presiones aumenta en las zonas delanteras en las que el aire impacta directamente con el cuerpo, sin embargo, también se pueden observar zonas en las que este coeficiente baja pues los efectos cortantes presentan mayor importancia y hay zonas de desprendimiento y recirculación. Analizándolo de cerca, en la Figura 2.2, para una sección de superficie, la fuerza resultará la combinación de varios componentes, siendo la de presión dependiente de su magnitud.



**Figura 2.1:** Distribución del coeficiente de presiones alrededor del vehículo.



**Figura 2.2:** Desglose de las fuerzas sobre sección de superficie.

### Drag de superficie.

Este tipo de resistencia se debe al rozamiento del aire con la superficie del vehículo.

Esta componente se ve influida por el efecto de la viscosidad en la superficie y su interacción. Será de vital importancia resolver correctamente la zona cercana a la superficie de los vehículos (capa límite) pues se analizará el presente efecto.

### **Sustentación o *downforce*.**

Simplificándolo, la sustentación de un vehículo es la diferencia de presión entre la parte superior y la inferior de este.

Aunque a bajas velocidades no tenga relativa importancia, hoy en día se fabrican coches que pueden alcanzar altas velocidades, lo cual, obliga a ser un factor de estudio pues como se ha comentado previamente, influirá en la estabilidad de conducción.

El *downforce* es un factor de especial interés en las competiciones automovilísticas, pues es la fuerza que pega el coche al suelo para así ganar tracción y poder tomar las curvas a mayores velocidades.

### **2.1.2. Tipos de flujo alrededor de un automóvil.**

#### **Flujo laminar.**

El flujo laminar es un tipo de flujo que va a permanecer adherido a la superficie del vehículo y que en cualquier punto de la superficie permanecerá con un patrón constante.

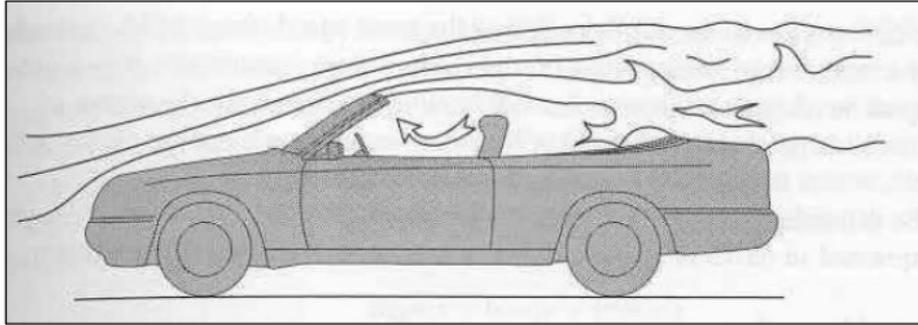
#### **Zonas de estancamiento.**

Esta es la naturaleza del flujo que impacta con un cuerpo, pues se divide en diferentes líneas de corriente para circular alrededor del este. El punto donde impacta, si presenta un vector superficie normal a la dirección del flujo, pasará a ser una zona de estancamiento pues el flujo pasará a estar de forma estacionaria.

#### **Zonas de recirculación.**

El flujo, no siempre está adherido, cuando este se separa, pueden haber zonas de recirculación en las que el flujo tiene velocidad nula o incluso negativa respecto a la del flujo no perturbado.

Estas zonas, afectarán en gran medida a la resistencia de presión, pues serán zonas en las que será menor comparado con las zonas de estancamiento delanteras del vehículo, por lo que lo 'succionará' hacia atrás.



**Figura 2.3:** Separación del fluido en un descapotable. [9]

### Número de Reynolds

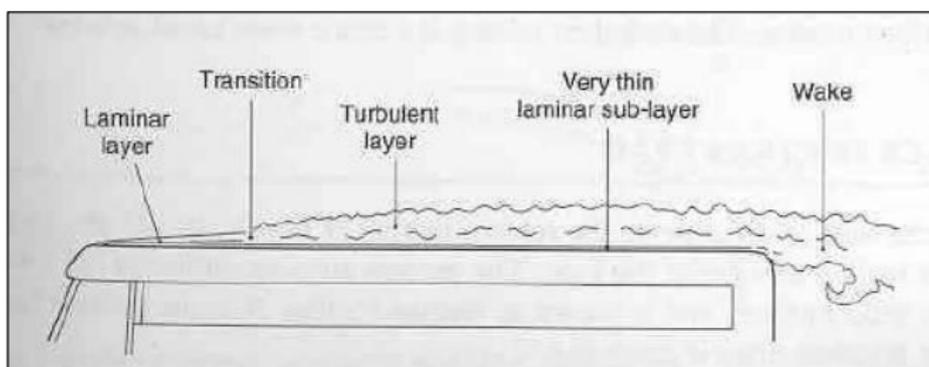
La capa límite y el espesor de la esta afectan la fricción en la superficie, las separaciones del flujo, etc. Estos aspectos dependerán de la longitud del cuerpo, la viscosidad, la velocidad y la densidad, introduciendo así el número de Reynolds, que se puede expresar de la siguiente forma:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot W}{\nu} \quad (2.1)$$

En el caso de este estudio, como únicamente se variará la velocidad para así aislar los efectos de la velocidad y la separación entre vehículos, este número de Reynolds dependerá únicamente de la velocidad.

Un incremento del número de Reynolds, supondrá una reducción del espesor de la capa límite, implicando por tanto menos resistencia por rozamiento y siendo más propenso al flujo separado y por tanto a resistencia por presión.

Las capas límite o zonas muy próximas a la superficie de un cuerpo, se distinguen por presentar dos tipos de flujo. La Figura 2.4 muestra el flujo sobre el techo de un autobús y como se desarrolla. Inicialmente, presenta un flujo laminar y este transiciona a un flujo turbulento según avanza sobre la superficie. En la zona laminar, el drag de superficie será mayor por los efectos viscosos. El estado en el que se encuentre el fluido, a parte de la viscosidad, dependerá del anterior número de Reynolds.



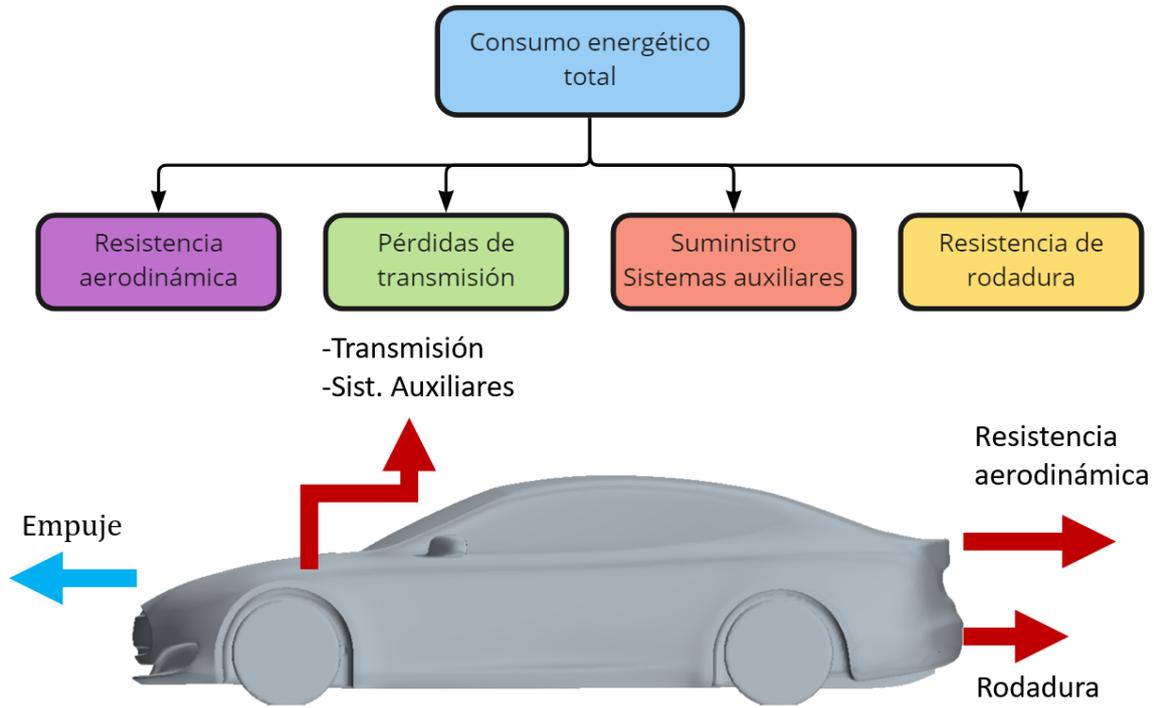
**Figura 2.4:** Capas límite a lo largo del techo de un autobús. [9]

## 2.2. Consumo eléctrico en automóviles

Una característica importante de los vehículos eléctricos es la distancia recorrida en una única carga de la batería. Normalmente, esta autonomía aportada por el fabricante, no está detallada en cuanto a las condiciones en las que se realizaron la prueba como puede ser la temperatura ambiente, el tráfico, el uso de sistemas auxiliares... Para los propietarios de estos vehículos, realmente conocer la autonomía restante es uno de los principales factores a saber con exactitud y como la afectan los sistemas auxiliares.

En la Figura 2.5, se descompone el consumo energético total de un vehículo eléctrico. Las distintas componentes, como se analizará en la Figura 2.6, tendrán mayor o menor importancia dependiendo de la velocidad a la que se circule. Estas componentes, se pueden clasificar como:

- **Resistencia aerodinámica:** Como se ha comentado previamente, la resistencia definida en la ecuación 1.1, provocará una fuerza de resistencia al avance, que vendrá influida por el  $C_D$ , el área frontal, la densidad del aire y el cuadrado de la velocidad, por lo que será esperable una influencia mayor a altas velocidades.
- **Pérdidas de transmisión:** Son todas aquellas pérdidas que ocurren en la transmisión de la potencia del motor hasta la rueda. Habitualmente, en los vehículos de combustión suelen ser más relevantes pues hay más componentes en el sistema. Sin embargo, como los vehículos eléctricos únicamente tienen el motor y no presentan ni caja de cambios, suelen ser más eficientes. A parte de las pérdidas mecánicas en la transmisión, se tendrán que añadir las pérdidas en el motor eléctrico y sistemas eléctricos aunque no son muy relevantes.
- **Suministro sistemas auxiliares:** Es la energía que va dedicada al correcto funcionamiento de las luces, claxon, limpiaparabrisas, aire acondicionado... Esta componente puede tener gran implicación en el rango y consumo del automóvil eléctrico por lo que también es un factor a tener en cuenta a la hora de determinar el rango máximo.
- **Resistencia de rodadura:** Es la energía que se requiere del vehículo para mantener el movimiento de rodadura de las ruedas sobre una superficie dada. Esta varía muy poco con la velocidad pues esta no tiene un gran impacto en el coeficiente de rodadura.



**Figura 2.5:** Diagrama de las componentes del consumo energético de un vehículo eléctrico. [10]

En casos generales de conducción, el consumo eléctrico puede ser determinado teóricamente por la ecuación descrita en [10]:

$$E_{100} = \frac{100}{3,6\eta_M\eta_E} \left[ (f_o + 5 \cdot 10^{-7} \cdot V^2)G + k_B \cdot S \frac{V^2}{13} \right] + E_{AS_{100}} ; \quad \frac{kWh}{100km} \quad (2.2)$$

Donde  $f_o$  – es el coeficiente a la resistencia de rodadura;  $V$  – es la velocidad en  $km/h$ ;  $G$  – es el peso del automóvil en  $kN$ ;  $k_B$  – es el coeficiente de resistencia aerodinámica (2.3) en  $\frac{kNs^2}{m^4}$ ;  $S$  – es el área frontal del vehículo en  $m^2$ ;  $\eta_M$  – es la eficiencia del coeficiente de transmisión;  $\eta_E$  – es la eficiencia del motor y componentes electrónicos y  $E_{AS_{100}}$  – es el consumo energético específico de los sistemas auxiliares en  $\frac{kWh}{100km}$ .

El coeficiente de resistencia aerodinámica ( $k_B$ ) viene dado por:

$$k_B = 0,5 \cdot 10^{-3} \rho \cdot c_x ; \quad \frac{kNs^2}{m^4} \quad (2.3)$$

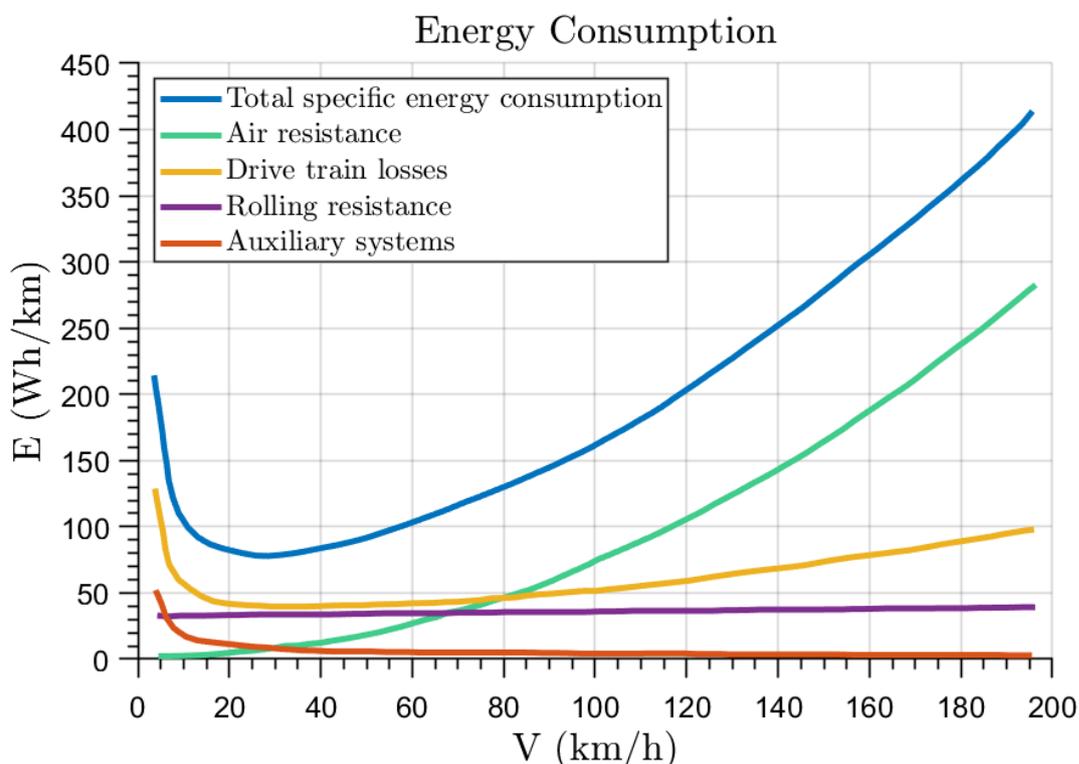
Donde  $\rho$  – es la densidad del aire en  $kg/m^3$  y  $c_x$  – es el coeficiente de resistencia que se obtendrá de las simulaciones realizadas en el trabajo.

Las pérdidas mecánicas en la transmisión pueden variar en un amplio rango y dependen de la carga eléctrica del motor. La eficiencia de  $\eta_M$  puede ser evaluado por [11].

Las pérdidas del motor eléctrico y de los componentes eléctricos ( $\eta_E$ ); también dependerán de las condiciones de conducción. Igualmente, el producto de ambos coeficientes suele variar entre 90 – 95 % [10].

Por otra parte, el consumo de los sistemas auxiliares ( $E_{AS_{100}}$ ), puede tener gran impacto, pues este recoge el consumo por las luces, el claxon, los limpiaparabrisas y el aire acondicionado.

En la Figura 2.6, se puede observar la distribución del consumo energético específico total del Tesla Roadster, un modelo muy similar al Tesla Model S estudiado en este proyecto



**Figura 2.6:** Distribución del consumo energético específico total del Tesla Roadster respecto de la velocidad. [10]

Se puede observar que el mínimo consumo de los vehículos eléctricos, se encuentra a menores velocidades que los vehículos de combustión, en torno a  $25 \text{ km/h}$ ; como también se había observado en la Figura 1.1. Sin embargo, se puede comprobar observar también la influencia de la resistencia aerodinámica con la velocidad, y cómo a altas velocidades, resulta el principal factor en el consumo.

