

Trabajo Fin de Grado

Análisis computacional de la aerodinámica de un Tesla
Model S con Ansys – Fluent

Computational analysis of the aerodynamics of a Tesla
Model S with Ansys - Fluent

Autor/es

Francisco Rubio Martínez

Director/es

Pilar Brufau García
Radu Mustata Orovceanu

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2020

RESUMEN

A lo largo del tiempo, la arquitectura y el diseño de vehículos ha ido evolucionando para intentar conseguir una mayor eficiencia, buscando, entre otras cosas, que el vehículo experimente una fuerza de resistencia menor al paso del flujo de aire. Este hecho adquiere una gran importancia cuando el vehículo se mueve a velocidades altas, repercutiendo en un menor consumo de combustible, reducción de las emisiones de efecto invernadero y obteniendo un mayor agarre al suelo o estabilidad en la conducción. Para conseguirlo, se buscan diseños redondeados de sus componentes exteriores y se realizan pruebas de modelos a escala de estos diseños en túneles de viento con el objetivo de analizar sus consecuencias aerodinámicas y validarlos. La experimentación en estos casos resulta costosa. Como alternativa, igualmente válida, y buscando el mismo objetivo, investigadores e industria se inclinan hacia el uso de modelos computacionales de simulación.

Este proyecto recoge el estudio del comportamiento aerodinámico de un vehículo “Tesla Model S” mediante un programa de Mecánica de Fluidos Computacional (CFD Computational Fluid Dynamics) llamado Ansys-Fluent. En esta memoria, se describen algunos conceptos básicos de aerodinámica a modo de introducción del tema de estudio, se expone el modelo matemático de ecuaciones que describe el movimiento del aire alrededor del vehículo, para continuar con un breve resumen de los detalles más relevantes del método numérico que implementa el programa Ansys-Fluent. Se dan detalles de la representación discreta del vehículo para proceder al cálculo del flujo de aire alrededor de él bajo diferentes hipótesis. Se analizan los resultados numéricos obtenidos con el programa para finalizar con el planteamiento de posibles mejoras que se podrían hacer sobre este modelo de vehículo.

SUMMARY

During the last years, vehicles architecture and design evolved in order to achieve a higher efficiency, looking for, among other things, a lower wind drag force. This fact is of great importance when vehicles move at high speeds because the results are less fuel consumption, reduced greenhouse emissions and high stability and grip. In order to achieve this goal, the proposal is external components as rounded designs; in addition to this, reduced scale models need to be tested in wind tunnels to analyze their aerodynamic consequences and validate them. Experimentation in these cases is expensive. Instead, for this reason some researchers have adopted computational simulation models.

This project includes the study of the aerodynamic behavior of a “Tesla Model S” vehicle using a Computational Fluid Dynamics (CFD) software called Ansys. In this research, some basic aerodynamic concepts are described as an introduction to the topic, also the mathematical and numerical equations that describes the air flow around the car and a brief summary of the most relevant details of the numerical metod implemented by the Ansys-Fluent program have been written. Details of the discrete representation of the vehicle are given to calculate the air flow around it under different hypotheses. The numerical results obtained with the program are analyzed, and finally, the proposal of possible improvements that could be made on this vehicle model is stated.

ÍNDICE

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	7-8
CAPÍTULO II: ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE AERODINÁMICA EN VEHÍCULOS	
01. Conceptos básicos aerodinámicos	
01.1 Definición.....	10
01.2 Flujo de aire alrededor de un cuerpo.....	10
01.3 Números adimensionales principales.....	11-13
01.4 Fuerzas y coeficientes aerodinámicos.....	13-15
02. Conceptos básicos de Mecánica de Fluidos Computacional (CFD).....	16
CAPÍTULO III: MODELO MATEMÁTICO Y NUMÉRICO.....	17-19
CAPÍTULO IV: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20-34
01. Descripción completa.....	21-22
02. Modelo geométrico.....	23-26
03. Malla.....	26-28
04. Condiciones iniciales y de contorno.....	29-32
05. Método de resolución en Ansys - Fluent.....	33-34
CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA AERODINÁMICA DEL VEHÍCULO.....	35-45
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES.....	46-49
CAPÍTULO VII: BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	50-51
LISTADO DE ANEXOS.....	52
Anexo I: Efectos aerodinámicos en vehículos.....	53
01.1 Efecto suelo.....	53
01.2 Efecto Coandă.....	54
01.3 Efecto Magnus.....	56
Anexo II: Componentes aerodinámicos en vehículos.....	57
02.1 Alerones.....	57-58
02.2 Difusores.....	59
02.3 Splitter.....	60-61
02.4 Fondo plano.....	62
Anexo III: Resultados numéricos de las simulaciones.....	64-77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01: Flujo Laminar y Turbulento.....	11
https://www.aerodinamicaf1.com/2019/10/flujo-laminar-y-turbulento/	
Figura 02: Fuerza de sustentación.....	13
http://www.apuca.com.ar/Curso_Página_4.htm	
Figura 03: Resistencia aerodinámica. Apuntes de Mecánica de Fluidos Eina – Unizar.....	14
Figura 04: Evolución Cd en vehículos. Apuntes de Mecánica de Fluidos Eina – Unizar.....	15
Figura 05: Render Tesla Model S.....	21
https://www.tesla.com/es_es/models	
Figura 06: Alerón trasero Tesla Model S.....	22
https://www.tesla.com/es_es/models	
Figura 07: Modelo geométrico Tesla Model S.....	23
Figura 08: Detalle de los ejes implementados en cada una de las ruedas (color cian).....	24
Figura 09: Dimensiones (en mm) del modelo geométrico "Tesla Model S".....	25
Figura 10: Obtención del área frontal, Tesla Model S. Programa Solid Edge.....	25
Figura 11: Vista lateral de la malla con el vehículo.....	27
Figura 12: Vista isométrica del mallado del "cubo".....	27
Figura 13: Vista frontal del mallado alrededor del Tesla Model S.....	27
Figura 14: Vector gravedad, Ansys Fluent.....	29
Figura 15: Características modelo de viscosidad k-epsilon. Ansys Fluent.....	30
Figura 16: Propiedades de la velocidad del flujo de aire. Ansys Fluent.....	31
Figura 17: Valores de referencia. Ansys Fluent.....	32
Figura 18: Método de resolución. Ansys Fluent.....	34
Figura 19: Vista isométrica presión total. Velocidad 260 km/h. Ansys-Fluent.....	38
Figura 20: Vista lateral presión total. Velocidad 260 km/h. Ansys-Fluent.....	38
Figura 21: Vista cenital presión total. Velocidad 260 km/h. Ansys-Fluent.....	38
Figura 22: Vista lateral líneas de corriente. E.c presión total. Velocidad: 260 km/h. Ansys - Fluent.....	39
Figura 23: Vista lateral líneas de corriente. E.c velocidad eje (y). Velocidad: 260 km/h. Ansys - Fluent	40
Figura 24: Vista lateral líneas de corriente. E.c turbulencias. Velocidad 260 km/h. Ansys - Fluent	40
Figura 25: Evolución coeficiente de sustentación. Velocidad 120 km/h. Ansys - Fluent.....	41
Figura 26: Evolución coeficiente de arrastre. Velocidad 120 km/h. Ansys – Fluent.....	41
Figura 27: Evolución coeficiente de sustentación en función del número de Reynolds.....	42
Figura 28: Evolución coeficiente de arrastre en función del número de Reynolds.....	43
Figura 29: Vista lateral líneas de corriente. Flujo de incidencia lateral. Velocidad 30 km/h. Ansys-Fluent.....	45
Figura 30: Vista cenital líneas de corriente. Flujo de incidencia lateral. Velocidad 200 km/h. Ansys-Fluent.....	45
Figura 31: Tesla Model S diseñado para la competición.....	49
Figura 32: Efecto suelo en un monoplaza.....	54
http://planetadelmotor.com/efecto-suelo-f1-que-es/	
Figura 33: Experimento 1 y 2. Efecto Coanda.....	54
https://www.xn--experimentosparanios-l7b.org/apagar-las-velas-detras-de-los-objetos-solidos/	
Figura 34: Efecto Coanda en un monoplaza.....	55
https://www.abelcaro.com/f1/aerodinamica/	
Figura 35: Efecto Magnus.....	56
http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/fluidos/dinamica/magnus/magnus.htm	
Figura 36: Boceto propio. Alerón 1.....	58
Figura 37: Boceto propio. Alerón 2.....	58
Figura 38: Boceto propio. Vehículo con difusor.....	59
Figura 39: Difusor.....	59
https://alldesign.es/store/exterior/difusor-trasero-bmw	
Figura 40: Splitter.....	60
https://albrodpulf1.wordpress.com/2015/03/08/analisis-tecnico-splitter/	

Figura 41: Splitter.	61
https://configurator.mercedes-benz-accessories.com/Splitter-Delantero	61
Figura 42: Fondo plano Honda RC F1.	62
https://www.formula1atmosphere.com/fondo-plano/	62
Figura 43: Fondo Plano F1 HRT.	63
https://www.mercadoracing.org/9/614377/fondo-plano-f1-hrt.html	63
Figura 44: Evolución de la convergencia de las ecuaciones en las simulaciones. Velocidad 30 km/h.....	64
Figura 45: Evolución coeficiente de arrastre. Velocidad 30 km/h. Ansys-Fluent.....	64
Figura 46: Evolución coeficiente de sustentación. Velocidad 30 km/h. Ansys-Fluent.....	65
Figura 47: Vista isométrica presión total. Velocidad 30 km/h. Ansys-Fluent.....	65
Figura 48: Vista frontal presión total. Velocidad 30 km/h. Ansys-Fluent.....	65
Figura 49: Vista cenital presión total. Velocidad 30 km/h. Ansys-Fluent.....	66
Figura 50: Vista inferior presión total. Velocidad 30 km/h. Ansys-Fluent.....	66
Figura 51: Vista lateral presión total. Velocidad 30 km/h. Ansys-Fluent.....	66
Figura 52: Vista lateral líneas de corriente. E.c presión total. Velocidad 30 km/h. Ansys-Fluent.....	67
Figura 53: Vista posterior líneas de corriente. E.c presión total. Velocidad 30 km/h. Ansys-Fluent.....	67
Figura 54: Evolución de la convergencia de las ecuaciones en las simulaciones. Velocidad 50 km/h.....	68
Figura 55: Evolución coeficiente de sustentación. Velocidad 50 km/h. Ansys-Fluent.....	68
Figura 56: Evolución coeficiente de arrastre. Velocidad 50 km/h. Ansys-Fluent.....	68
Figura 57: Vista frontal presión total. Velocidad 50 km/h. Ansys-Fluent.....	69
Figura 58: Vista lateral presión total. Velocidad 50 km/h. Ansys-Fluent.....	69
Figura 59: Vista cenital presión total. Velocidad 50 km/h. Ansys-Fluent.....	69
Figura 60: Vista inferior presión total. Velocidad 50 km/h. Ansys-Fluent.....	70
Figura 61: Vista lateral líneas de corriente. E.c turbulencias. Velocidad 50 km/h. Ansys-Fluent.....	70
Figura 62: Vista isométrica líneas de corriente. E.c presión total. Velocidad 50 km/h. Ansys - Fluent.....	70
Figura 63: Vista cenital presión total. Velocidad 120 km/h. Ansys-Fluent.....	71
Figura 64: Vista lateral presión total. Velocidad 120 km/h. Ansys-Fluent.....	71
Figura 65: Evolución de la convergencia de las ecuaciones en las simulaciones. Velocidad 120 km/h.....	71
Figura 66: Vista cenital líneas de corriente. E.c presión total. Velocidad 120 km/h. Ansys-Fluent.....	72
Figura 67: Vista lateral líneas de corriente. E.c presión total. Velocidad 120 km/h. Ansys-Fluent.....	72
Figura 68: Vista frontal presión total. Velocidad 120 km/h. Ansys-Fluent.....	72
Figura 69: Evolución coeficiente de arrastre. Velocidad 200 km/h. Ansys-Fluent.....	73
Figura 70: Evolución de la convergencia de las ecuaciones en las simulaciones. Velocidad 200 km/h.....	73
Figura 71: Evolución coeficiente de sustentación. Velocidad 200 km/h. Ansys-Fluent.....	73
Figura 72: Vista lateral presión total. Velocidad 200 km/h. Ansys-Fluent.....	74
Figura 73: Vista inferior presión total. Velocidad 200 km/h. Ansys-Fluent.....	74
Figura 74: Vista cenital presión total. Velocidad 200 km/h. Ansys-Fluent.....	74
Figura 75: Vista isométrica líneas de corriente. E.c presión total. Velocidad 200 km/h. Ansys-Fluent.....	75
Figura 76: Vista frontal presión total. Velocidad 200 km/h. Ansys-Fluent.....	75
Figura 77: Vista cenital líneas de corriente. E.c presión total. Velocidad 200 km/h. Ansys-Fluent	75
Figura 78: Evolución de la convergencia de las ecuaciones en las simulaciones. Velocidad 260 km/h.....	76
Figura 79: Evolución coeficiente de sustentación. Velocidad 260 km/h. Ansys-Fluent.....	76
Figura 80: Evolución coeficiente de arrastre. Velocidad 260 km/h. Ansys-Fluent.....	76
Figura 81: Vista frontal presión total. Velocidad 260 km/h. Ansys-Fluent.....	77
Figura 82: Vista isométrica líneas de corriente. E.c presión total. Velocidad 260 km/h. Ansys-Fluent.....	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Número de celdas, caras, nodos y particiones de la malla.....	28
Tabla 2: Mínimo y máximo volumen de la malla.....	28
Tabla 3: Mínimo y máxima área de la malla.....	28
Tabla 4: Resultados numéricos obtenidos en Ansys – Fluent.....	36
Tabla 5: Comparación resultados (Cd) de la simulación con otros vehículos.....	37
Tabla 6: Comparación resultados (Cl) de la simulación con otros vehículos.....	37
Tabla 7: Comparación resultados (Cd) entre flujo frontal y flujo frontal-lateral (30º de incidencia).....	44

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

En el diseño de cualquier vehículo la aerodinámica juega un papel cada vez más importante. A la hora de comprar un coche parece que la estética es lo que manda; aunque es la aerodinámica el factor fundamental que otorga al vehículo un aspecto más o menos atractivo; pero la aerodinámica no sirve sólo para mejorar la estética del mismo, sino que le añade importantes características técnicas y de seguridad. Un vehículo, al moverse, interacciona con el aire; y esto provoca la aparición de dos tipos de flujo que condicionan los efectos aerodinámicos: el flujo externo debido al paso del aire por la superficie exterior del automóvil y el flujo interno debido al aire que pasa, por ejemplo, por el motor o por el habitáculo del coche.

El flujo externo origina tres tipos de fuerzas sobre el automóvil: fuerza de resistencia al avance, en sentido longitudinal, que dificulta el movimiento del vehículo en el seno del fluido; fuerza vertical, que puede actuar como fuerza de sustentación en coches convencionales, en cuyo caso es una fuerza vertical y hacia arriba, o bien puede ser *downforce*⁽¹⁾ o hacia abajo, en coches deportivos, empujando al vehículo contra el suelo; y fuerza lateral, debida por ejemplo al viento lateral. El flujo externo tiene un importante impacto asimismo en la estabilidad del vehículo, principalmente a alta velocidad [Olivares de Jodar, 2011]. El diseño aerodinámico también debe conseguir un flujo externo adecuado para evitar la excesiva acumulación de la suciedad existente en el aire sobre las superficies del vehículo, lo que afecta considerablemente a la visibilidad. Fenómenos como el desprendimiento de la capa límite pueden producirse a frecuencias audibles y ser por tanto una fuente de ruido, que se debe tratar de evitar con un diseño apropiado de las superficies del vehículo. Por otro lado, el flujo interno también contribuye a los esfuerzos aerodinámicos que aparecen sobre el vehículo. Un vehículo necesita tener un flujo interno para refrigerar el motor y para renovar el aire del interior del habitáculo.