Como se había descrito previamente, la resistencia por rodadura permanece prácticamente constante con la velocidad pues esta no afecta al factor de rodadura  $f$ .

Por otra parte, se observa la influencia de las pérdidas de transmisión y de los sistemas a bajas velocidades. Esto se debe principalmente a la baja eficiencia del producto de  $\eta_M$  y  $\eta_E$  a dichas velocidades.

A altas velocidades, pasa a ser la resistencia aerodinámica que con su cuadrado de la ecuación 1.1, crece rápidamente tomando así la mayor relevancia en el consumo eléctrico total. Para el caso del presente estudio, en el que se realizarán simulaciones principalmente para casos de 100 y 120 km/h, dicha resistencia aerodinámica pasa a ser del 45 % y 50 % del total de energía empleada respectivamente; comparado con un 20 % a velocidades urbanas de 50 km/h. Estos datos ponen en evidencia la importancia de estudiar la aerodinámica de los automóviles y de buscar formas de optimizarla.

Será con la ecuación 2.2 descrita previamente, con la que en análisis realizados en futuras secciones del proyecto que se calculará el consumo eléctrico.

## 3. Metodología

---

En este capítulo se muestra la preparación de los casos a analizar así como el planteamiento de los estudios llevados a cabo. En un primer lugar, se genera un dominio computacional que permita incluir el vehículo y la estela que genere.

Posteriormente, se malla dicho dominio incrementando el detalle de las celdas en zonas de importancia. Seguidamente se comprueba la independencia de dicha malla disminuyendo el tamaño base de las celdas; obteniendo mallas más finas y con mayor número de celdas, para así ver la diferencia en cada uno de los casos.

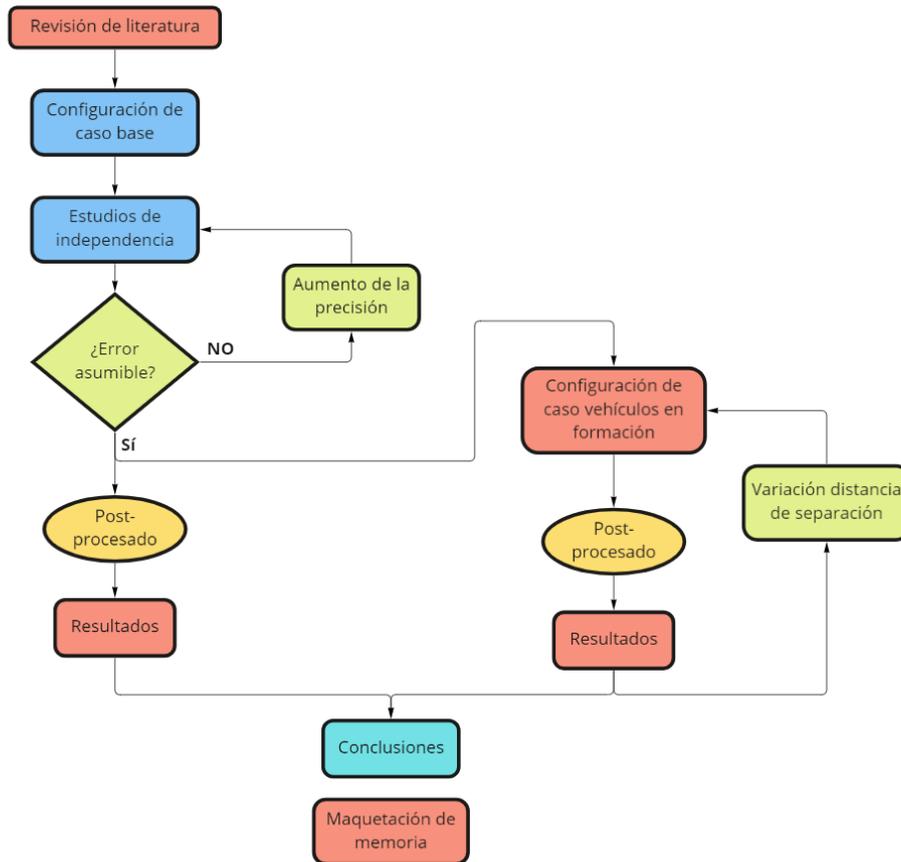
Una vez se considera que la malla posee la resolución requerida y es apta para poder realizar futuros estudios con la potencia computacional disponible; esta es empleada para el cálculo a diferentes velocidades así como para el análisis de los casos con vehículos en formación a diferentes distancias.

### 3.1. Introducción

En esta primera sección, se expone el diagrama de flujo que se ha seguido con la finalidad de concretar los pasos llevados a cabo y así mostrar de forma clara, concisa y resumida el proceso de realización del trabajo.

#### 3.1.1. Diagrama de flujo

En lo referente al diagrama de flujo, este pretende detallar, de forma esquemática, cada uno de los pasos llevados a cabo para la realización del presente proyecto. La mayoría de iteraciones, se han realizado a la hora de la independencia de malla así como a la hora de realizar variaciones en las distancias de separación entre los vehículos en formación. El diagrama de trabajo se muestra a continuación:



**Figura 3.1:** Diagrama de flujo seguido en la realización de este trabajo

## 3.2. Mecánica de Fluidos Computacional

En esta sección, se desarrolla el método habitualmente seguido en cualquier estudio CFD, en la que se especifica la configuración empleada, justificando las decisiones que se han tomado referentes a solvers, modelos de turbulencia, condiciones de contorno, etc. Por otra parte, se muestran las geometrías y el dominio de cálculo utilizado y se incluyen los resultados de los estudios de independencia.

La dinámica de fluidos computacional, es una herramienta esencial en los estudios fluido-dinámicos ya que permite simular un gran número de casos a un coste temporal y económico atractivos para el usuario comparado con los estudios experimentales. No obstante, comparado con estos últimos, que serían los que más se ajustarían a la realidad, las simulaciones CFD requieren de una correcta selección de modelos, configuraciones y metodología adecuada para que la solución sea veraz.

Los programas de simulación CFD, resuelven un flujo dado mediante ecuaciones de conservación de las que derivan diversos modelos matemáticos. Dichos modelos, permiten resolver numéricamente el problema obteniendo si ha sido correctamente configurado, una solución aproximada a la realidad. Para poder aplicar dichas ecuaciones de conservación, se discretiza el dominio continuo del fluido de estudio, en un número finito de elementos (celdas) convirtiéndolo así en un sistema de ecuaciones continuas.

Para un mayor resolución, se busca que el tamaño de las celdas sea pequeño, sin embargo, debido al coste computacional y los requerimientos de prestaciones del terminal disponible, este tamaño de las celdas debe ser lo suficientemente pequeño para una correcta resolución.

### 3.2.1. Metodología CFD

Puesto que la base del proyecto trata sobre simulaciones CFD, se va a proceder a detallar los pasos de su metodología a continuación.

Primero de todo, es una selección de la geometría a estudiar y la de un dominio adecuado que no altere la solución. El siguiente paso, es la selección de los modelos físicos que mejor se ajusten al problema de estudio, lo cual determinará fundamentalmente la fiabilidad de los resultados.

A continuación, se procede a discretizar el dominio en celdas. El tamaño de estas dependerá de la zona en la que se encuentren del dominio fluido: lejos de la geometría de interés tendrán un tamaño más grande pues serán más sencillo de resolver al no estar perturbado el fluido; mientras que en zonas más cercanas al sólido y de importancia en cuanto a desprendimiento como retrovisores, parte delantera y trasera o ruedas, se requerirá de un refinado mayor.

La malla, se verá sometida a un estudio de independencia en el que empezando por una menos refinada, se vaya comparando cada una de ellas con la siguiente con mayor refinado. Esto permitirá la elección de la solución que mejor comprometa el coste computacional y fiabilidad; es decir, que contenga un número de celdas mínimo, proporcionando una solución con resultados con un error asumible con respecto de una solución con mayor resolución. Esta independencia, se procede a realizar con el dominio, escogiendo longitudes aguas arriba y abajo, anchuras y alturas que presenten bajos errores entre sí.

## 3.3. Modelos de turbulencia

Los programas de simulaciones CFD, emplean las ecuaciones de conservación, la ecuación de estado y las ecuaciones de transporte para la turbulencia para la resolución de los diversos casos. Las ecuaciones de conservación corresponden con la ecuación de la continuidad, las ecuaciones de Navier-Stokes de la conservación de cantidad de movimiento lineal, así como la conservación de la energía.

Para poder resolver las anteriores ecuaciones, se emplean diversos modelos diferenciados por las ecuaciones de transporte utilizadas para la resolución.

- **Spalart - Allmaras** ( $s - a$ ): Resuelve únicamente una ecuación de transporte para la difusividad modificada,  $\nu$ . Este método es el modelo RANS con menos coste computacional ya que solamente resuelve una ecuación de transporte para la turbulencia. Este modelo, aunque atractivo en estudios de aerodinámica externa con capas límites adheridas a la pared y levemente separadas, se ha descartado pues el flujo en la estela del vehículo está completamente separado, considerándolo pues no adecuado para la resolución.

- **K - Epsilon** ( $\kappa - \epsilon$ ): Este modelo resuelve dos ecuaciones de transporte, una para la energía cinética turbulenta ( $\kappa$ ) y otra para la disipación turbulenta ( $\epsilon$ ). Este modelo en general es empleado para flujos con gradientes de presión relativamente pequeños, así como en flujos confinados donde el tensor de esfuerzos de Reynolds presenta mayor importancia. Por otra parte, el modelo necesita únicamente de condiciones iniciales o límites por lo que resulta el de mayor simplicidad de todos. Aunque podría ser una buena opción por su convergencia, este no va a ser empleado en el proyecto debido a que los gradientes de presión en los automóviles no resultan pequeños.
- **K - Omega** ( $\kappa - \omega$ ): Este modelo resuelve dos ecuaciones de transporte; una para la energía cinética turbulenta ( $\kappa$ ) y otra para el ratio específico de disipación turbulenta ( $\omega$ ).  
Existe una variante llamada K - Omega SST, que incluye un término adicional a la ecuación de transporte; con lo que se consigue resolver en el campo lejano como K - Epsilon, mientras que cerca de la pared con K - Omega. Este resulta especialmente atractivo para el presente proyecto.

### 3.4. Capa límite: $y^+$

El flujo turbulento a lo largo de una pared se considera que esta constituido por cuatro regiones en función de la distancia a la pared (Figura 3.2) . La capa más fina y próxima a la pared, en la que los efectos viscosos son dominantes, se denomina subcapa viscosa (viscous sublayer). El perfil de velocidad en esta capa está muy próximo a ser lineal y el flujo es prácticamente laminar por el efecto de la viscosidad. Justo por encima de ésta se encuentra la buffer layer, en la que el flujo es más turbulento pero los efectos viscosos siguen siendo importantes. Por encima se encuentra la subcapa logarítmica, en la que los efectos turbulentos son mucho más significativos pero todavía no son dominantes. Por último, en la región más alejada de la pared se encuentra la capa externa o turbulenta (turbulent layer), que abarca al resto del flujo en el que los efectos turbulentos dominan sobre los viscosos.

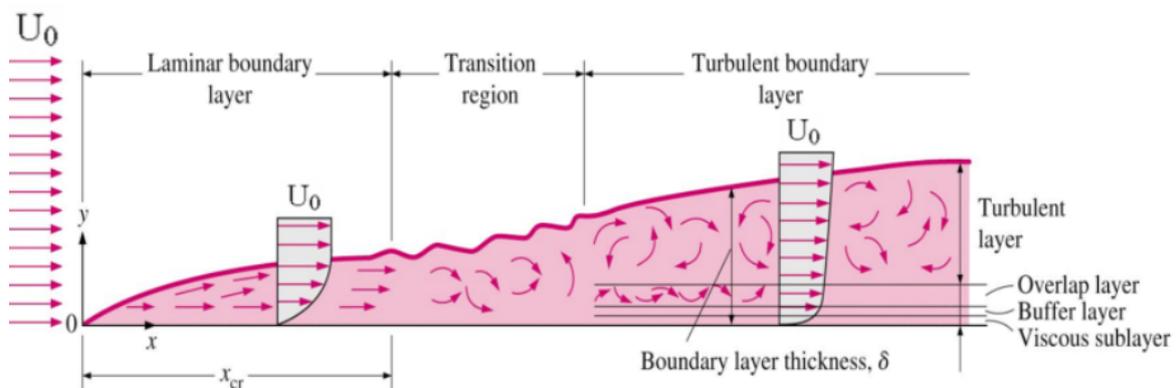
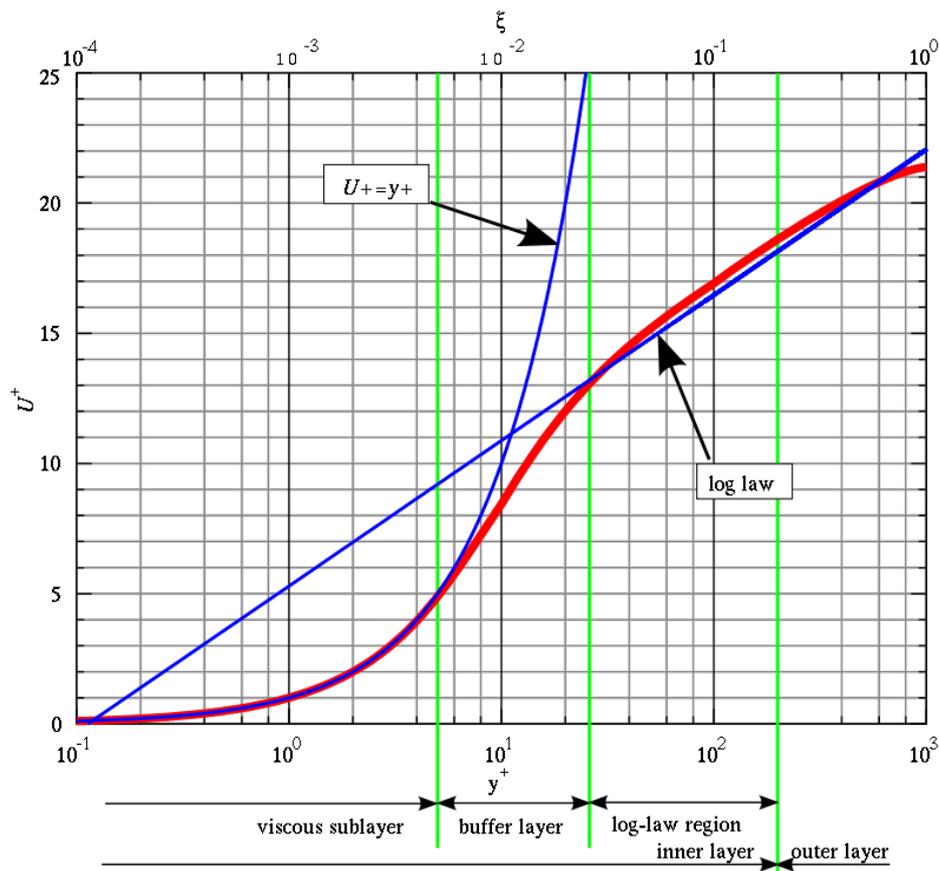


Figura 3.2: Perfil de velocidad de un flujo turbulento. [12]

Las características del flujo son muy diferentes en las distintas regiones y por ello es complicado establecer expresiones analíticas para diferenciar unas capas de otras. La mejor aproximación hasta la fecha es emplear el análisis dimensional para identificar las variables clave y utilizar datos experimentales para dar valor a las constantes que aparecen. Por ello los límites entre capas representados en la Figura 3.3 no son fijos, son orientativos ya que también varían en función de las condiciones del flujo.



**Figura 3.3:** Perfil de velocidad  $U^+$  en función de la distancia a la pared  $y^+$ . [12]

El espesor de la subcapa viscosa es muy pequeño pero aún así esta capa juega un papel importante sobre las características del flujo debido a los grandes gradientes de velocidad que en ella se producen, motivo por el cual se debe definir correctamente esta capa.