Históricamente, la aerodinámica de los automóviles se ha ido desarrollando con el objetivo de reducir la resistencia aerodinámica al avance del vehículo. En automóviles de competición, sólo desde finales de los sesenta, principios de los setenta, se aprecia un interés creciente por la componente vertical de la fuerza aerodinámica, para buscar por primera vez *downforce* en los vehículos (este hecho llevaría a los diseños de efecto suelo, por ejemplo). Esta tendencia, años más tarde, ha pasado poco a poco al resto de automóviles, lo que se hace palpable en distintos elementos cotidianos en los vehículos de hoy en día como por ejemplo el *spoiler*⁽²⁾ trasero, con el que se puede controlar el flujo de aire disminuyendo su velocidad y aumentando la presión en la zona trasera del vehículo.

(1) *DOWNFORCE*: Fuerza aerodinámica de dirección vertical y sentido descendente creada por las características aerodinámicas de un vehículo. Su propósito consiste en mejorar el agarre y la velocidad en el paso por curva del automóvil experimentando una fuerza que le fije contra el asfalto.

(2) *SPOILER*: Componente aerodinámico que se encarga de generar carga aerodinámica en el vehículo con la finalidad de mejorar la adherencia en curva. Se conocen de esta manera algunos alerones o faldones delanteros o traseros.

Por otro lado, las dos crisis del petróleo en la década de los setenta forzaron a los fabricantes a fijarse todavía más en la aerodinámica y tratar de optimizar sus vehículos para reducir la resistencia aerodinámica al avance y por tanto el consumo de combustible. Hay que señalar también que los requisitos aerodinámicos dependen en gran medida del tipo de vehículo que estemos considerando. Y actualmente, la preocupación se inclina hacia la reducción de gases por efecto invernadero, lo cual constituye un factor más a tener en cuenta en el diseño de los coches.

En turismos la consideración principal es la reducción de la resistencia al avance, por motivos de consumo y emisiones, pero en furgonetas y vehículos similares, los ingenieros se concentran más en el comportamiento ante el viento lateral, mientras que en vehículos de competición conseguir sustentación negativa es la máxima prioridad. Por tanto, ninguna de las tres componentes de la fuerza aerodinámica total que actúa sobre un vehículo es secundaria. Antes de comenzar el estudio detallado de los distintos elementos que entran en juego en el diseño aerodinámico de un automóvil, no hay que dejar de mencionar la relación que existe entre la automoción y el campo de la aeronáutica. Si bien es cierto que hay una cierta transferencia de conocimiento entre ambos campos, hay que tener en cuenta que el problema aerodinámico es distinto en el caso de un coche y de un avión, por multitud de factores, como son la distancia al suelo, velocidad, proximidad de otros objetos en el campo fluido, etc. La aerodinámica es un factor clave en el diseño de los aviones y pierde algo de relevancia en el caso de los automóviles frente a otros elementos, como son las exigencias estéticas, el diseño de habitáculos amplios y confortables, etc. También el enfoque técnico hasta hace algunos años ha sido diferente, puesto que en la aeronáutica el papel del cálculo por ordenador en el diseño aerodinámico de los aviones ha sido más importante que en el automóvil, campo en el que habitualmente se recurre en gran medida a los ensayos experimentales, ganando aceptación durante los últimos años la simulación computacional. En el diseño de vehículos no se cuenta con modelos teóricos precisos que predigan las fuerzas aerodinámicas, por lo que la mayoría de los resultados y conclusiones se obtienen mediante pruebas con el propio modelo de automóvil, ya sea de forma experimental o computacional.

Por tanto, este proyecto se centrará en el estudio computacional aerodinámico de un vehículo, en concreto, un “Tesla Model S” analizando las principales leyes y fuerzas que rigen la aerodinámica, así como sus coeficientes adimensionales característicos, consiguiendo reforzar los conocimientos adquiridos en la rama de mecánica de fluidos.

CAPÍTULO II: ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE AERODINÁMICA EN VEHÍCULOS

01. Conceptos básicos aerodinámicos

01.1 Definición

La aerodinámica es la parte de la Mecánica de Fluidos que estudia el movimiento de los gases. Asimismo, es la ciencia que estudia los fenómenos que acompañan el movimiento producido entre un cuerpo y el aire que lo rodea, [Cithe, Aerodinámica en aeronaves].

La presencia de un objeto en un fluido gaseoso modifica la repartición de presiones y velocidades de las partículas del fluido, originando fuerzas de sustentación y resistencia. La modificación de uno de los valores (presión o velocidad) cambia automáticamente en forma opuesta el otro, [www.ecured.com/aerodinámica].

La aerodinámica responde a varios fenómenos físicos que se explicarán a continuación, así como algunos números adimensionales característicos que son capaces de definir las propiedades del fluido.

01.2 Flujo de aire alrededor de un cuerpo

Para poder analizar en profundidad la aerodinámica de cualquier cuerpo tenemos que ser capaces de saber diferenciar entre los diferentes tipos de flujo de aire que existen, [Cithe, Aerodinámica en aeronaves]:

Flujo estacionario: Se da este tipo de flujo cuando las variables que lo caracterizan (velocidad, presión y densidad) son constantes en el tiempo, es decir, no cambian con el tiempo.

Flujo no estacionario: Se trata de un tipo de flujo en el que las variables que caracterizan el flujo no son constantes en el tiempo y por tanto varían con él.

Flujo laminar: Es un flujo ordenado, en el que el fluido se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse, cada partícula fluida sigue su curso sin interponerse en el camino de otra.

Flujo turbulento: Se trata de un flujo caótico, es decir, las partículas se mueven desordenadamente y el movimiento vendrá dominado por la aparición de remolinos.

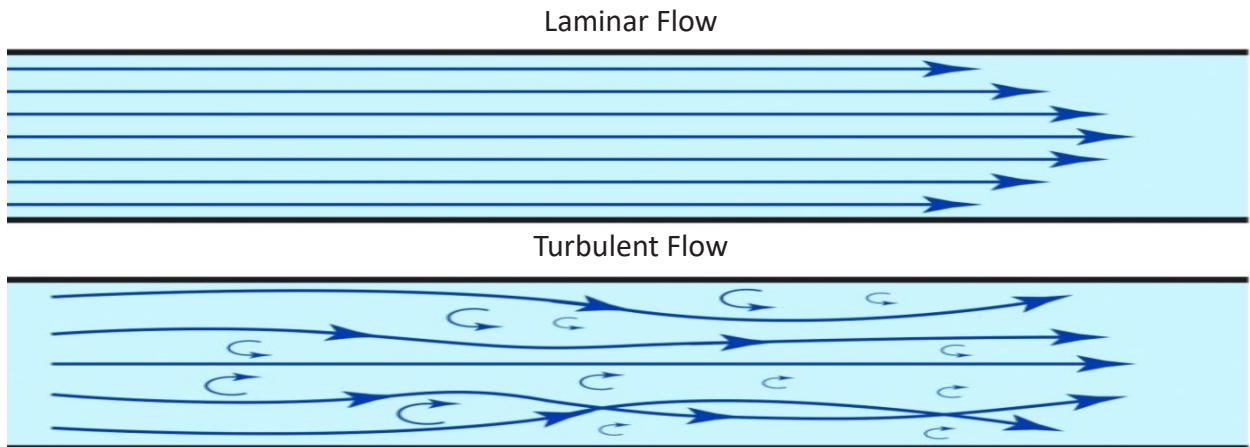


Figura 01. Flujo Laminar y Turbulento. <https://www.aerodinamicaf1.com/2019/10/flujo-laminar-y-turbulento/>.