La pared amortigua el movimiento de los torbellinos y el flujo se lamina, por lo que los esfuerzos de cortadura son debidos simplemente a la viscosidad del fluido, no a la suma de ésta más la turbulenta. Considerando que la velocidad cambia de cero a casi el valor de la velocidad del flujo medio en un espesor muy estrecho, es de esperar que el perfil de velocidad en esta capa sea casi lineal, lo cual se ha demostrado con experimentos. La expresión resultante resulta:

$$\frac{U}{u_t} = U^+ = y^+ = \frac{yu_t}{\nu} \quad (3.1)$$

Esta ecuación se conoce como Ley de Pared y se ha demostrado que está correctamente relacionada con los resultados experimentales para  $0 < y^+ < 5$ . Se concluye que el espesor

de esta capa es directamente proporcional a la viscosidad del fluido e inversamente proporcional a la velocidad media del flujo ( $U$ ). Conforme aumenta la velocidad, y con ella el  $Re$ , la subcapa viscosa se hace más fina y el perfil de velocidades es más “plano”.

## 3.5. Configuración de la simulación

### 3.5.1. Geometría

Como se ha indicado a lo largo del documento, el objetivo principal del proyecto es la simulación de vehículos que puedan reducir sus distancias de seguridad por la implementación de nuevas tecnologías. Actualmente, una de las marcas automovilísticas pioneras en su desarrollo, es Tesla, es por esto, que se ha escogido el modelo Tesla Model S para la realización del presente estudio. En la Figura 3.5, se pueden observar las simplificaciones que se han realizado al diseño comparado con el de la Figura 3.4. Principalmente se observa que las ruedas han sido modificadas para reducir el número de elementos a la hora de realizar el mallado, para así tener una resolución más rápida dada la potencia computacional disponible. También se han simplificado detalles del carenado como los tiradores de la puerta o las luces; el parachoques delantero también tiene menos detalles que los originales así como el suelo que es un suelo plano salvo que se ha mantenido la forma del difusor pues este tiene influencia en la resistencia y sustentación. Por otra parte, se ha realizado solamente la simulación de media geometría puesto que al ser una geometría simétrica en uno de los planos, bastará con resolver medio cuerpo.



Figura 3.4: Geometría Tesla Model S. [13]



**Figura 3.5:** Geometría simplificada del Tesla Model S con plano de simetría.

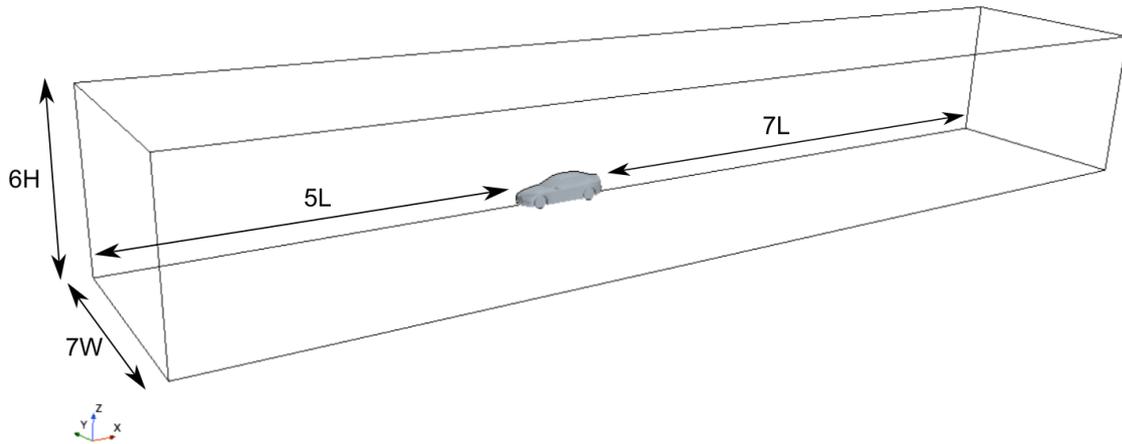
Las principales dimensiones del automóvil usado para el estudio se presentan en la siguiente la tabla 3.1.

Nomenclatura	Nombre	Valor [m]
Longitud	L	4.969
Anchura	W	2.166
Altura	H	1.393

**Tabla 3.1:** Dimensiones principales de la geometría empleada.

### 3.5.2. Dominio computacional

En la Figura 3.6, se pueden observar las principales dimensiones del dominio computacional empleado para el caso de estudio. El tamaño de dicho dominio garantiza que las condiciones de contorno impuestas no influyan sobre los resultados de la simulación, además no presenta bloqueo del dominio de la simulación. Inicialmente, se usaron dimensiones propuestas en [14] que trata de la simulación de vehículos tipo fórmula, pero estas fueron modificadas para cumplir los requisitos de independencia de dominio.



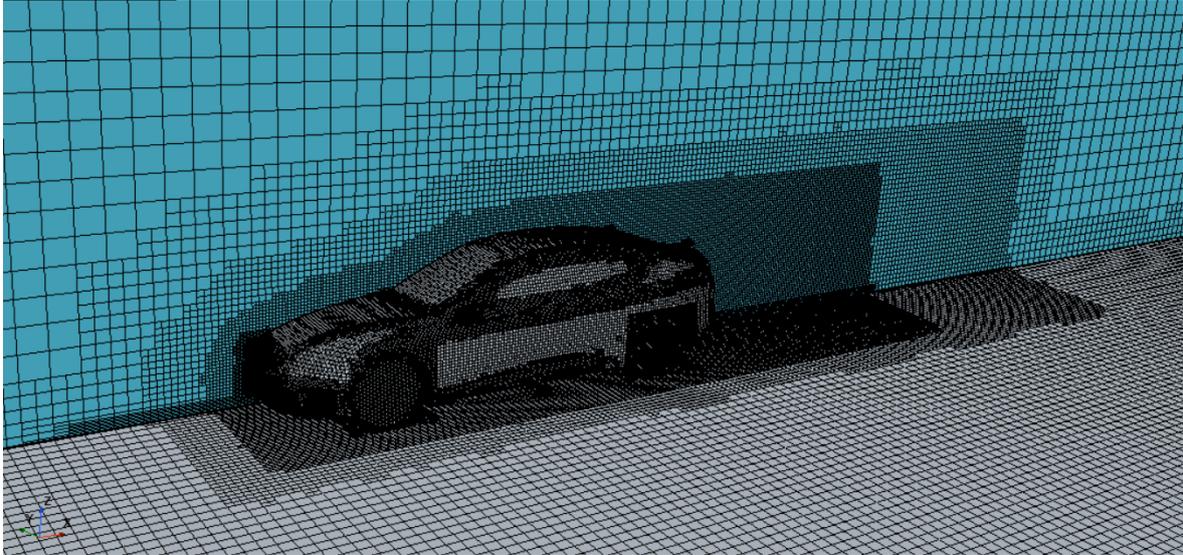
**Figura 3.6:** Dominio para la geometría dada referenciada a las dimensiones principales de la tabla 3.1

Se ha seleccionado la longitud ( $L$ ), anchura ( $W$ ) y altura ( $H$ ) del vehículo para crear las dimensiones del dominio. La dimensión aguas abajo de la geometría es mayor que la de aguas arriba puesto que el flujo se encontrará desprendido, es por esto que se amplía dicha distancia hasta el *Outlet*, zonas que se desarrollarán y definirán próximamente en la sección 3.6.2.

En los casos de estudio de vehículos en formación, se mantendrán las anteriores dimensiones tanto aguas arriba ( $5L$ ) como aguas abajo ( $7L$ ) del coche líder como del perseguidor, es por esto que solo se aumentará el tamaño del dominio por la distancia entre vehículos pero no se verán alteradas ninguna de las otras dimensiones de este.

### 3.5.3. Mallado

En cuanto al mallado, se ha seguido una estrategia propuesta por la propia documentación del programa de simulación *Siemens Star-CCM+* encontrada en [15]. La malla empleada es estructurada con hexaedros como elementos tridimensionales. Este método, aún siendo más preciso cuando el mallado se encuentra alineado con las líneas de corriente, resulta difícil de emplear con geometrías complejas; es por esto, que en zonas donde se requiere mayor precisión, se ha optado por disminuir el tamaño de la malla, haciéndola más densa donde mayores gradientes se observan.



**Figura 3.7:** Zonas de mallado con crecimiento de celdas de forma hexaédrica.

En la 3.7 se pueden observar zonas en las que la malla resulta más densa, en especial la parte delantera, la estela del vehículo, las ruedas así como el suelo y dos zonas que envuelven el vehículo entero haciendo todas las celdas en su proximidad más pequeñas para aumentar así la precisión. Dichas zonas se pueden observar en la Figura 3.8. Las secciones rosas en la imagen inferior, son volúmenes de control que se han seleccionado para un mayor refinado como se ha comentado anteriormente.

Así mismo, con el objetivo de capturar los efectos de la capa límite, se genera una *prism layer* cerca de la pared del vehículo con un total de 10 capas. Se asegura que la mayor parte del vehículo y en especial la zona delantera como la trasera se encuentran en la subcapa viscosa ( $y^+ < 5$ ) como se muestra en la Figura 3.9. En dicha figura se observa que la mayor parte del vehículo se encuentra en dicho objetivo aunque hay zonas que superan el valor pero la no ser zonas de desprendimiento de flujo se toma como correcto el resultado para así también poder simular con mayor fluidez dada la potencia computacional disponible.

Las características principales de la malla escogida finalmente tras la independencia de la malla de la sección 3.7.2 (será justificada la elección en dicha sección) serán las de la malla *Mesh 03*, sus características vienen detalladas a continuación:

- **Tipo de malla y elemento:** Como se ha comentado previamente, la malla empleada en este proyecto será estructurada con elementos hexaédricos puesto que el flujo está relativamente alineado con la geometría.
- **Ratio de crecimiento:** Se ha impuesto un *growth rate* lo suficientemente bajo como para no aumentar considerablemente el número de elementos y que la transición de tamaños entre celdas sea suave. Se ha optado por 1,15 en las superficies y la opción lenta del programa en los volúmenes.
- **Refinamientos:** Se ha reducido el tamaño de la celda con respecto al tamaño global de 0,24 m en las zonas de mayor complejidad geométrica y de mayor interés

aerodinámico de modo que estas zonas observadas en la Figura 3.8 quedan bien definidas. En la Tabla 3.2 vienen definidos los refinamientos de cada volumen de control con respecto al tamaño base.

Zona	Tipo de control	% Base	% Base mínimo
Coche	Superficie	11.25	5
Suelo	Superficie	50	5
Offset 0.2m	Volumen	11.25	5
Offset 0.5m	Volumen	22.5	5
Suelo coche	Volumen	7.5	5
Ruedas	Volumen	9	5
Retrovisor	Volumen	9	5
Frontal	Volumen	5	5

**Tabla 3.2:** Tipos de refinamiento de malla según zonas.

- Capa límite:** Se realiza la malla una capa límite de 8 mm de espesor, con 10 capas y con un ratio de crecimiento igual a 1.4. Con estos parámetros se busca que el valor de  $y^+$  sea del orden de 1 o menor en todas las paredes del dominio y en especial en zonas de interés, para así modelar la subcapa viscosa y obtener los resultados sobre las paredes del vehículo con mayor exactitud. Para estos valores, se ha tomado como referencia la documentación del programa de simulación [15] así como [16].

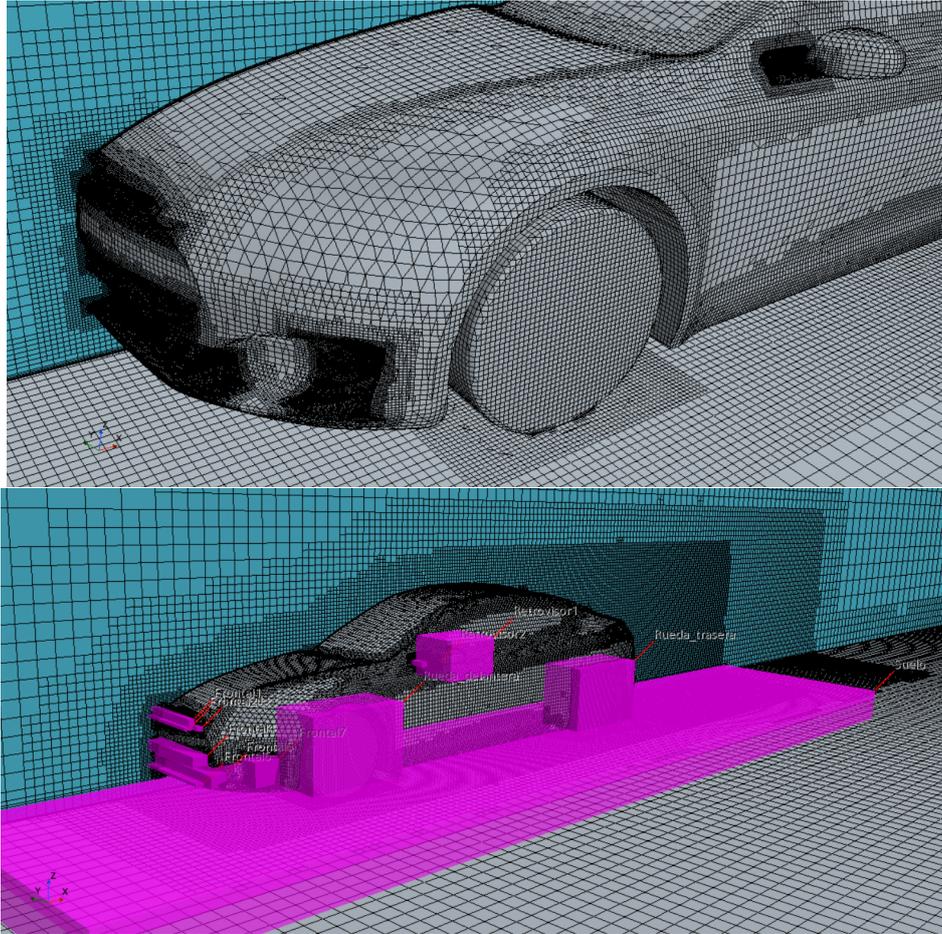


Figura 3.8: Zonas de control de la malla para mayor precisión.

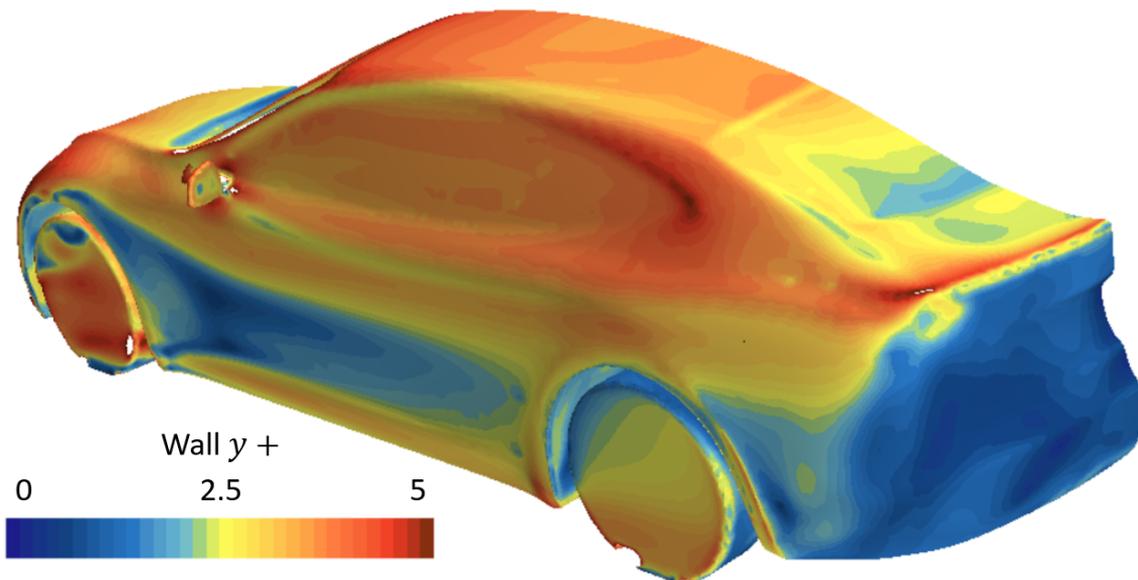


Figura 3.9:  $y^+$  en las paredes del automóvil.

## 3.6. Configuración del caso

A continuación, se procede a detallar la configuración elegida en el proyecto con la finalidad de que los resultados obtenidos sean los más similares a la realidad. Para ello, será necesario definir las distintas condiciones de contorno y los modelos empleados en la simulación.

### 3.6.1. Selección de modelos

Los modelos seleccionados para los casos simulados en el presente estudio son expuestos en este apartado.

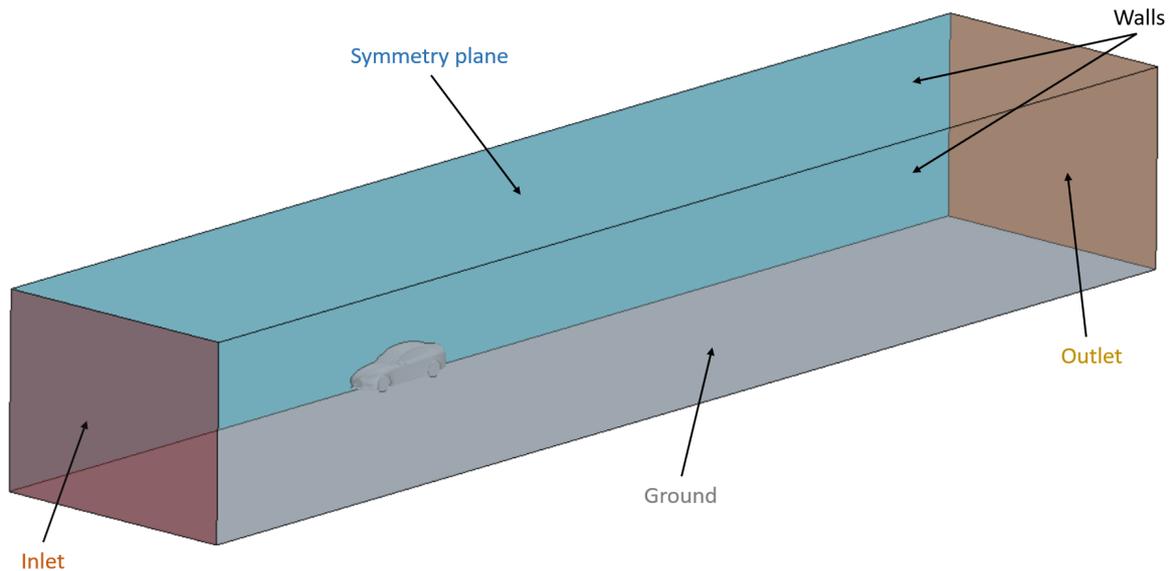
- *Three Dimensional*. Para poder simular correctamente el fluido alrededor de un vehículo, hará falta que el estudio sea tridimensional y así poder capturar los efectos del desprendimiento y los vórtices generados.
- *Steady*. Aunque en la realidad esto es difícil de aplicar puesto que se vería afectado por viento, otros vehículos, se han llevado a cabo las simulaciones en estacionario para así aislar los efectos que se buscan en los objetivos del problema.
- *Gas*. El fluido estacionario se trata de aire con condiciones en la entrada de  $\rho = 1,177 \text{ kg/m}^3$  y viscosidad dinámica  $\mu = 1,846 \cdot 10^{-5} \text{ Pa s}$
- *Coupled Flow*. Se selecciona dicho modelo por la mejor convergencia que presenta ante el modelo segregado ya que ofrece la posibilidad de modificar el número de Courant.
- *Constant density*. Los casos simulados se realizan con flujo incompresible debido al rango de velocidades a las que pueden ir los automóviles.
- $\kappa - \omega$  *SST*. Como se había introducido en la Sección 3.3, el modelo  $\kappa - \omega$  *SST* ha sido seleccionado para las simulaciones de los casos con un tratamiento de pared en función del  $y^+$ .

### 3.6.2. Condiciones de contorno

Una vez con la geometría definida, se define un volumen de control que recoja todo el dominio de interés como se ha visto en la Subsección 3.5.2. A cada una de las partes de dicho dominio, se le asignarán unas condiciones de contorno. En la Figura 3.10 se identifican cada una de las partes del dominio.

- *Velocity inlet*. Se le asigna al *Inlet* pues será donde entre el fluido al dominio computacional, la velocidad de este vendrá impuesta por las condiciones de la simulación.
- *Pressure Outlet*. Se le impone la condición de la presión atmosférica al *Outlet*.
- *Symmetry Plane*. Como únicamente se está simulando medio automóvil, se impone la condición de simetría en una de las paredes.

- *Wall*. A las dos paredes del dominio, se le ha impuesto la condición de pared aunque con la condición de *Slip*, pues se considera que no afectan a la solución al estar suficientemente lejos de la geometría.
- *Ground*. Tanto a la superficie del suelo como a la geometría se le ha asignado la condición de pared pero esta vez con la condición de *No Slip*, para así simular el flujo adherido a la geometría y de ahí el interés de la capa límite con un  $y^+ < 5$ . Además se le ha impuesto la condición de que mueva con la velocidad del fluido, simulando así el movimiento del coche respecto del suelo.



**Figura 3.10:** Dominio con las partes identificadas para su asignación de condiciones de contorno.

## 3.7. Estudios de independencia

### 3.7.1. Independencia de dominio

Debida a la geometría de estudio, la independencia del dominio se obtiene generando un volumen de estudio del fluido lo suficientemente largo para que no sea perturbado aguas arriba y/o abajo, así como lo suficientemente alto y ancho para que las paredes del volumen tampoco afecten a la solución. Inicialmente, como se ha comentado en 3.5.2, se tomaron las dimensiones propuestas para la simulación de vehículos del estudio [14]. Sin embargo, estas se aumentaron a las dimensiones expuestas en dicha sección puesto que la distancia entre la entrada, la geometría y la salida del fluido eran demasiado pequeñas y afectaban a la solución.

	Longitud total	Anchura	Altura	$C_D$	Var. %	$C_L$	Var. %
Dominio 01	8L	4W	3H	0.29	4.69	0.054	59.55
Dominio 02	12L	7W	6H	0.279	0.72	0.056	58.16
Dominio 03	15L	10W	9H	0.277	-	0.134	-

**Tabla 3.3:** Independencia del dominio para diferentes dimensiones analizadas.

En la Tabla 3.3, se observan las dimensiones y las variaciones de cada uno de los casos estudiados para su independencia, se puede observar que el primer  $C_D$  tiene una variación respecto al caso con mayores dimensiones por lo que se asume como erróneo, es por esto que se procede con las dimensiones ya expuestas en la sección 3.5.2 del *Dominio 02*.

El coeficiente de sustentación o de downforce, presenta variaciones que no pueden asegurar la independencia del dominio pero que en la sección próxima se analizará con más detalle, principalmente vendrá limitada dicha variación por la potencia computacional disponible.

### 3.7.2. Independencia de malla

Con el objetivo de verificar la discretización espacial se ha realizado un estudio de independencia de malla utilizando diferentes resoluciones de celda como se muestra en la Tabla 3.7.2. El estudio consiste en la obtención del coeficiente de resistencia y de sustentación del vehículo a la velocidad de interés de estudio (33  $m/s$ ). En la Tabla 3.7.2 se muestran los resultados obtenidos para distintos casos de refinado de malla. A medida que se disminuye el tamaño de las celdas, se observa que el error es cada vez menor respecto al caso más detallado para el coeficiente de resistencia. Aunque no se haya llegado a la condición de que la variación entre dos casos es menor del 1%, se ha asumido como correcto el error obtenido de un 1,62% puesto que el siguiente caso de malla exigía demasiada potencia computacional como para poder resolverla y permitir resolver más casos de interés del trabajo.

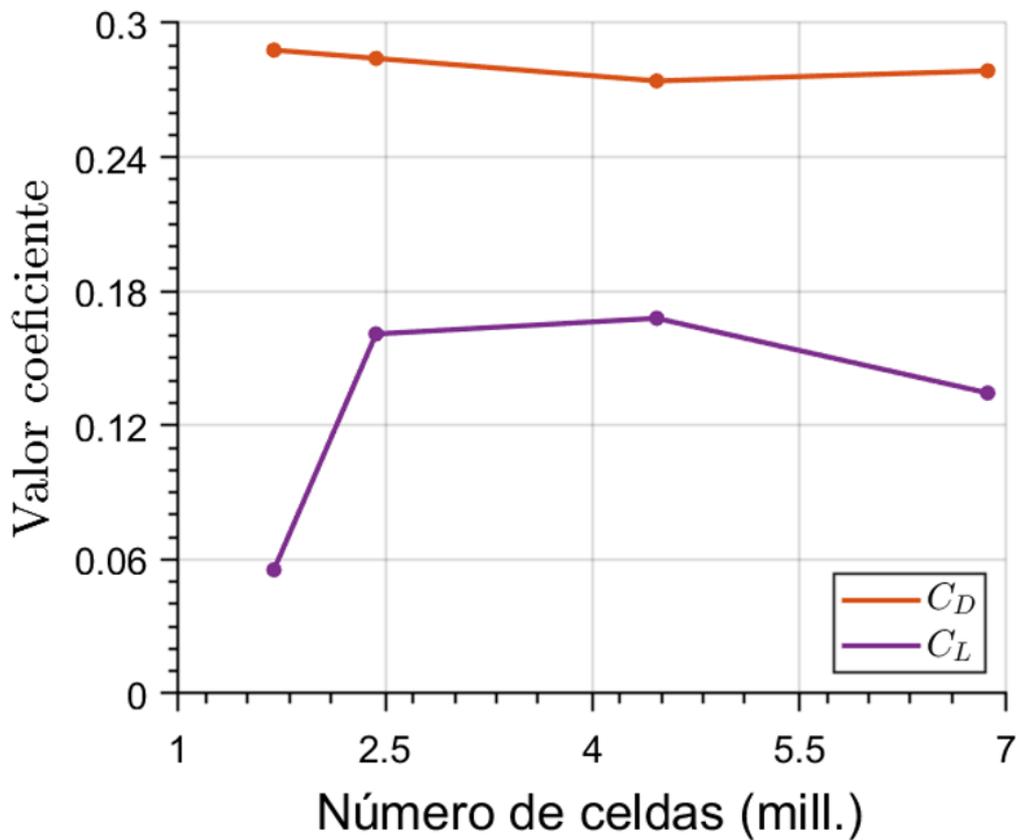
Por otra parte, se observa que el coeficiente de downforce no se acerca a ese 1% buscado. Esto lo vamos a asumir aunque se sepa que el resultado no es fiable, pues como se ha comentado anteriormente, no es el objetivo del estudio y la potencia computacional disponible no es suficiente como para refinar una malla que permita obtener una variación de ambos coeficientes lo suficientemente pequeña como para realizar la independencia de malla completa.

	Celdas	$C_D$	Variación %	$C_L$	Variación %
Mesh 01	1690737	0.2879	3.33 %	0.055	58.78 %
Mesh 02	2430868	0.2842	2.00 %	0.161	19.62 %
Mesh 03	4464456	0.2741	1.62 %	0.168	24.87 %
Mesh 04	6862341	0.2786	-	0.134	-

**Tabla 3.4:** Independencia de malla con la selección para futuras simulaciones.

Si se grafican los resultados en la Figura 3.11, se puede observar que las variaciones

del  $C_D$  en cualquiera de los casos son bastante pequeñas, igualmente, se continua con el procedimiento habitual de escoger la de menor variación respecto a la más precisa.

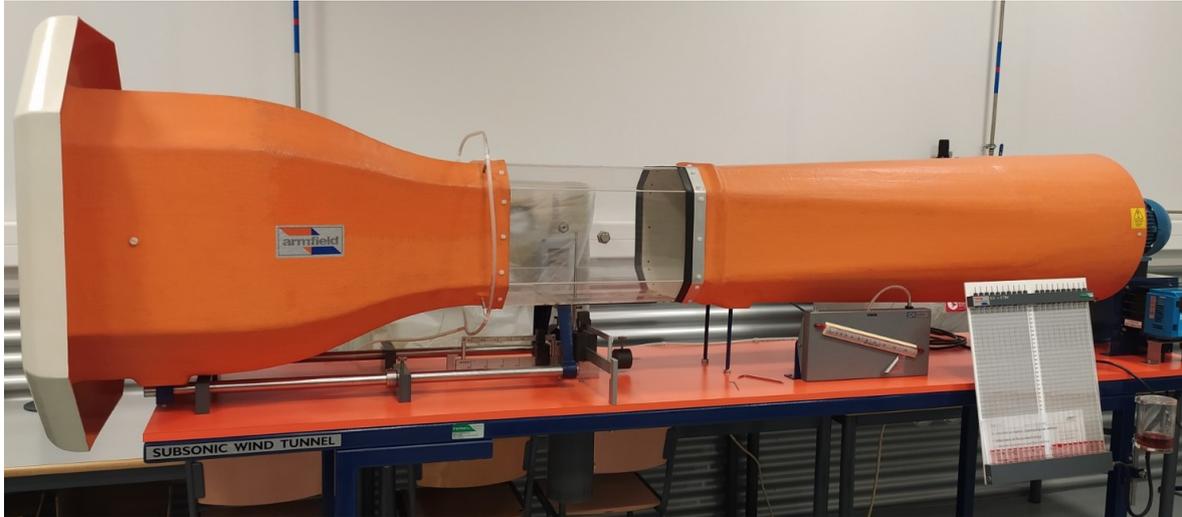


**Figura 3.11:** Coeficiente de resistencia para las diferentes resoluciones de malla.

Así pues, como ya se había introducido en secciones previas, se empleará la *Mesh 03* para los estudios del trabajo, con sus características detalladas en la sección 3.5.3.

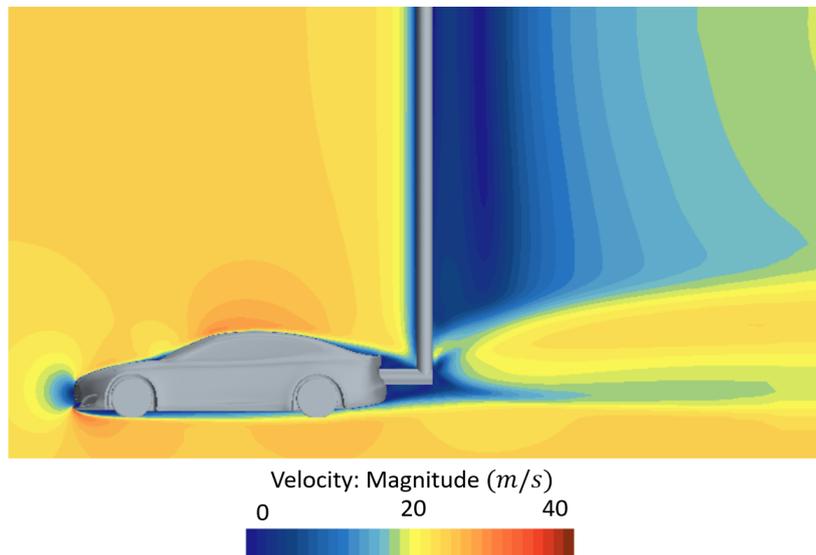
### 3.8. Túnel de viento

Otro método de comprobar que los resultados obtenidos son precisos, es mediante la introducción de un modelo a escala del vehículo usado en un túnel de viento. Para el presente trabajo, se ha podido emplear un túnel de viento de escala 1:43 dispuesto por la Universidad Politécnica de Valencia; observado en 3.12.



**Figura 3.12:** Túnel de viento subsónico a escala 1:43 de la Universidad Politécnica de Valencia.

Para ello, se imprimió el automóvil a dicha escala y se le insertó una varilla en la parte trasera para poder introducirlo en el túnel y realizar las mediciones como se observa en la Figura 3.14. Esto implicaba, que para comprobar el resultado mediante CFD, se tenía también que realizar la simulación con dicha varilla puesto que afecta en la zona de la estela del vehículo. El resultado del campo de velocidades alrededor del modelo se presenta en la figura 3.13.