01.3 Números adimensionales principales

Los números adimensionales son parámetros que no tienen dimensiones y adquieren gran importancia al analizar el comportamiento de los fluidos. A la hora de simular el funcionamiento de cualquier elemento aerodinámico, tanto de forma experimental en un túnel del viento como de forma computacional mediante un código CFD, es necesario recrear un flujo de aire con las propiedades lo más parecidas posibles a la situación real. A menudo, en los túneles de viento, se ensaya la pieza correspondiente con unas dimensiones menores para ahorrar costes. Este tipo de acciones sería imposible sin los números adimensionales que relacionan las variables del flujo con sus correspondientes dimensiones. Los números más utilizados en el mundo de la aerodinámica son el número de Reynolds y el número de Mach.

Número de Reynolds:

El número de Reynolds permite clasificar el comportamiento del flujo en distintos tipos, laminar, turbulento, o en transición entre uno y otro. Además, nos indica la relación entre las fuerzas iniciales o convectivas y las fuerzas viscosas. Se define como:

$$Re = \frac{\text{Fuerzas Iniciales}}{\text{Fuerzas Viscoas}} = \frac{\rho \cdot L \cdot v}{\mu} = \frac{v \cdot L}{\nu} \quad EC(1)$$

Donde:

ρ = Densidad del fluido

v = Velocidad del fluido

$\nu = \mu/\rho$ = Viscosidad cinemática del fluido

μ = Viscosidad dinámica del fluido

L = Dimensión característica del objeto

En el campo de la aerodinámica la transición entre flujo laminar y turbulento ocurre para valores del número de Reynolds entre $5 \cdot 10^5$ y 10^7 , y se produce antes o después dependiendo de la rugosidad de la superficie a la que se enfrenta el flujo de aire, la turbulencia y la distribución de presiones, [Apuntes Mecánica de Fluidos, Eina].

Número de Mach:

El número de Mach (Ma) surge en honor al primer hombre que realizó los primeros experimentos importantes sobre el vuelo supersónico, Ernest Mach. Este número adimensional es una medida de velocidad relativa que se define como el cociente entre la velocidad de un objeto y la velocidad del sonido. Además, nos indica la relación entre las fuerzas iniciales o convectivas y las fuerzas elásticas. Se define como:

$$Ma = \frac{v}{c} \quad EC (2)$$

Donde:

v = velocidad del objeto

c = 340,3 m/s = velocidad del sonido en la atmósfera

La importancia de este número reside en la compresibilidad de los gases, ya que cuando $Ma < 0,3$ se considera que el fluido es incompresible.

El número de Mach es relevante cuando se analiza el movimiento de cuerpos a alta velocidad en el seno de un fluido y en el estudio de fluidos dentro de toberas, difusores o túneles de viento.

01.4 Fuerzas aerodinámicas

El origen de las fuerzas de sustentación y resistencia al flujo de aire se producen de forma natural, como un fenómeno físico, al paso de una corriente de aire alrededor de un cuerpo.

Así pues, podemos afirmar que un objeto que se desplaza en el aire o una corriente de aire que pasa sobre un objeto, produce fuerzas de este tipo.

Para facilitar la explicación de las fuerzas aerodinámicas nos centraremos en un perfil alar.

Fuerza de sustentación:

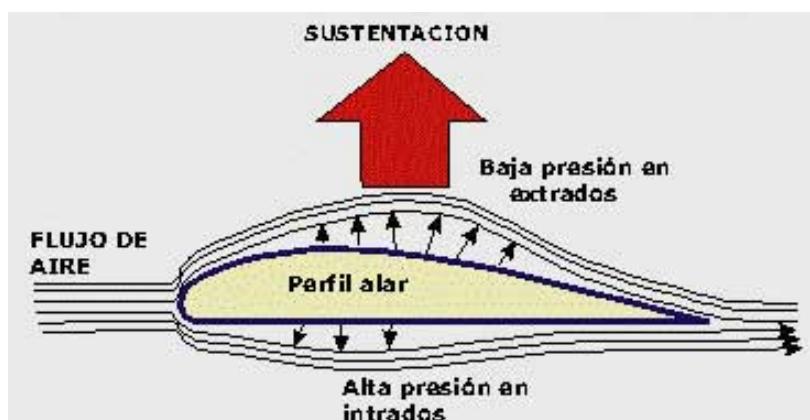


Figura 02: Fuerza de sustentación. http://www.apuca.com.ar/Curso_Página_4.htm

Cuando un perfil alar se mueve en un flujo de aire, las partículas fluidas que circulan por la parte superior y las que circulan por la parte inferior lo hacen a una velocidad tal que en el final de la misma vuelven a encontrarse [Newey, 2019].

Si hablamos de un perfil con curvatura nula, es decir, un perfil simétrico, y con ángulo de ataque igual a cero, se deduce que la distribución de presiones será también simétrica, es decir, no se genera fuerza de succión.

Cuando este perfil no es simétrico provoca que las velocidades de desplazamiento de las partículas fluidas varíen, siguiendo el principio de Bernoulli, disminuyendo la presión en las zonas de más velocidad y aumentando la presión en las zonas de velocidad más baja. Por tanto, en la zona inferior se genera una alta presión que provoca una fuerza que tiende a elevar el ala, denominada fuerza de sustentación.

Pero no sólo juega un papel importante la asimetría del perfil alar, sino que el ángulo de ataque de dicho perfil respecto al aire es también de gran influencia. Si se aumenta el ángulo de ataque, la distribución de presiones cambia, así, la depresión en la cara exterior curva (Figura 2) aumenta y puede llegar a ser positiva en la cara inferior plana, esto da lugar a que la sustentación aumente conforme aumente el ángulo de ataque.

Si esta idea la extrapolamos a un vehículo, lo que se busca es totalmente lo contrario, es decir, que se consiga una fuerza que empuje el coche hacia el suelo y para conseguir esto sería tan fácil como girar el perfil alar y por tanto, la fuerza de sustentación pasa a ser “downforce” que es como se denomina a este fenómeno opuesto.

Coeficiente de sustentación o lift:

El coeficiente de sustentación es un parámetro adimensional que relaciona la fuerza de sustentación comentada anteriormente con la densidad del fluido, el área de contacto entre objeto y fluido y la velocidad. Este coeficiente, es fruto de las fuerzas de presión y viene dado de la siguiente forma:

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

Siendo:

F_L = Fuerza de sustentación

C_L = Coeficiente de sustentación

ρ = Densidad del fluido

S_s = Superficie que produce sustentación

v = Velocidad del vehículo

Fuerza de resistencia o drag:

Denominamos resistencia aerodinámica a la fuerza que se opone al movimiento o avance del vehículo [Newey, 2019]. El aire es un fluido real que tiene viscosidad y por tanto opone cierta resistencia al movimiento de cualquier sólido en su seno. La fuerza de resistencia aerodinámica es siempre de sentido opuesto a la velocidad relativa del coche.

La fórmula de la fuerza de resistencia al flujo de aire está determinada por la velocidad al cuadrado, esto significa que la resistencia aerodinámica es cuadrática. Por tanto, si la velocidad es baja la resistencia aerodinámica es mínima y a altas velocidades el *drag*⁽³⁾ es mucho mayor.

La fuerza de resistencia o también llamada fuerza de arrastre está compuesta por efectos de presión y de rozamiento. Este planteamiento constituye la base de las pruebas en modelos de vehículos (automóviles y embarcaciones).