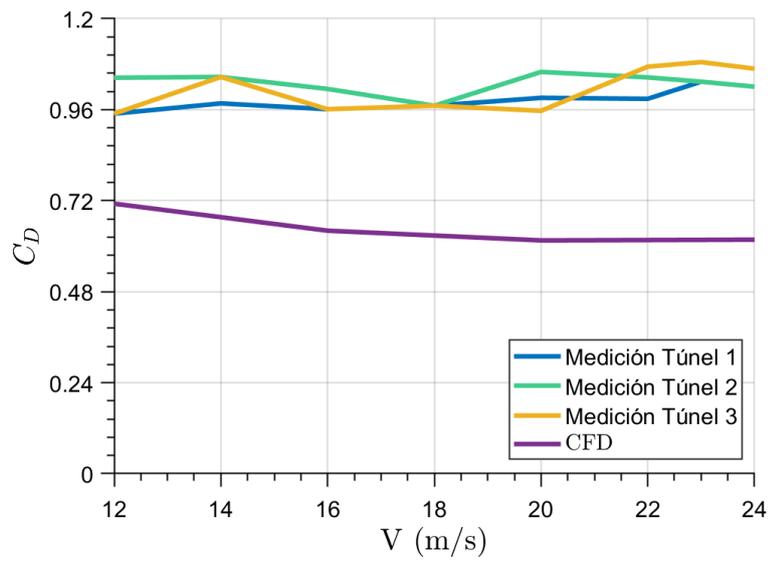
**Figura 3.13:** Campo de velocidades en el plano de simetría del modelo a escala con la varilla para una  $V_{inf} = 24m/s$ .



**Figura 3.14:** Tesla Model S con su varilla e introducido en el túnel de viento subsónico.

Analizando los resultados obtenidos de la gráfica 3.15, se observa que hay una discrepancia en cuanto al obtenido en el CFD. Esta diferencia puede ser debida a que la rugosidad del modelo 3D impreso, no es la óptima ya que se tonan las diferentes capas de plástico impresas. Por otra parte, no se ha podido asegurar que el número de Reynolds en el túnel de viento sea el mismo que el del CFD. Aunque como se comprobará en próximas secciones, este no tiene casi influencia. También podría haber afectado el ángulo de ataque del automóvil, pues al ser un sistema de balanzas, es difícil de situar con precisión el vehículo.

Así pues, puesto que la diferencia del coeficiente de resistencia es significativa, no se puede asegurar una independencia por este método.



**Figura 3.15:**  $C_D$  de mediciones del túnel y mediante CFD.

# 4. Resultados

---

## 4.1. Introducción

En el presente capítulo, se procede a analizar los resultados obtenidos mediante CFD. En un primer lugar se presenta el estudio del caso de análisis de un automóvil completamente aislado para poder así comparar futuros análisis con los resultados obtenidos de este.

Posteriormente, como se ha expuesto en la introducción del trabajo, se procederá a realizar el análisis de diversos casos de automóviles en formación a diversas distancias de separación de seguridad. Esto, permitirá analizar la influencia del coeficiente de resistencia sobre la resistencia y por ende, en el consumo.

## 4.2. Análisis de los resultados CFD caso aislado

En esta sección, se va a proceder a analizar los resultados obtenidos en la simulación de la *Mesh 03* de la Tabla 3.7.2. Este primer estudio permitirá comparar los resultados de vehículos en formación para analizar el efecto que tiene la separación de estos.

### 4.2.1. Coeficiente de resistencia y de sustentación

En la Tabla 4.2.1 se muestra la influencia de la presión y del cortante sobre el coeficiente de resistencia y de sustentación. Se puede observar, que la influencia en la resistencia por la diferencia de presiones es mucho mayor que el cortante. Se está considerando que la superficie del automóvil es suave y no muy rugosa; aunque existe una capa límite viscosa cerca de las paredes de esta, su influencia no es alta debido a que se está trabajando con números de Reynolds del orden de  $\cdot 10^7$ , por lo que los resultados son coherentes. Por otra parte, se puede observar que el coeficiente de sustentación es negativo. Esto dependerá de como se configure en el programa de simulación, en este caso, indica que se está generando una fuerza en sentido de "z" negativo, por lo que 'pegará' el automóvil al suelo. Comparado con el coeficiente de resistencia, se observa que el de sustentación es significativamente menor, esto no es ningún problema pues el vehículo se ha diseñado para carretera y no para ser un coche de carreras en los que interesa tener altos valores de coeficiente de sustentación. Si hubiera salido positivo, podría ser un error de diseño del vehículo, pues según aumentara su velocidad, podría perderse el control del coche puesto que se 'elearía' del suelo perdiendo adherencia.

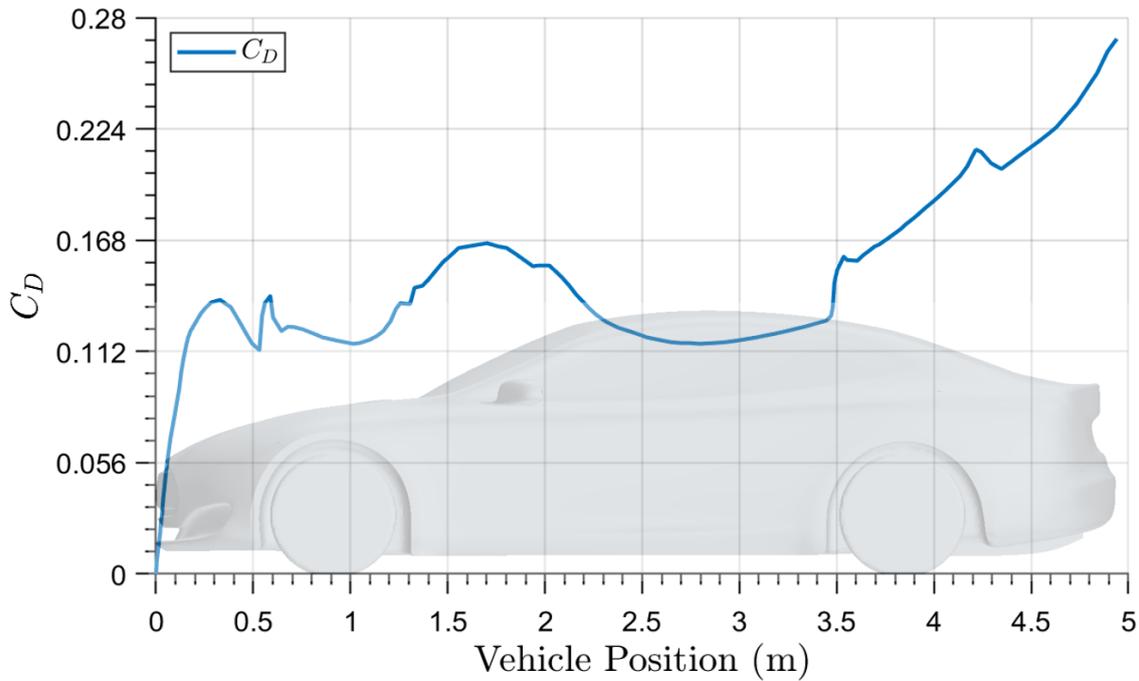
El coeficiente de resistencia, por su parte tampoco resulta muy elevado si se compara con los vehículos que están actualmente en el mercado como se observa en la Figura 1.2; resulta que se encontraría muy por debajo de la gran mayoría.

Coefficiente	Resistencia ( $C_D$ )	Sustentación ( $C_L$ )
Presión	0.245	-0.17
Cortante	0.029	0.0036
Neto	0.274	-0.167

**Tabla 4.1:** Componentes de los coeficientes sobre el automóvil.

El resultado de  $C_D = 0,274$ , se puede comparar con los publicados propiamente por Tesla en [17]. En dicho artículo, se comenta que varios vehículos se han introducido en el túnel de viento obteniendo sus coeficientes de resistencia. En cuanto al modelo que se está analizando en el presente proyecto, el Tesla Model S, obtuvo un coeficiente de  $C_D = 0,24$ , lo cual es sorprendentemente bajo para ser un coche de carretera, pero no imposible. Por lo que la diferencia del 14% se va a asumir inicialmente; sin embargo, se procederá a realizar más verificaciones puesto que el estudio fue publicado en 2014 y el diseño actual podría haber cambiado.

Si se representa la distribución del coeficiente de resistencia a lo largo del vehículo, se obtiene la Figura 4.1, en la que se puede analizar que dicho coeficiente aumenta principalmente en valor en la zona de alta presión delantera, y por la 'succión' que se produce tras el desprendimiento en la zona trasera. También se observan unos picos en la entrada y salida de las ruedas pues el fluido interactuará con estas y provocará desprendimientos. Las bajadas por su parte, se producen por zonas de recirculación en las que el cortante pasa a ser negativo sobre la superficie del vehículo y dichas superficies presentan menos pendiente o zona de impacto con el fluido y por tanto menos interacción.



**Figura 4.1:** Distribución del coeficiente de resistencia a lo largo del vehículo.

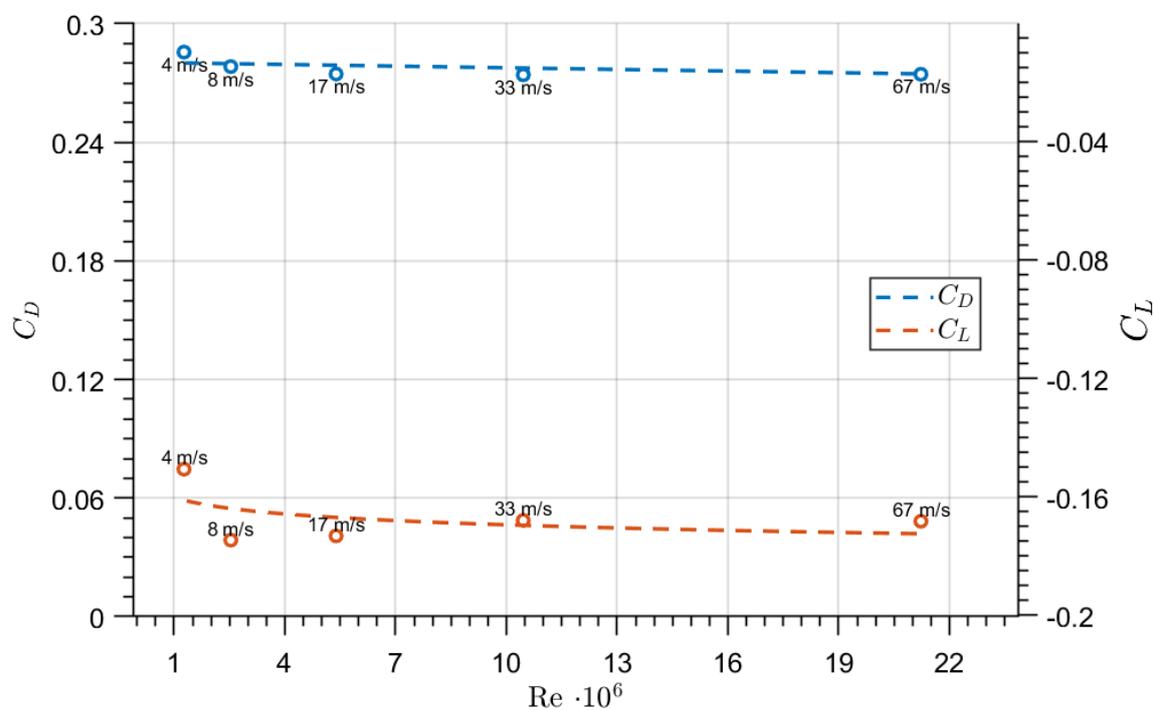
## 4.2.2. Influencia del número de Reynolds

Por otra parte, se ha estudiado para la *Mesh 03*, la influencia en el coeficiente de resistencia del número de Reynolds. Esto se ha realizado a variando la velocidad pues para el caso de estudio, se quiere aislar dicha variable y no se pretende cambiar la densidad del aire, la viscosidad del mismo o la geometría del vehículo. Los resultados obtenidos se exponen en la Tabla 4.2.2.

Velocidad [m/s]	$C_D$	Variación $C_D$	$Re \cdot 10^7$
67	0.2744	0.11 %	2.12
33	0.2741	0.00 %	1.05
17	0.2745	0.15 %	0.54
8	0.2783	1.54 %	0.25
4	0.2856	4.20 %	0.13

**Tabla 4.2:** Independencia del número de Reynolds.

Como se puede observar en la Tabla 4.2.2, no hay grandes variaciones en el coeficiente de resistencia para diversos números de Reynolds. Si se grafican los resultados, se observa en la Figura 4.2 también la tendencia exponencial que presenta el coeficiente respecto a la variación de velocidad, que aunque parece que vaya a presentar grandes variaciones, observando los resultados respecto de los ejes se puede comprobar que no es así.

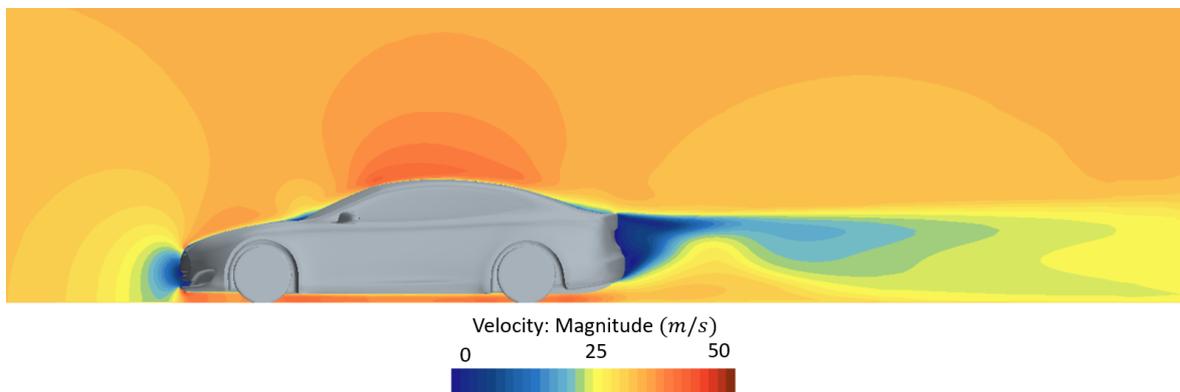


**Figura 4.2:** Coeficiente de resistencia para diversos números de Reynolds y su tendencia exponencial.

### 4.2.3. Análisis del campo de velocidad, de las estructuras del flujo mediante la visualización del campo de vorticidad y del cortante sobre la superficie del vehículo

En la Figura 4.3, se puede observar la distribución de velocidades del flujo alrededor del vehículo.

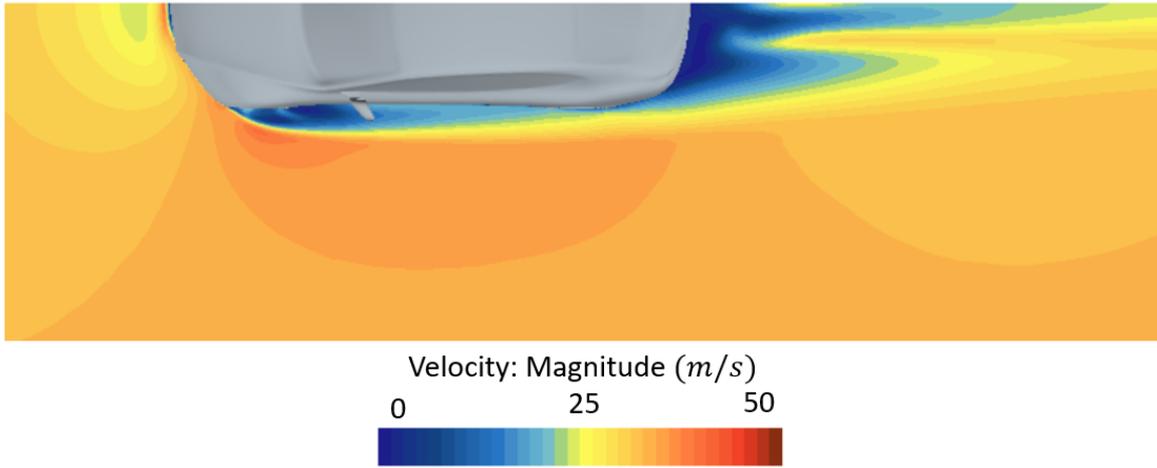
Se observa una zona de estancamiento en la zona delantera pues es fluido que se encuentra parado debido al impacto frontal con este sin haber podido adaptarse a este. Se observa también una zona en la parte superior en la que el flujo se ha acelerado por la reducción de la presión en esa zona por la curvatura del vehículo. Por último, se puede como la el flujo se desprende con el paso del vehículo y esta estela se traslada varios metros aguas abajo.



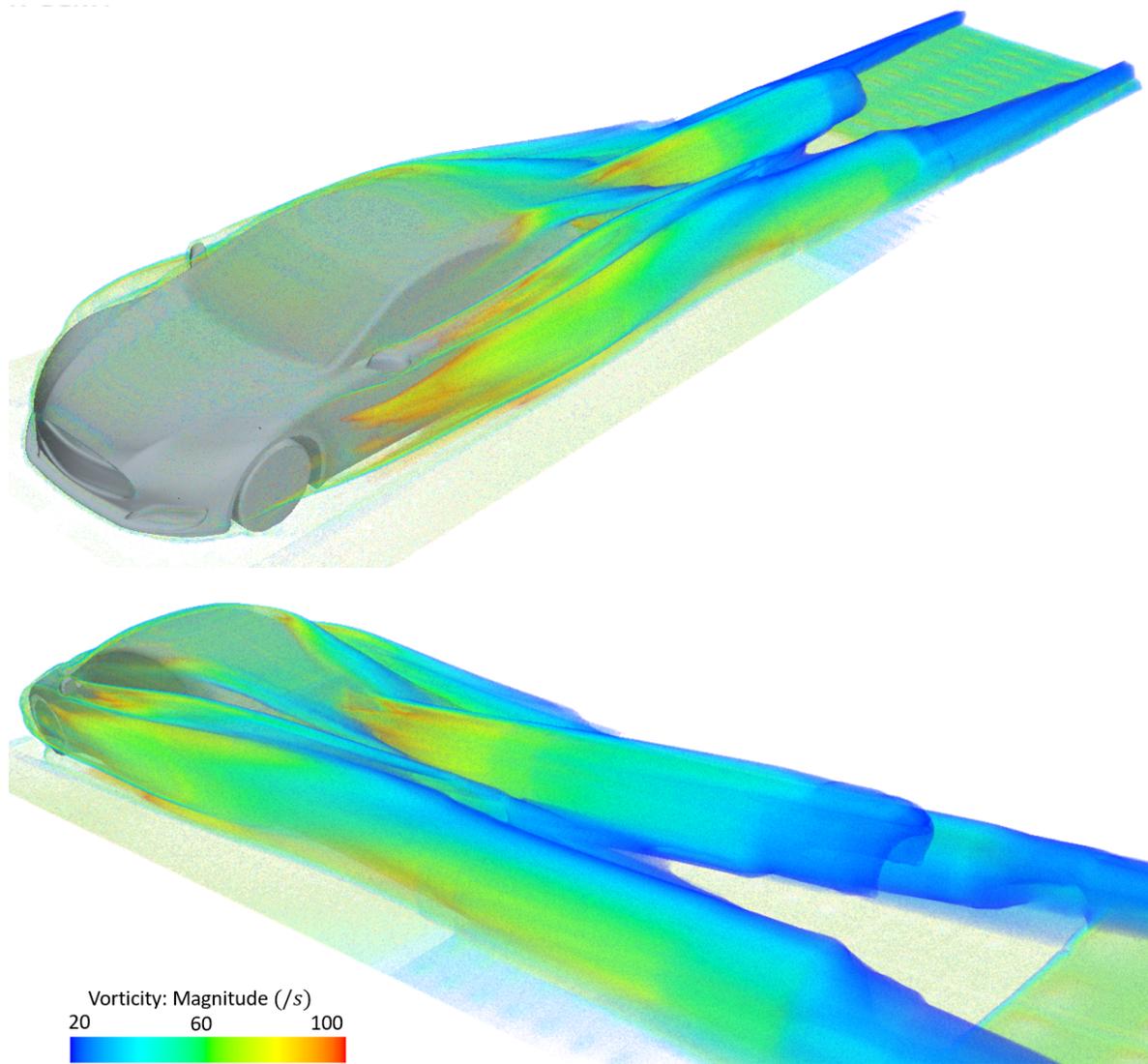
**Figura 4.3:** Campo de velocidades en el plano de simetría del vehículo aislado para una  $V_{inf} = 33$  m/s.

En la Figura 4.4, se observa que la estela presenta una serie de picos; el externo viene por el lateral del vehículo y su curvatura y el centra por la combinación de estos dos y su simetría. Por otra parte se observa el desprendimiento del fluido en la zona de la rueda delantera y el retrovisor.

Esto se puede comprobar en las Figuras 4.5, donde se observa la vorticidad que se genera tras la rueda y el retrovisor. También estos tres grandes vórtices que han sido generados y se trasladan aguas abajo.



**Figura 4.4:** Campo de velocidades desde la planta del vehículo aislado para una  $V_{inf} = 33$  m/s.



**Figura 4.5:** Vorticidad alrededor del automóvil.

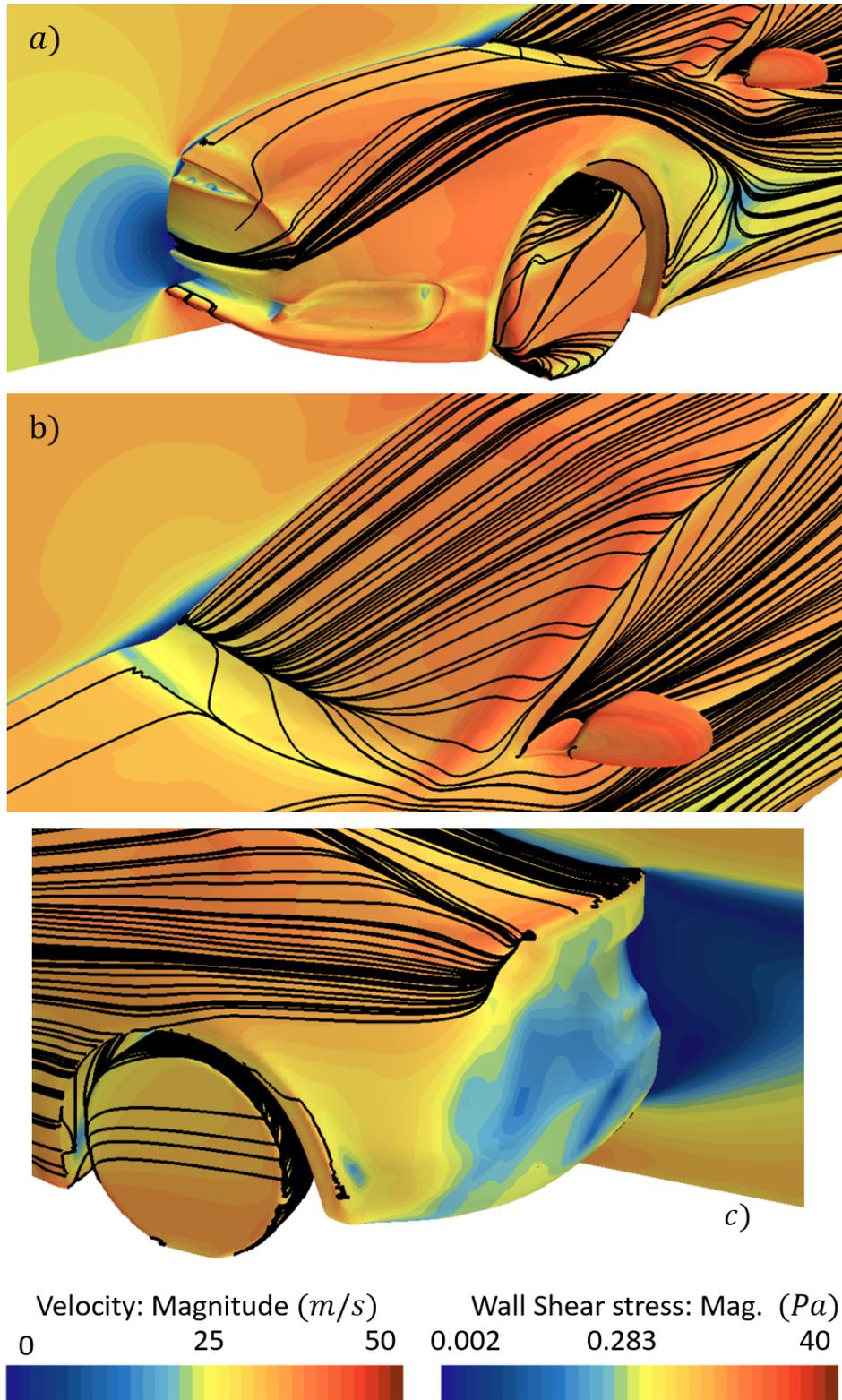
Esta serie de vórtices que se generan y se trasladan aguas abajo, van a ser los principales contribuyentes a la hora del aumento del coeficiente de resistencia; es por esto, que el objetivo de los diseñadores es disminuirlos al máximo.

Dichos vórtices, son los que el trabajo propone de mitigar, pues con la reducción de la distancia de seguridad, estos se trasladarían menos distancia aguas abajo antes de impactar con otro vehículo, por lo que también se vería reducido el coeficiente de resistencia de esta manera.

Si se representa el cortante sobre la superficie del vehículo, se obtiene la Figura 4.6, la cual permite analizar esas zonas en las que el flujo se encuentra desprendido y por tanto genera vórtices como se ha observado previamente. En la Figura 4.6 a), se observa que en la parte frontal, se muestran líneas de corriente de cortante horizontales, lo cual indica que se encuentran en la zona de estancamiento delantera. Por otra parte, se observa también que tras la rueda delantera, hay una zona también de bajo cortante, pues es una zona de desprendimiento causada por la dicha rueda.

En *b*), se observa también una zona de recirculación en la unión entre el capó y el cristal delantero, la cual viene provocada por ese cambio de pendiente brusco. También se observa que a lo largo del pilar A del vehículo, las líneas de corriente tienden a unirse, lo cual indica que se está generando un vórtice como se puede observar en la Figura 4.5 que se desprende definitivamente sobre la altura del pilar B.

Por último, en la zona trasera del vehículo, se puede comprobar que existe una zona importante de recirculación como ya había sido expuesto en diversas secciones.



**Figura 4.6:** Cortante y líneas de corriente de cortante sobre la superficie del vehículo y con la velocidad sobre el plano de simetría para el caso de 33 m/s aislado.

#### 4.2.4. Cálculo del consumo y autonomía

Una vez realizado el análisis del coeficiente de resistencia para el caso aislado, con el coeficiente  $C_D = 0,274$  obtenido anteriormente, y la ecuación 2.2 que describía el consumo energético total, se puede proceder por tanto a aplicarla para obtener el valor del consumo para la velocidad de 120 km/h. Así pues:

$$E_{100}[V, \eta_{c_x}] = E_{100}[120, 1] = 243,5 ; \frac{Wh}{km} \quad (4.1)$$

Se ha añadido a la ecuación el término  $\eta_{c_x}$  que multiplicará a  $c_x$  pues será de utilidad para los análisis de vehículos en formación en los que la resistencia se habrá reducido y por tanto será una fracción de esta.

Conociendo el consumo, se podrá calcular la autonomía conociendo la capacidad de la batería del coche. En este caso, el Tesla Model S tiene una batería de 100 kWh. Por lo tanto, para calcularla solamente hará falta dividir dicha capacidad por el consumo que se esté produciendo en la conducción.

$$Rango_{Aislado} = \frac{100 \cdot 1000}{243,5} = 410,7km \quad (4.2)$$

Lo cual queda lejos de los 637km declarados por Tesla.

No obstante, como ya se había comentado previamente, los rangos declarados no solían reflejar la realidad pues no indicaban las condiciones a las que se había realizado el estudio.

Es por esto, que en [18], realizaron un test de conducción a 120 km/h de media con el control de crucero en las autopistas de Estados Unidos sin sistemas auxiliares activados. El resultado que obtuvieron fue de 434,5 km, lo cual supone un error del 5,8 % respecto a la autonomía obtenida en el presente estudio. Esto lleva a confirmar lo comentado anteriormente de los rangos declarados, permite también asumir como correcto el resultado obtenido mediante CFD así como verificar que el modelo preparado para próximas simulaciones es también correcto.

### 4.3. Vehículos en formación

En cuanto al estudio de vehículos en formación, se ha propuesto realizar el estudio para distancias de separación o vehículos de separación ( $x/L$ ) de 4, 3, 2, 1.5, 1, 0.5, 0.2 y 0, para poder así analizar el efecto de la distancia y poder determinar una separación que beneficie a ambos vehículos.

Por otra parte, se ha realizado este mismo estudio para una velocidad de 100 km/h, pues es una velocidad también razonable para circular por autopistas y puede permitir un aumento importante de la autonomía; pues como se observa en 2.6, el consumo aumenta prácticamente en 50 Wh/km por esa diferencia de 20 km/h.

### 4.3.1. Coeficientes de resistencia y autonomía

A la hora de realizar las simulaciones, se ha determinado el coeficiente de resistencia para poder determinar la autonomía como se ha realizado en la sección 4.2 del coche aislado. Con este se ha definido el ratio  $\eta_{c_x}$  también de la sección anterior, que reflejará el ratio entre el  $C_D$  en formación con respecto al del caso aislado

Las distancias, se han introducido como separaciones en longitudes de vehículo; es decir  $x/L$ , siendo  $x$  las distancias propuestas anteriormente, y  $L$  la longitud del vehículo de la Tabla 3.1.

Así pues, se ha procedido a realizar las simulaciones de los casos modificando las distancias entre los coches en cada una de ellas. Por otra parte, se ha optado por también realizar el análisis para 100 km/h, teniendo que resolver el caso aislado para obtener el correspondiente coeficiente de resistencia para dicha velocidad.

#### Conducción a 120 km/h

En las Tablas 4.3 y 4.4, se observan los resultados para cada una de las simulaciones. De la última, vemos que la autonomía aumenta según se reduce la distancia de seguridad. Esto es debido a que según se reduce dicha distancia, el coeficiente disminuye como ha sido explicado en la sección 2.

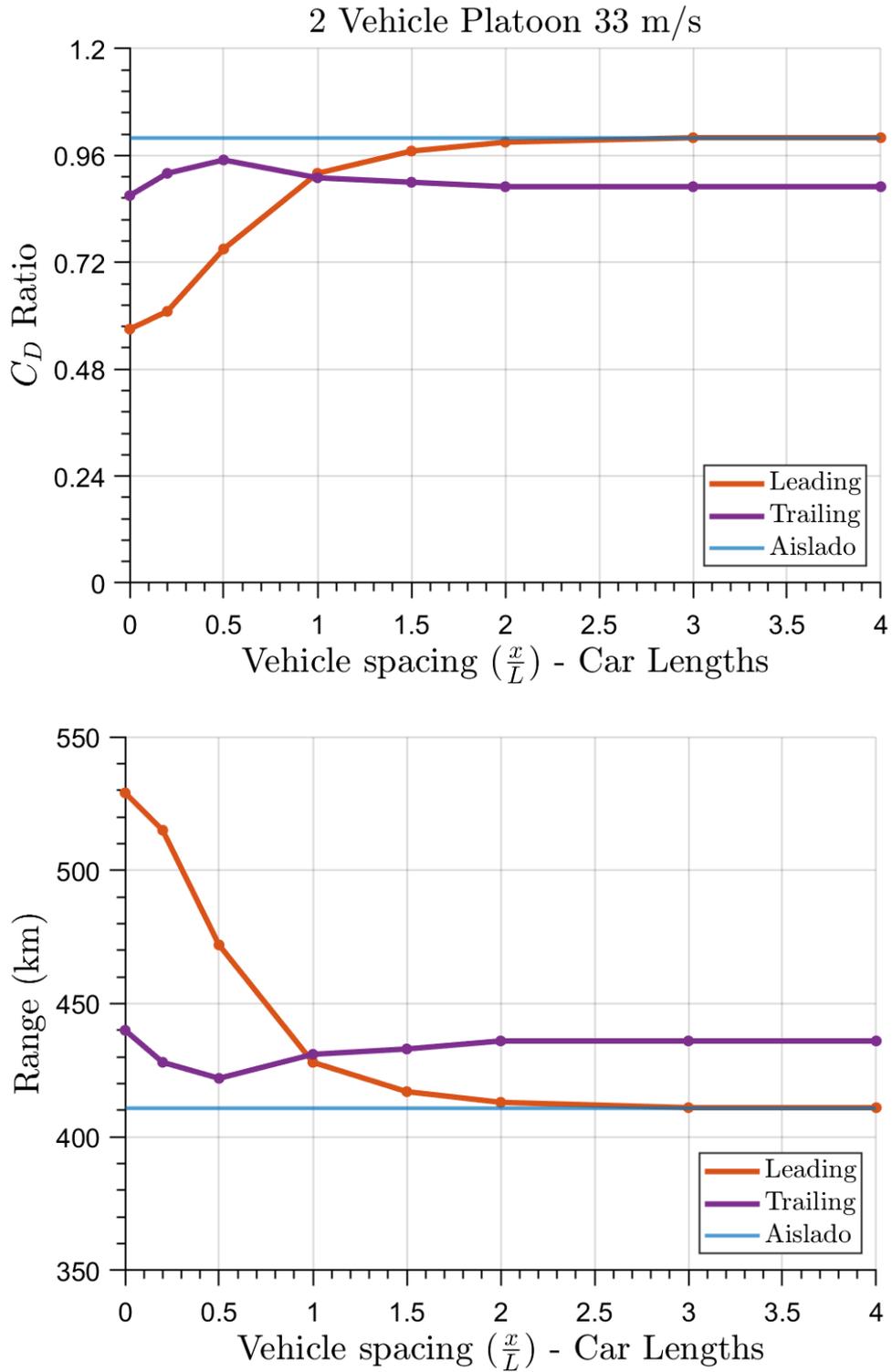
Separación ( $x/L$ )	Leading car		Trailing car	
	$C_D$	$C_D/C_{D_{Aislado}}$	$C_D$	$C_D/C_{D_{Aislado}}$
0	0.155	0.57	0.238	0.87
0.2	0.167	0.61	0.252	0.92
0.5	0.205	0.75	0.261	0.95
1	0.253	0.92	0.248	0.91
1.5	0.266	0.97	0.246	0.90
2	0.272	0.99	0.244	0.89
3	0.274	1.00	0.244	0.89
4	0.275	1.00	0.243	0.89

**Tabla 4.3:** Resultados de coeficiente de resistencia y su ratio respecto al aislado para vehículos en formación a 120 km/h. ( $x/L$ )(Longitudes de coche)

Separación	Leading car	Trailing car
$(x/L)$	Autonomía ( $km$ )	Autonomía ( $km$ )
0	529	440
0.2	515	428
0.5	472	422
1	428	431
1.5	417	433
2	413	436
3	411	436
4	411	436

**Tabla 4.4:** Resultados de la autonomía para vehículos en formación a 120 km/h.  $(x/L)$ (Longitudes de coche)

Si se representan los resultados de ambas tablas:



**Figura 4.7:** Drag ratio y autonomía según la separación ( $X/L$ )(Longitudes de coche) a 120 km/.

En la Figura 4.7, se puede analizar más fácilmente la tendencia tanto del  $C_D$  como de la autonomía.