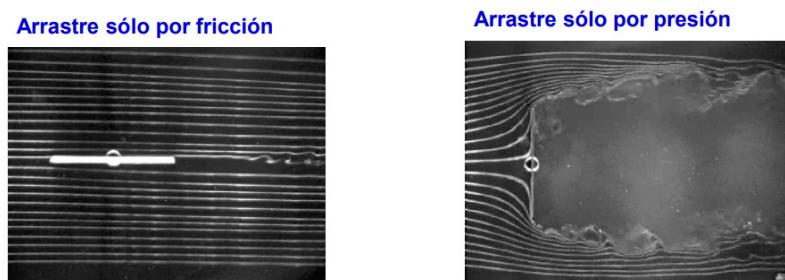


Figura 03: Resistencia aerodinámica. Apuntes de Mecánica de Fluidos Eina – Unizar.

(3) DRAG: Fuerza de resistencia aerodinámica que se opone al avance de cualquier cuerpo a través de un flujo de aire. Esta fuerza es siempre en sentido opuesto al de la velocidad relativa del cuerpo respecto del medio.

Coeficiente de resistencia o drag:

El coeficiente de resistencia es un parámetro adimensional que depende de distintas variables, que son, la fuerza de resistencia aerodinámica (comentada anteriormente), la densidad del fluido (aire), la superficie frontal y velocidad relativa del vehículo:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot S_F \cdot v^2 \quad EC(4)$$

Siendo:

F_D = Fuerza de resistencia aerodinámica

C_D = Coeficiente de arrastre o resistencia aerodinámica

ρ = Densidad del fluido

S_F = Superficie frontal del vehículo

v = Velocidad relativa del vehículo

A continuación, en la figura 4 se observa perfectamente la evolución del coeficiente de resistencia aerodinámica a lo largo de los años en vehículos.

Como se puede ver, dicho coeficiente ha tenido una tendencia clara a disminuirse y esto es porque la aerodinámica ha ido cobrando importancia y se ha intentado reducir al máximo el área frontal de los coches entre otros aspectos.

Para poder obtener una visión más completa de la evolución aerodinámica de los vehículos a lo largo del tiempo, así como los efectos aerodinámicos que se producen y componentes aerodinámicos que se han ido incorporando, se detallan en el anexo I y anexo II respectivamente.

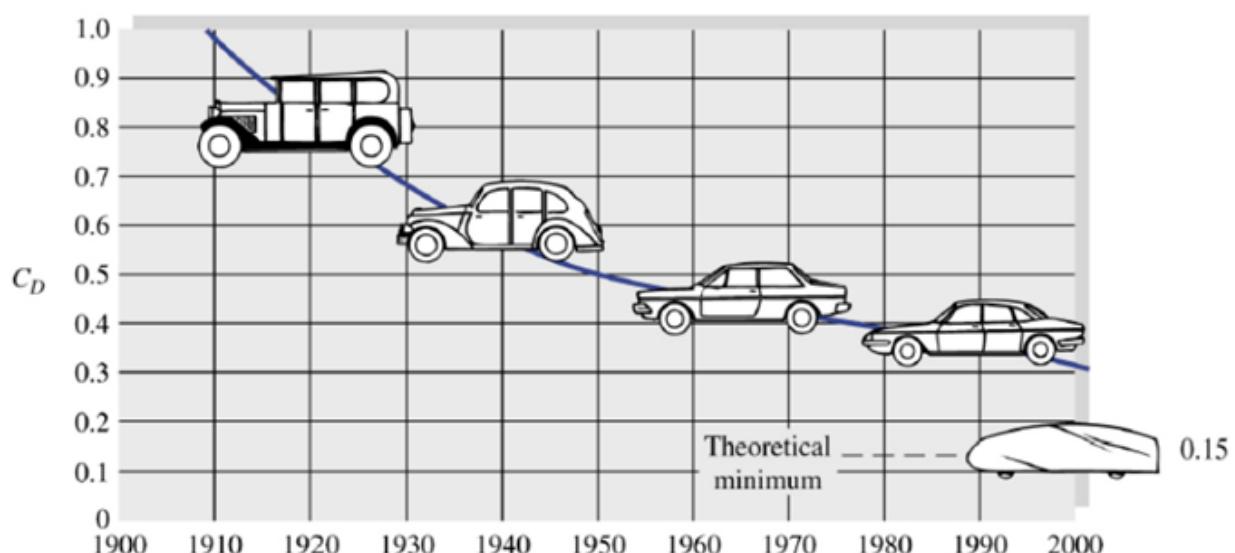


Figura 04: Evolución Cd en vehículos. Apuntes de Mecánica de Fluidos Eina – Unizar.

02. Conceptos básicos de Mecánica de Fluidos Computacional (CFD)

Con el paso del tiempo, las técnicas de investigación en el campo de la aerodinámica han sufrido variaciones: desde los primeros tiempos (S. XVIII) donde la observación de las corrientes de aire y la observación del vuelo de las aves eran los métodos usados, hasta la aparición de los túneles de viento en 1871 y el uso de técnicas experimentales; para seguir con importantes avances matemáticos y por último en 1966 con la publicación del primer método computacional para la resolución de superficies sustentadoras para comenzar a dar los primeros pasos de las técnicas de modelización computacional o también llamados coloquialmente códigos CFD.

La palabra CFD viene del inglés: Computational Fluid Dynamics y consiste en un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido. Estas ecuaciones gobiernan la atmósfera terrestre, las corrientes oceánicas y el flujo alrededor de vehículos o proyectiles y, en general, cualquier fenómeno en el que se involucren fluidos newtonianos. Normalmente, no se dispone de una solución general para este conjunto de ecuaciones, y salvo ciertos tipos de flujo y situaciones muy concretas no es posible hallar una solución analítica; por lo que en muchas ocasiones es preciso recurrir al análisis numérico para determinar una solución aproximada. A la rama de la mecánica de fluidos que se ocupa de la obtención de estas soluciones mediante métodos numéricos se conoce como CFD.

En concreto, si nos vamos al apartado de la aerodinámica, en el pasado, se disponía únicamente de túneles de viento y había que fabricar cada prototipo que quisiésemos simular. En cambio, con la introducción de los programas CFD dentro del mercado, todas las empresas son capaces de ahorrarse muchos costes ya que no tienen que llevar al departamento de fabricación cada prototipo diseñado. No obstante, hay que tener en cuenta que para conseguir una licencia completa de este tipo de software necesitamos disponer de una buena cantidad de dinero ya que no son baratos y eso es gracias a la importancia que han ido adquiriendo con el paso del tiempo desde el primer método computacional comentado anteriormente.

Dentro de los códigos CFD nos encontramos los usados para el cálculo de flujo transónico, llamados full-potential, los que resuelven las ecuaciones de Euler (sin viscosidad), llamados de Euler; y por último, los más completos que resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes incluyendo la viscosidad y la turbulencia.

Existen varios programas de CFD en el mercado dentro del software que resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes como por ejemplo Ansys que es el más conocido y va a ser usado en este trabajo fin de grado, aun así, hay otros grandes softwares de CFD como son, OpenFOAM o STAR-CCM+.

CAPÍTULO III: MODELO MATEMÁTICO Y NUMÉRICO

Modelo matemático y numérico

Para la realización de este trabajo fin de grado y con el fin de llevar a cabo las simulaciones del modelo “Tesla Model S” se ha optado por utilizar uno de los softwares de CFD más utilizados en el mercado como es Ansys-Fluent.

Como hemos comentado anteriormente, existen varios modelos matemáticos y procedimientos de resolución dentro de los programas CFD. Para el caso del software Ansys, su modelo matemático es lo más completo que podemos encontrar ya que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes incluyendo la viscosidad y la turbulencia a la simulación. Estas ecuaciones se obtienen aplicando los principios de conservación de la mecánica y la termodinámica a un volumen fluido. Haciendo esto se obtiene la llamada formulación integral de las ecuaciones. Para llegar a su formulación diferencial se manipulan aplicando ciertas consideraciones, principalmente aquella en la que los esfuerzos tangenciales guardan una relación lineal con el gradiente de velocidad (ley de viscosidad de Newton), obteniendo de esta manera la formulación diferencial que generalmente es más útil para la resolución de los problemas que se plantean en la mecánica de fluidos.

Por tanto, las ecuaciones de Navier-Stokes se encargan de describir un flujo incompresible [CFD Simulation of the Air Flow around a Car Model, Senan Thabet, 2018]. A continuación, analizaremos las ecuaciones correspondientes:

a) Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad EC(5)$$

Teniendo en cuenta que para un fluido incompresible:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad ; \quad \nabla \cdot (\rho v) = 0$$

La expresión queda:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad EC(6)$$

b) Ecuaciones de cantidad de movimiento:

i) Componente X:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) = \frac{-\partial p}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{xy})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{xz})}{\partial z} + \rho \cdot f_x \quad EC(7)$$

ii) Componente Y:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v V) = \frac{-\partial p}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{yz})}{\partial z} + \rho \cdot f_y \quad EC(8)$$

iii) Componente Z:

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w V) = \frac{-\partial p}{\partial z} + \frac{\partial(\tau_{zx})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{zy})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zz})}{\partial z} + \rho \cdot f_z \quad EC(9)$$

Donde:

ρ = Densidad del fluido.

\vec{v} = Vector y componentes de la velocidad = (u, v, w) .

P = Presión incidente.

t = Tiempo.

$$\vec{\tau} = \text{Tensor de esfuerzos} = \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{pmatrix}$$

f_x, f_y, f_z = Fuerzas volumétricas.

Método de volúmenes finitos:

Para poder resolver el sistema de ecuaciones anterior se necesita discretizar el dominio de cálculo de forma espacial. Al discretizar, lo que se realiza es dividir los elementos continuos en celdas discretas en las que almacenamos los valores de las variables; a partir de los cuales calcularemos los flujos convectivos y difusivos, así como las fuentes. El método de volúmenes finitos, (usado en infinidad de programas de CFD, como Ansys-Fluent) como método general para la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes, comienza con una división del dominio en elementos triangulares o quad en 2-D o tetraédricos, hexas, prismas y otras en 3-D, generando una malla de cálculo compuesta por celdas. Dependiendo del tipo de elemento, de la capacidad de computación disponible y de la precisión que se quiera en la resolución del flujo, se tendrá que definir una malla más o menos fina de elementos. El número total de nodos multiplicados por el número de variables del problema, es el número de grados de libertad del problema, [ESII, Fluidodinámica computacional].

En torno a cada punto de la malla se construye un volumen de control que no interseca con los de los puntos vecinos. De esta forma el volumen total de fluido resulta ser igual a la suma de los volúmenes de control considerados. La ecuación diferencial a resolver se integra sobre cada volumen de control, lo cual da como resultado una versión discretizada de dicha ecuación. Para realizar la integración se requiere especificar perfiles de variación de la variable dependiente entre los puntos de la malla, para poder evaluar las integrales resultantes. La principal propiedad del sistema de ecuaciones discretizadas resultante es que la solución obtenida satisface de forma exacta las ecuaciones de conservación consideradas, independientemente del tamaño de la malla, [Método Volúmenes Finitos, Y. Niño, 2002].

CAPÍTULO IV: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

01. Descripción completa

El modelo de vehículo Tesla S es un sedán liftback de 5 plazas [https://www.tesla.com/es_es/models]. Se diseñó desde cero como un vehículo eléctrico, con una arquitectura de alta resistencia y una batería montada en el suelo, lo que ofrece una buena protección contra impactos. Establece una nueva referencia en el sector en rendimiento y seguridad. El tren motriz completamente eléctrico de Tesla ofrece un rendimiento sin igual en todas las condiciones meteorológicas, con motor dual y tracción a las cuatro ruedas, suspensión neumática adaptativa y aceleración excepcional. Se ha diseñado para ofrecer velocidad y resistencia, con una aerodinámica eficiente, un rendimiento excelente y una estética inigualable. Entró en el mercado estadounidense en el año 2012. En el 2019 tenía una autonomía EPA de 595 km (la especificación P100DL) acelerando de 0 a 100 km/h en 2,5 segundos con una velocidad punta máxima de 261 km/h. Hasta diciembre de 2018 las ventas acumuladas globales del Tesla Model S alcanzaron las 263500 unidades.



Figura 05: Render Tesla Model S. https://www.tesla.com/es_es/models.

La gama de vehículos de Tesla se ha consagrado en los últimos años dentro del mercado de la automoción gracias a que todos sus modelos son totalmente eléctricos y su apuesta por las mayores novedades tecnológicas que se han ido implementando en los últimos tiempos, como por ejemplo, las ayudas a la conducción. El Tesla Model S dispone de un servicio "Autopilot"⁽⁴⁾ con actualizaciones periódicas y que permite mantener la velocidad, la distancia con el vehículo precedente, seguir dentro de los límites que marca el carril o tomar la salida de una autopista indicada en la ruta.

(4) AUTOPILOT: Sistema de conducción autónoma diseñado por el fabricante Tesla el cual ofrece un nivel tres de conducción autónoma (siendo 5 el máximo). Está equipado con radares, sensores y cámaras que le permiten reaccionar automáticamente para cambiar de carril, realizar una frenada o entrar o salir de vías públicas.

En cuanto al apartado de la aerodinámica de este modelo, el Tesla Model S es uno de los vehículos más aerodinámicos de su clase.

Esto es gracias a su perfección en los acabados de cada una de las piezas de las que se compone y a un diseño donde se ha buscado conseguir la mayor eficiencia aerodinámica posible. Prueba de ello es su reducida área frontal, las líneas de diseño o incluso sus alerones de fibra de carbono:



Figura 06: Alerón trasero Tesla Model S. https://www.tesla.com/es_es/models.

Los equipos de diseño e ingeniería de Tesla han sido conscientes de la importancia de garantizar que el aire fluya de manera suave por la parte de arriba y debajo del Tesla Model S para así poder reducir el mayor número posible de turbulencias. La suspensión neumática inteligente reduce la altura del automóvil en la carretera (donde se alcanzan altas velocidades y la resistencia aerodinámica es mayor) con el fin de reducir el área frontal del vehículo.

El splitter delantero se encarga de dirigir el aire sin interrupciones por debajo del vehículo (donde se encuentran las baterías) hasta más allá del difusor trasero. El resultado es un sedán con aerodinámica de superdeportivo [<https://www.tesla.com/sites/default/files/tesla-model-s>].

02. Modelo geométrico

El modelo geométrico usado para este proyecto fin de grado es un archivo CAD del Tesla Model S. Como este proyecto se centra en el análisis computacional de la aerodinámica del vehículo, se ha partido de un CAD ya diseñado encontrado en <https://fetchcf.com/view-project/1532->.

Con el fin de comprobar el modelo geométrico y añadirle algunas modificaciones se ha usado el programa “Solid Edge” de la compañía Siemens. El archivo CAD conseguido de la página web anteriormente comentada no tenía las cuatro ruedas del vehículo acopladas al chasis del Tesla. Para ello, se ha procedido a unirlas al chasis mediante barras a modo de ejes. Este detalle cobra importancia a la hora de hacer las simulaciones con el programa Ansys-Fluent ya que el modelo es más manejable como un único cuerpo (la carrocería y las ruedas unidas) en vez de cinco distintos (la carrocería y las cuatro ruedas de forma individual como cinco cuerpos diferentes).