## Conducción a 100 km/h

En las Tablas 4.5 y 4.6, se observan los resultados para cada una de las simulaciones. En este caso, como se ha comentado anteriormente, se ha procedido a analizar previamente el caso aislado para la velocidad de 27 m/s, lo cual ha resultado en un coeficiente de resistencia de  $C_D = 0,2743$ . Esto es ligeramente más elevado que el caso de 120 km/h, lo cual era de esperar según se ha visto en con el análisis de la independencia del número de Reynolds 4.2.

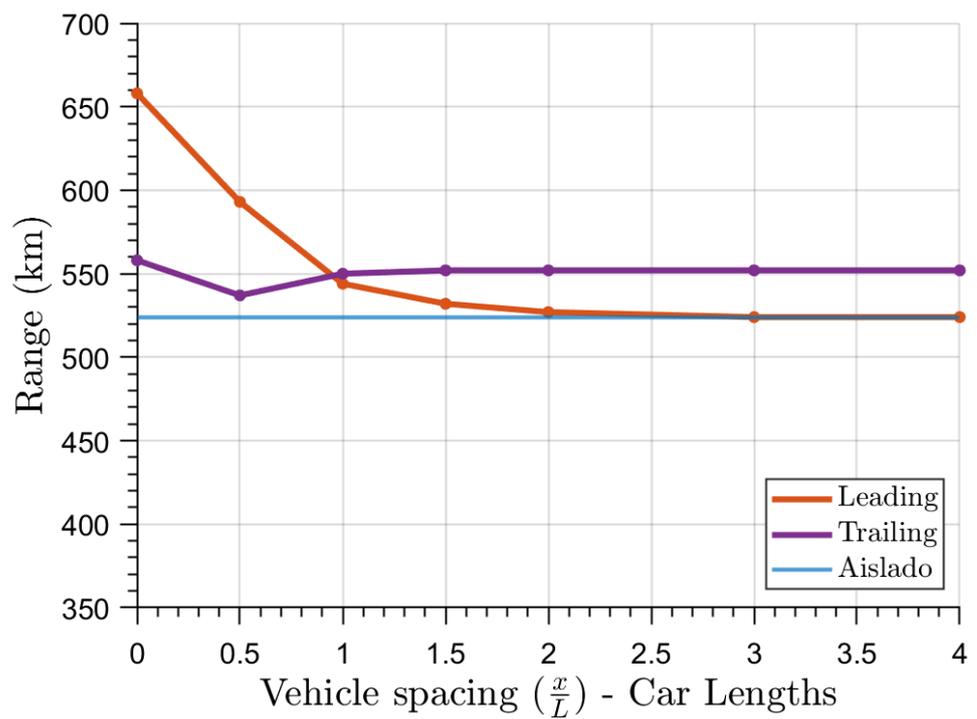
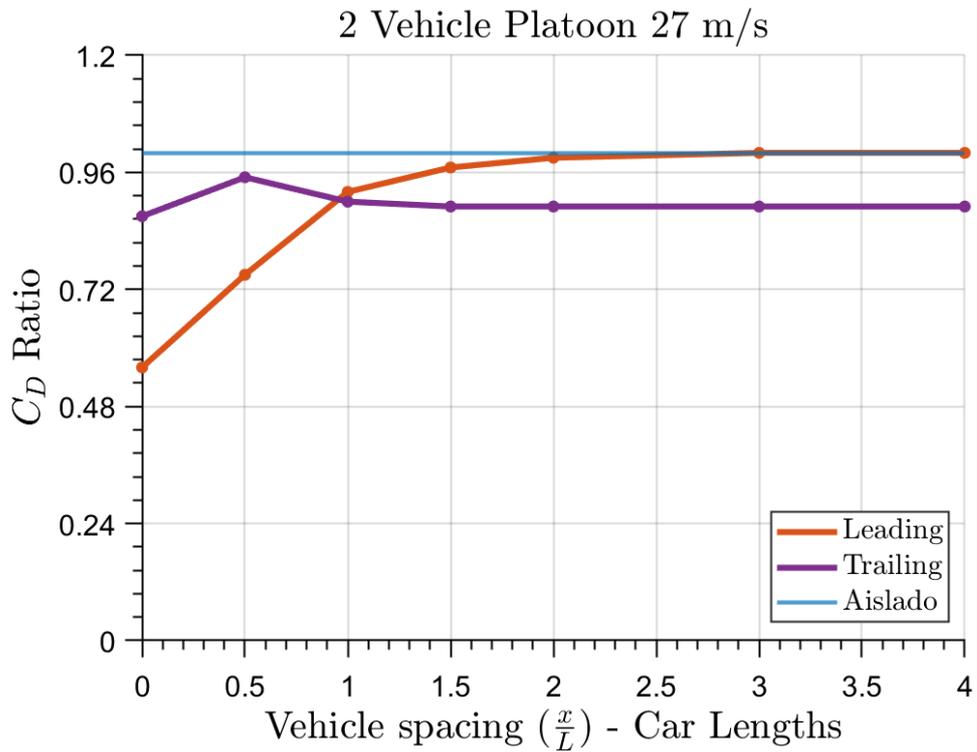
Separación ( $x/L$ )	Leading car		Trailing car	
	$C_D$	$C_D/C_{D_{Aislado}}$	$C_D$	$C_D/C_{D_{Aislado}}$
0	0.155	0.56	0.238	0.87
0.5	0.206	0.75	0.260	0.95
1	0.253	0.92	0.248	0.90
1.5	0.267	0.97	0.245	0.89
2	0.272	0.99	0.243	0.89
3	0.274	1.00	0.243	0.89
4	0.275	1.00	0.243	0.89

**Tabla 4.5:** Resultados de coeficiente de resistencia y su ratio respecto al aislado para vehículos en formación a 100 km/h. ( $x/L$ )(Longitudes de coche)

Separación ( $x/L$ )	Leading car	Trailing car
	Autonomía (km)	Autonomía (km)
0	658	558
0.5	593	537
1	544	550
1.5	532	552
2	527	552
3	524	552
4	524	552

**Tabla 4.6:** Resultados de la autonomía para vehículos en formación a 100 km/h. ( $x/L$ )(Longitudes de coche)

Si se representan los resultados de ambas tablas:



**Figura 4.8:** Drag ratio y autonomía según la separación ( $X/L$ )(Longitudes de coche) a 100 km/h.

### 4.3.2. Análisis de los resultados

En ambas simulaciones, se observa que aún estando a 4 longitudes de coche, el vehículo que se sitúa detrás recibe ya un efecto positivo en el coeficiente de drag pues este se ve reducido respecto al de referencia del vehículo aislado.

Una vez la distancia de separación se va reduciendo, se observa en ambos casos una reducción más pronunciada de dicho coeficiente. Entorno a 1 coche de separación comienza esta reducción más pronunciada, y parece indicar que dicha separación es la óptima para ambos vehículos pues ven una reducción muy similar.

Esto podría llevar a pensar que una estrategia de formación sería situarlos a 1 vehículo de separación, sin embargo, si con las nuevas tecnologías se pudiera reducir aún más, los vehículos se podrían ir intercambiando de posición para así obtener un resultado menor global para ambos vehículos o dependiendo si a un vehículo le conviene más dependiendo de la distancia que tenga que recorrer.

Por otra parte, se observa que inicialmente, el vehículo más beneficiado es el que se sitúa detrás, no obstante, una vez se pasa aproximadamente esa separación de 1 vehículo, el que va delante pasa a tener menos coeficiente de resistencia y por tanto mayor autonomía.

Este efecto ocurre pues a separaciones mayores, el primero sigue teniendo esa estela turbulenta desarrollada detrás del vehículo, sin embargo, el vehículo situado detrás, impacta contra ese aire turbulento del primer vehículo, por lo que la presión delante de este no es tan alta como si fuera aislado.

No obstante, una vez se reduce a esa distancia de 1 vehículo de distancia, el vehículo situado detrás 'entra' en la mayor zona de turbulencia del primero modificando así su estela turbulenta. Esto provoca que la resistencia por la 'succión' en la parte trasera del vehículo sea menor y por tanto reduce drásticamente el  $C_D$  como se observa en las Figuras 4.8 y 4.7. Este efecto se podrá analizar mejor en las próxima sección con las escenas de las simulaciones en las Figuras 4.9 y 4.10.

Las Tablas 4.4 y 4.6, permiten analizar el rango máximo que se podría obtener con el efecto de vehículos de formación comparándolo así con el caso aislado.

Para la velocidad de 33 m/s, se obtiene un rango máximo de 529 km para el vehículo líder comparado con los 411 km obtenidos para el caso aislado. Este aumento de 118 km permitiría un aumento de rango substancial como para considerarse como estrategia para una conducción más eficiente.

Con la separación de 1 vehículo, este aumento sería de aproximadamente 20 km; significativamente menor que el caso anterior, pero este valor ya sirve para obtener una conducción más eficiente y que los vehículos puedan desplazarse más lejos.

Para la velocidad de 27 m/s, en este caso se obtiene un rango máximo de 658 km para el vehículo líder comparado con los 524 km obtenidos para el caso aislado. Este aumento de 134 km es aún mayor que a velocidad más alta, por lo que puede llevar a pensar que esta velocidad presenta mayor interés en el caso de que se busque mayor rango. En este caso, el rango de 658km se asimila mucho al declarado por Tesla de 637 km.

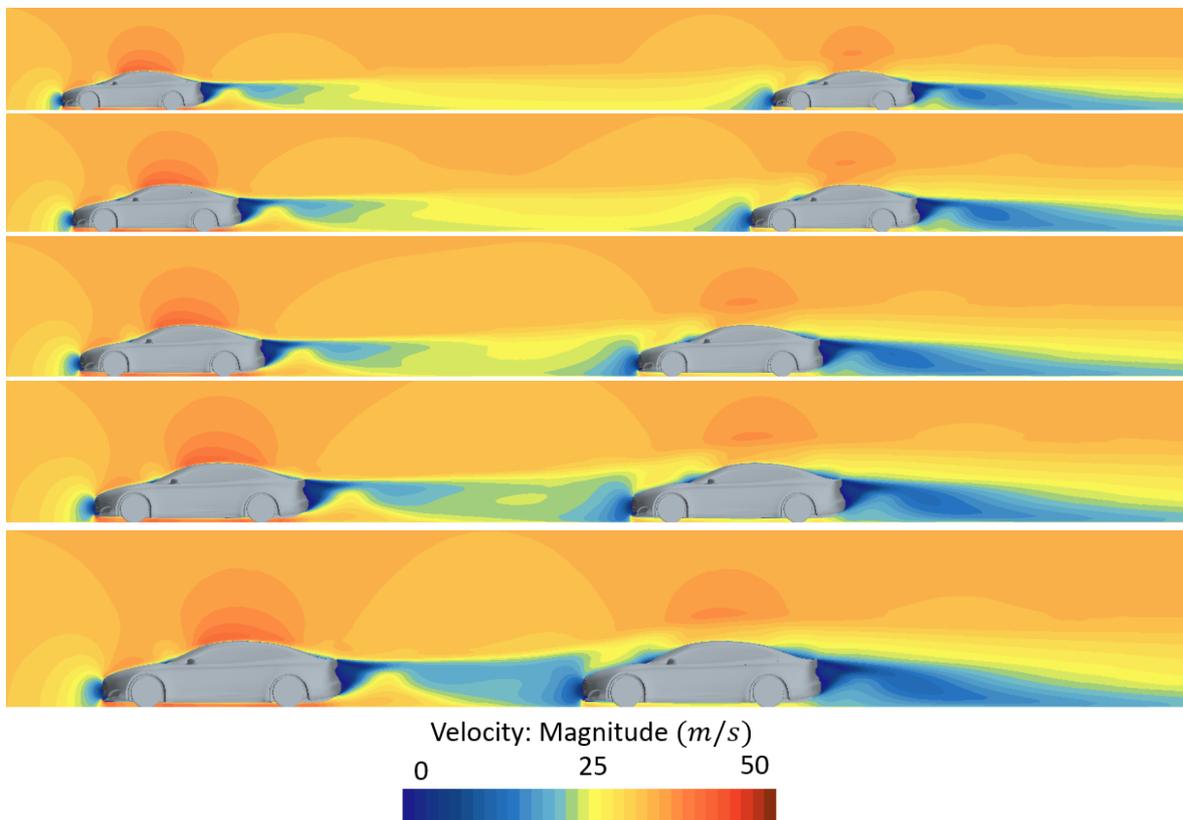
Con la separación de 1 vehículo, el aumento de autonomía con respecto al caso aislado sería también de aproximadamente unos 20 km.

Las diferencias del aumento de rango, llevan a crear un interés por reducir la distancia de separación más para obtener mejores resultados, reto para futuros estudios y futuras tecnologías de conducción autónoma.

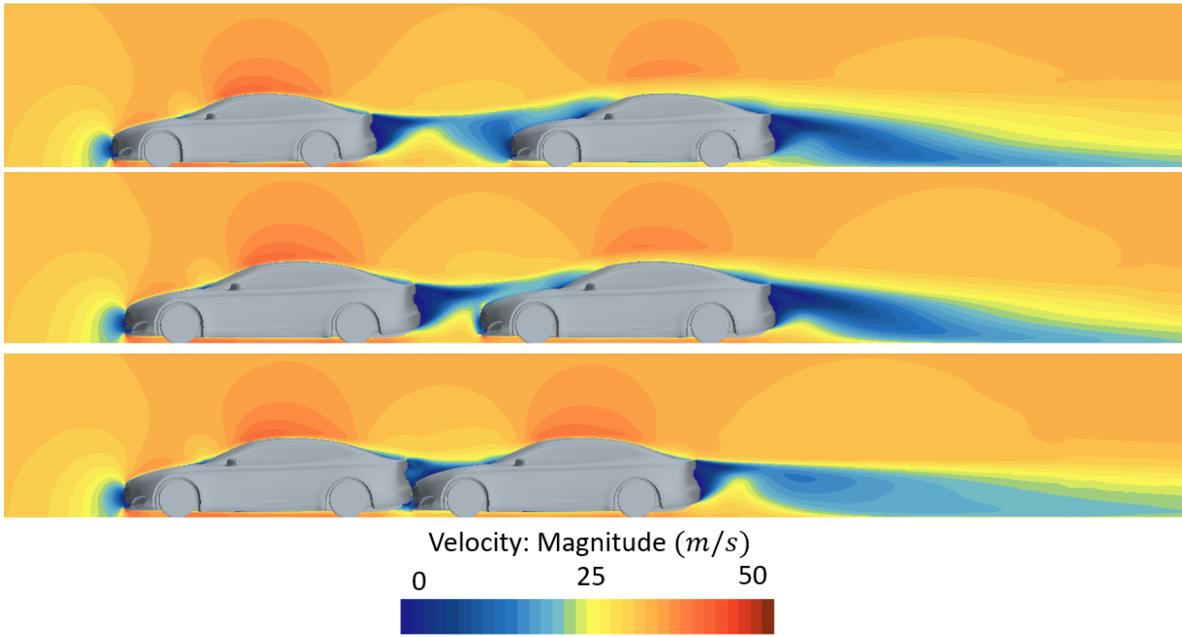
#### 4.4. Análisis del campo de velocidad para vehículos en formación

Si se realizan las escenas de la velocidad, se podrá observar esa evolución de las estelas con la separación de los vehículos.