Se puede observar la geometría simplificada con más detalle en las imágenes siguientes, así como los ejes introducidos (en color cian) en cada una de las ruedas:

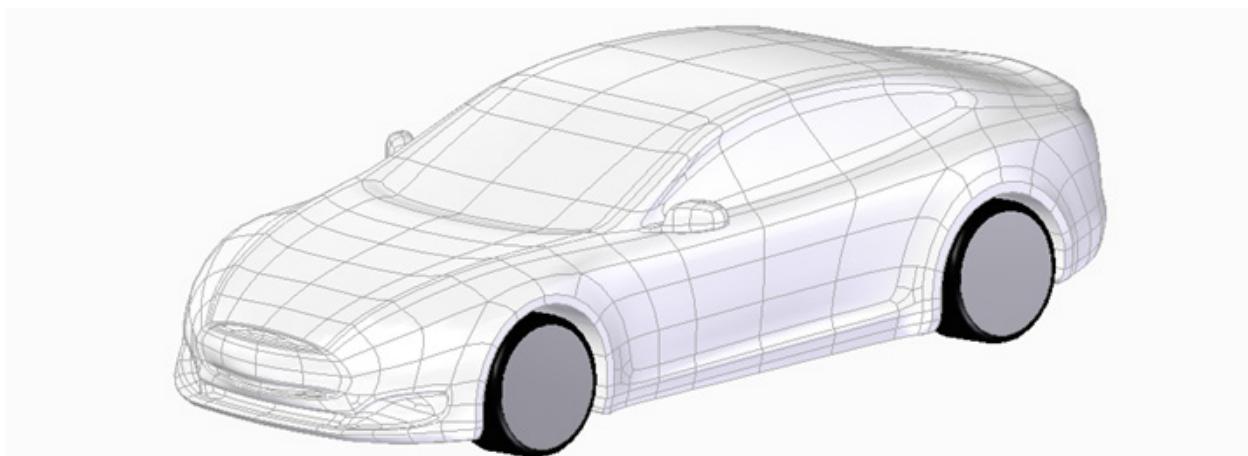


Figura 07: Modelo geométrico Tesla Model S.

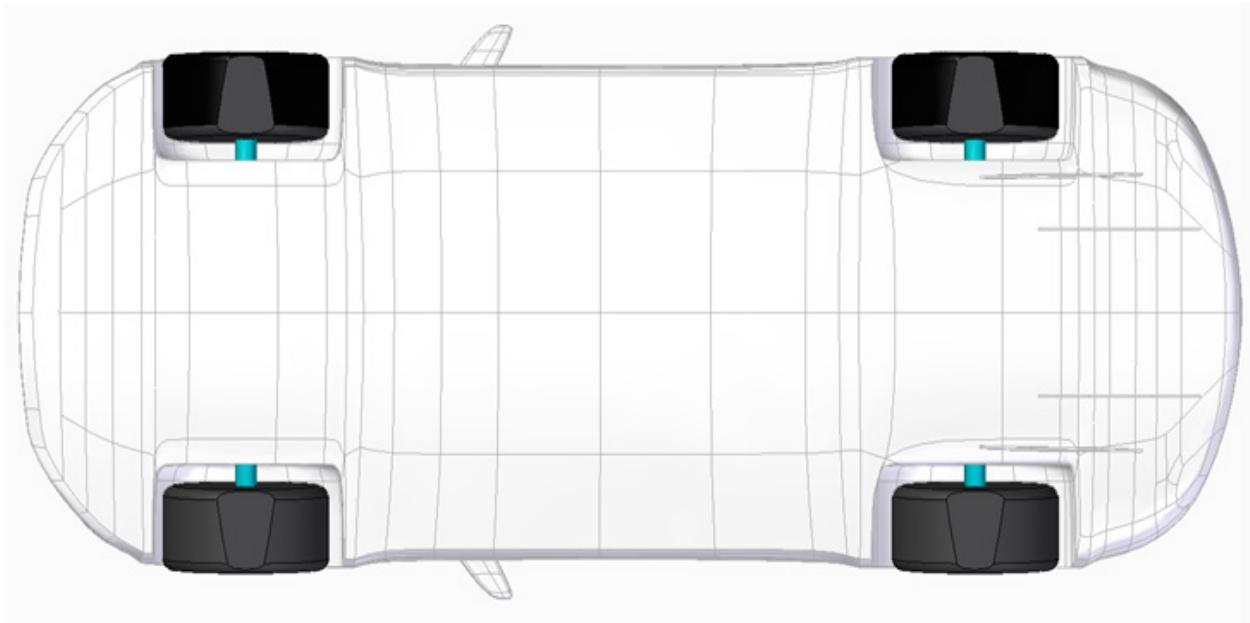


Figura 08: Detalle de los ejes implementados en cada una de las ruedas (color cian).

En cuanto a las dimensiones del modelo geométrico son 4.967 mm L x 1945 mm A x 1393 mm A. Si las comparamos con el vehículo real de Tesla son 4.979 mm L x 1.964 mm A x 1.445 mm A, así que se puede decir que es un modelo a escala 1:1 prácticamente. Estas dimensiones son fundamentales para el cálculo del número de Reynolds según el coeficiente (arrastre o sustentación) que necesitemos. Para el número de Reynolds referido al coeficiente de arrastre se usará la altura y para el caso del coeficiente de sustentación será la longitud total del vehículo:

$$L (Cd) = 1394 \text{ mm} \text{ (Longitud característica para el coeficiente de arrastre)}$$

$$L (Cl) = 4967 \text{ mm} \text{ (Longitud característica para el coeficiente de sustentación)}$$

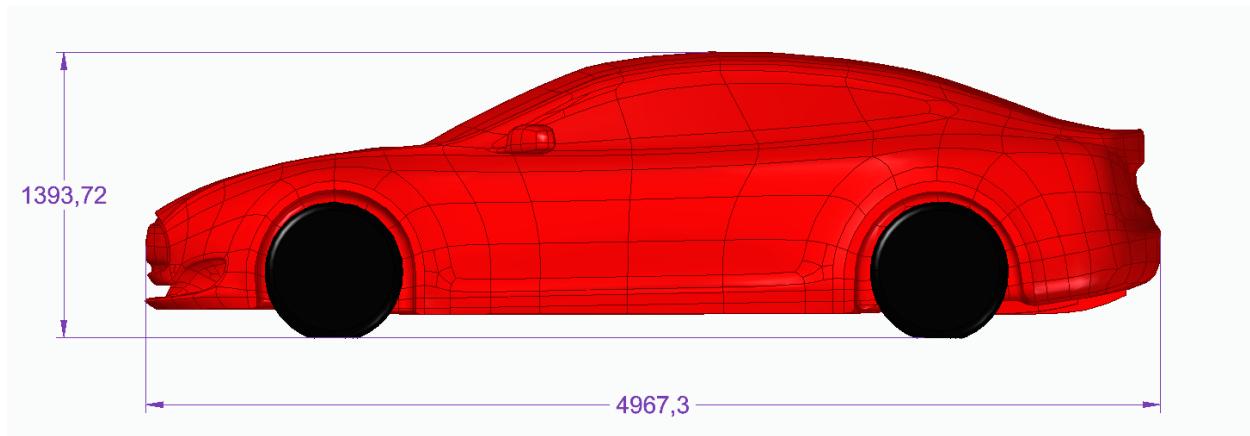


Figura 09: Dimensiones (en mm) del modelo geométrico “Tesla Model S”.

En la figura anterior podemos apreciar también ciertos detalles aerodinámicos del modelo, en la parte posterior con el difusor o en la parte delantera con un splitter.

Por último, comentaremos cómo hemos obtenido el área frontal del vehículo con el fin de poder tenerlo en cuenta al hacer las simulaciones en Ansys Fluent.