En las Figuras 4.9 y 4.10, se puede comprobar como a partir de la separación de 1 vehículo, la estela del vehículo líder continua directamente sobre el vehículo que se sitúa tras este primero, dando comienzo a la reducción de la resistencia más progresiva para ambos vehículos.



**Figura 4.9:** Velocidad del fluido para separaciones de 4 a 1  $x/L$  (Vehículos de separación) a 33 m/s - En orden de arriba a abajo.



**Figura 4.10:** Velocidad del fluido para separaciones de 0.5 a 0  $x/L$  (Vehículos de separación) a 33 m/s - En orden de arriba a abajo.

# 5. Conclusiones

---

Finalmente, se exponen unas conclusiones generales de los estudios realizados en función de los resultados obtenidos y se detallan algunos de los posibles estudios futuros a medio/largo plazo que permitan aumentar el conocimiento en esta rama de investigación.

## 5.1. Conclusiones generales

En lo referente al estudio del caso aislado, se ha visto una relación clara y precisa entre el caso resuelto en el presente trabajo de final de grado y los casos reales de vehículos en conducción normal. Aunque no se haya obtenido el resultado más preciso por falta de potencia computacional, se ha comprobado que dicha solución solamente variaba ligeramente respecto a casos anteriores, pudiéndola utilizar por tanto en próximos estudios. A pesar de haber comprobado que el número de Reynolds no afecta en gran medida al coeficiente de resistencia, se ha visto que la influencia de la velocidad sobre el rango es exponencial, obteniendo diferencias de más de 100 km de rango entre las velocidades de 120 y 100 km/h. Esto lleva al razonamiento de que la estrategia de conducción para vehículos eléctricos va a ser distinta a la de los vehículos de combustión, pues aunque se esté realizando a una velocidad algo menor, el consumo se verá positivamente afectado.

En el estudio de la conducción de vehículos en formación, se ha podido comprobar el efecto de la distancia de separación o de seguridad sobre el coeficiente de resistencia  $C_D$  y por tanto los rangos disponibles para cada uno de los automóviles en cada uno de los casos. Para las velocidades analizadas de 120 y 100 km/h, se han visto tendencias muy similares en cuanto a la reducción, obteniendo ratios desde 0.9 hasta casi de 0.5. Esto implica no solo un aumento importante del rango del vehículo líder, si no que también del coche que se sitúe detrás de este. Estos aumentos de rango, pueden ser de hasta más 100 km, por lo que es una estrategia de conducción atractiva una vez se pueda implementar tecnologías que permitan reducir esas distancias de separación.

Se concluye por tanto, que la estrategia de conducción analizada en el presente trabajo de final de grado, es una forma de ampliar la autonomía de cualquier tipo de vehículos, pero en especial de los eléctricos, que son los pioneros en las tecnologías de conducción autónoma y que por tanto puedan permitir la implementación en carretera. No solamente será una forma de reducir los consumos, si no que también será una forma de cumplir con futuras normativas contra el cambio climático que puedan llegar a implementarse.

## 5.2. Estudios futuros

El presente trabajo ha sido una primera investigación para ver posibles efectos que se pueden tener en cuenta cuando la conducción autónoma se haya desarrollado completamente. Observando pues los resultados positivos obtenidos, surgen nuevas ideas de investigación para analizar posibles estrategias de conducción.

En el trabajo se ha analizado solamente el caso de dos vehículos en formación, pero en una carretera, se podrían realizar formaciones de decenas de vehículos, asemejándose a un pelotón de ciclismo. Esto puede llegar a aumentar drásticamente el rango pues los vehículos dentro del grupo, tendrán zonas muy pequeñas tanto de elevada presión como de estela turbulenta. Es por esto, que un estudio más detallado, con más potencia computacional y un mayor número de vehículos en formación puede aportar valiosa información para tener en cuenta.

Por otra parte, si esta estrategia se implementase definitivamente, posiblemente el diseño de los automóviles pueda cambiar o permita partes móviles para este tipo de casos. Esto cambiaría la forma para ser más aerodinámico en el conjunto como grupo, pero se estaría empeorando probablemente para el coche aislado; es por esto que un diseño que se pueda transformar quizá sea de mayor interés pues no siempre se está circulando con otros vehículos cerca.

# 6. Pliego de condiciones y Presupuesto

---

En el presente capítulo se exponen las condiciones de trabajo y el presupuesto requeridos para la realización de un trabajo de estas características. Para ello, se detallan las condiciones referentes a recursos técnicos y humanos y a continuación se realizará un desglose de los presupuestos requeridos por la mano de obra y por los recursos computacionales empleados.

## 6.1. Pliego de condiciones

### 6.1.1. Condiciones técnicas

En lo referente a las condiciones técnicas de trabajo, se tiene el hardware y el software empleado necesarios para realizar el trabajo en su totalidad. Este hardware hace referencia al equipo físico necesario para la realización del proyecto y debe soportar el volumen de cálculo requerido. Los sistemas utilizados tienen las siguientes características:

- Terminal portátil:
  - Fabricante: Lenovo
  - Modelo: Lenovo ThinkPad E580
  - Procesador: Intel Core i5-8250U CPU @ 1.6GHz
  - Memoria RAM :16Gb DDR4-2666 SODIMM
  - Almacenamiento: 237 Gb Samsung SSD PCI-e
  - Tarjeta gráfica: Integrada Intel HD 620 + Radepm RX 550
  - Fuente de Alimentación: Batería de 60 Wh
  - Sistema Operativo: Windows 10

En lo referente al software, éste está constituido por el conjunto de programas informáticos, tanto de cálculo numérico y de procesado de datos como de edición de texto, requeridos para completar el trabajo.

El programa principal es el de simulación y cálculo numérico. Se ha empleado *StarCCM+*, un software comercial de *SIEMENS* para simulaciones CFD proporcionado por el departamento. En concreto, se ha utilizado la versión *16.02.009-R8, 2021.1.1* Para el procesado de datos se ha empleado, principalmente, *MATLAB R2021b* (con licencia de estudiante proporcionada por la UPV) y, puntualmente, *Excel* (incluido en el paquete de Microsoft Office proporcionado por la UPV). Por último, el programa de edición

de texto empleado para la redacción de esta memoria ha sido *OverLeaf*, un software online de edición de texto que cuenta con el programa de compilación para generar documentos en formato PDF, ambos de LaTeX.

### 6.1.2. Condiciones del puesto de trabajo

Las condiciones a las que se ve sometido el autor durante la realización de un proyecto como este pueden afectar tanto al desarrollo de la propia actividad como a la salud. Estas deben permitir el movimiento libre del operario mediante un espacio lo suficientemente amplio. Además, al estar varias horas delante de pantallas, unos niveles apropiados de iluminación y relación de luminancia son requeridos entre la pantalla y la oficina o espacio de trabajo.

Otros factores a tener en cuenta son el ruido y el calor, los cuales pueden perturbar la atención de los trabajadores. A su vez, las emisiones de radiación y los niveles de humedad serán controlados con la finalidad de preservar la salud y seguridad del personal.

## 6.2. Presupuesto

Se propone un modelo basado en la división parcial entre el presupuesto correspondiente a la mano de obra y el que supone el equipo informático empleado en el proyecto. Posterior a ello, se imputan: los gastos generales, los beneficios para la empresa y el impuesto de valor añadido (IVA).

### 6.2.1. Coste de personal.

La mano de obra la constituyen el autor del trabajo y el tutor. El Trabajo de Fin de Grado se contabiliza con 12 créditos. De acuerdo a las 30 horas por crédito establecidas por el Plan Bolonia, los 12 créditos totales se corresponden a 360 horas. Estas, se desglosan, según a qué han sido dedicadas, tal y como sigue:

- Aprendizaje: 15 horas
- Preproceso: 200 horas
- Postproceso: 100 horas
- Redacción de memoria: 45 horas

En la Tabla 6.2.1 se desglosa el coste correspondiente a cada trabajador y se proporciona el coste total de la mano de obra. Se supone un sueldo de 5 e/h para el autor y un sueldo de 30.82 e/h para el tutor (contratado doctor) respectivamente considerando 1650 h de trabajo anual y el coste total por hora para la empresa (UPV, SRH. (2022)).

Concepto	Tiempo [h]	Coste [€/h]	Valor [€]
Autor	360	5	1800
Tutor	25	30.82	770.5
Total			2570.5

**Tabla 6.1:** Coste de mano de obra.

Se obtiene por tanto, un presupuesto de mano de obra total de **DOS MIL QUINIENTOS SETENTA EUROS CON CINCUENTA CÉNTIMOS (2570.5 €)**.

### 6.2.2. Coste de equipo informático.

En trabajos como este, las herramientas computacionales suponen un coste adicional a la de mano de obra. El equipo particular; Lenovo ThinkPad E580 costó 800 €. El coste de amortización se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$C.A. = \frac{(100\% - \text{amortizacion}) \cdot \text{Precio}_{ordenador}}{n_{\text{anos}}}$$

Se estima una amortización del 20% anual (Agencia Tributaria. (2022)) y, debido a que su uso en el proyecto ha sido de aproximadamente medio año, se imputa un coste de amortización del valor del 10% sobre el precio de compra. Así pues, los costes que éstos suponen para el proyecto son:  $CA_{Portatil} = 80$  €. La licencia de StarCCM + es lo que acarrea la mayor parte del coste informático. Así pues, las distintas licencias requeridas, así como el coste total que supone el apoyo informático, se resumen en la tabla 6.2. En lo referente a las licencias de: StarCCM +, Matlab, Wolfram Matemática y Microsoft Office; válidas para investigación, se asumen con un coste anual de: 20000 €, 800 €, 1590 €, y 69 € respectivamente. Dado que el uso anual por horas ronda las 4000 horas, el coste por hora de las licencias usadas es de: 5 €/h, 0.2 €/h, 0.4 €/h y 0.02 €/h respectivamente. Cabe destacar que las licencias del software StarCCM + son del tipo PoD. Esto significa que contienen un número determinado de horas por su compra anual. Cuando se abre una simulación (ya sea para preprocesamiento, posprocesamiento o ejecución), el sistema comienza a contar las horas hasta el momento en que se cierra la simulación. Los valores que aparecen en la tabla 6.2 se corresponden con: 700 horas de uso de StarCCM +, 10 horas de uso de Matlab, 10 horas de uso de Wolfram Mathematica y 60 horas de uso de Microsoft Office.

Concepto	Valor [\euro]
StarCCM +	3500
Matlab	2
Wolfram Mathematica	4
Microsoft Office	1.2
LaTex	0
C.A. Portátil	80
Total	3587.2

**Tabla 6.2:** Coste de equipo informático.

El coste total asociado a las herramientas informáticas es de **TRES MIS QUINIENTOS OCHENTA Y SIETE EUROS CON VEINTE CÉNTIMOS (3587.2 €)**.

### 6.2.3. Presupuesto total del proyecto

Por último se suman los costes desglosados de personal y computacional para obtener el coste total del proyecto en la Tabla 6.3.

Concepto	Valor [€]
Coste de personal	2570.5
Coste de equipo informático	3587.2
Costes indirectos (15 %)	923.7
Subtotal presupuesto sin IVA	7081.4
IVA (21 %)	1487.1
Total	8568.5

**Tabla 6.3:** Coste total del proyecto.

El coste total del proyecto asciende a **OCHO MIL QUINIENTOS SESENTA Y OCHO EUROS CON CINCUENTA CÉNTIMOS (8568.5 €)**.

# Bibliografía

---

- [1] Alcanzia. *Historia del vehículo eléctrico*. 2019. URL: <https://alcanzia.es/movilidad/historia-vehiculo-electrico/>.
- [2] Patricio Marin. *Vehículos autónomos: Tipos y características*. 2017. URL: <https://tecnovortex.com/vehiculos-autonomos-tipos-y-caracteristicas/>.
- [3] Xiaozheng (Sean) He y Xinkai Wu. «Eco-driving advisory strategies for a platoon of mixed gasoline and electric vehicles in a connected vehicle system». En: *Transportation Research Part D Transport and Environment* 63 (ago. de 2018), págs. 907-922. DOI: [10.1016/j.trd.2018.07.014](https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.07.014).
- [4] Wikipedia. *Automobile drag coefficient*. 2021. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Automobile\\_drag\\_coefficient](https://en.wikipedia.org/wiki/Automobile_drag_coefficient).
- [5] Wolf-Heinrich Hucho. «The optimization of body detail - A method for Reducing the aerodynamic drag of road vehicles». En: *SAE international No. 760185* (1976).
- [6] Wolf-Heinrich Hucho. «Aerodynamics of Road vehicles». En: *SAE international* (1998).
- [7] SimScale. *Aerodynamics Simulation of Flow Around a Vehicle*. 2022. URL: <https://www.simscale.com/docs/tutorials/aerodynamic-simulation-vehicle/>.
- [8] Edwin Gan, Mikhail Fong y Yee Luon Ng. «CFD Analysis of Slipstreaming and Side Drafting Techniques Concerning Aerodynamic Drag in NASCAR Racing». En: *CFD Letters* 12 (jul. de 2020). DOI: [10.37934/cfdl.12.7.116](https://doi.org/10.37934/cfdl.12.7.116).
- [9] R. H. Barnard. «Road vehicle aerodynamic design: An introduction.» En: *St Albans: MechAero*. (1996), pág. 265.
- [10] Ivan Evtimov, Rosen Ivanov y Milen Sapundjiev. «A model for investigation of energy characteristic of an electric car». En: *Electric vehicles '15 (in Bulgarian)* 131-137 (2015).
- [11] M. Sapundjiev R. Ivanov I. Evtimov. «CAFE: Knowledge graph completion using neighborhood-aware features». En: *Eng. Appl. Artif. Intell.* 103 (2021), pág. 104302. DOI: [10.1016/j.engappai.2021.104302](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2021.104302). URL: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2021.104302>.
- [12] J. Cimbala Y. Cengel. «Fluid mechanics: Fundamentals and Applications». En: *Mc Graw Hill* (2006).
- [13] Tesla Motors. *Tesla Motors Model S*. 2022. URL: <https://www.tesla.com/models>.
- [14] Paulo Soliman, Adriano Schommer y Mario Eduardo Santos Martins. «Formula SAE Aerodynamics: Design process with focus on drivability». En: *SAE Mobilus* (2015). DOI: [10.4271/2015-36-0359](https://doi.org/10.4271/2015-36-0359). URL: <https://doi.org/10.4271/2015-36-0359>.

- [15] Siemens. «External Aerodynamics with Simcenter STAR-CCM+». En: *Best Practice Guidelines* (2021).
- [16] Nor Elyana Ahmad, Essam Abo-Serie y Adrian Gaylard. «Mesh Optimization for Ground Vehicle Aerodynamics». En: *Research Gate* (2010).
- [17] Tesla. *The Slipperiest Car on the Road*. 2014. URL: <https://www.tesla.com/blog/slipperiest-car-road>.
- [18] Annie White. *Tesla Model S Long Range Plus Exceeds 300 Miles of Range, a First in Our Testing*. 2021. URL: <https://www.caranddriver.com/news/a36302930/tesla-model-s-long-range-plus-highway-range-testing/>.