De nuevo, con el programa Solid Edge de la compañía Siemens, se ha creado un plano paralelo a la parte frontal del vehículo y se ha realizado un boceto en este, con el fin de proyectar el área frontal del vehículo. Una vez obtenido este boceto, se ha extruido y con la herramienta de “Medir sobre superficies” se ha calculado el área frontal del vehículo. La siguiente figura refleja perfectamente lo comentado hasta ahora:

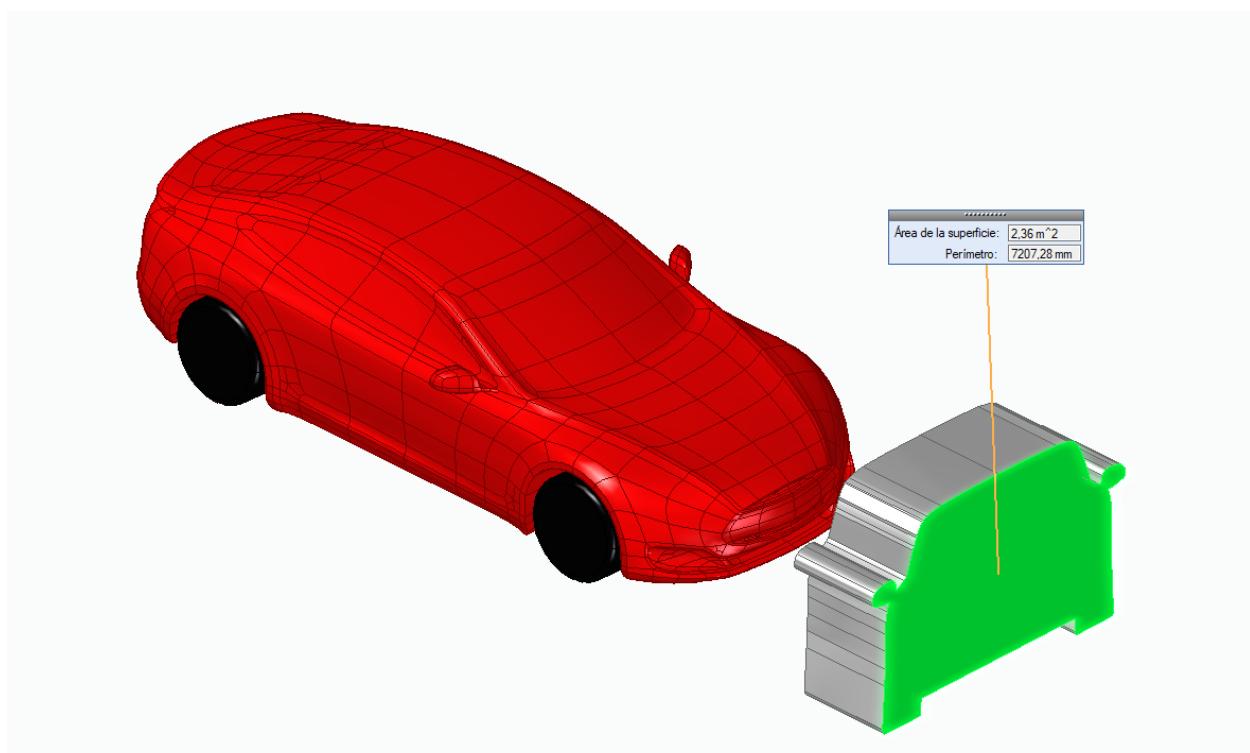


Figura 10: Obtención del área frontal, Tesla Model S. Programa Solid Edge.

03. Malla

Después de obtener la geometría, el siguiente paso es realizar el mallado. El mallado es una parte muy importante del análisis de volúmenes finitos. Consiste en dividir la geometría a estudiar en volúmenes pequeños (celdas) sobre las cuales se van a integrar las ecuaciones que describen el flujo.

La primera cuestión a tener en cuenta es que para analizar el flujo exterior que incide sobre el vehículo habrá que diseñar un “cubo” que delimita por sus seis caras la influencia que tiene el viento sobre el coche y alrededores. Estos serán los límites exteriores del dominio computacional y donde se impondrán las condiciones de contorno que definan las simulaciones llevadas a cabo posteriormente. Después de diseñarlo tendremos que realizar una resta booleana para que el estudio se centre en el espacio que queda entre el coche y todas las caras del cubo que es realmente lo que interesa para poder ver la influencia del flujo exterior sobre el Tesla Model S.

En el siguiente paso, se procede a especificar el tipo de malla que se desee. En el apartado de “Sizing” de Mesh (Workbench) se incluye el tamaño de los elementos, tasa de crecimiento, tamaño máximo y mínimo de curvatura, tamaño mínimo de proximidad...[<https://cfd.ninja/ansys-meshing>]. Para el caso en que se trabaje con prismas, lo más común es usar celdas de tipo “hex” o “hexaedron” o “triangular” siempre que la base sea de tipo cuadrada o rectangular.

El mallado es un procedimiento más complejo de lo que parece. Hay que tener en cuenta varios parámetros que afectan a la calidad de la malla. En definitiva, la malla influye en la precisión, la convergencia y la velocidad de la simulación. Además, dado que la malla generalmente consume una parte significativa del tiempo que lleva obtener resultados de simulación, cuanto mejor y más automatizadas sean las herramientas de generación y control de la calidad de esta, más rápida y precisa será la solución, [<https://www.ansys.com/products/platform/ansys-meshing>].

Otra de las partes importantes que hay que tener en cuenta en este apartado es nombrar cada una de las caras del “cubo” con la opción que se encuentra dentro de Mesh de “Named Selection” para en un apartado posterior, imponer las condiciones de contorno correspondientes.

A continuación, se presentarán tres figuras donde se muestra la malla usada para este trabajo:

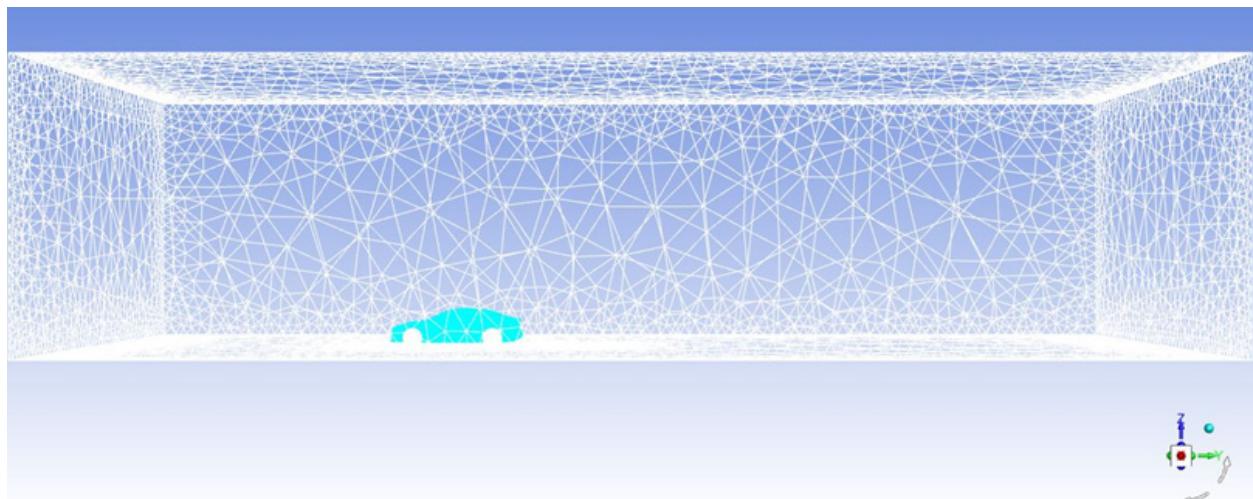


Figura 11: Vista lateral de la malla con el vehículo.

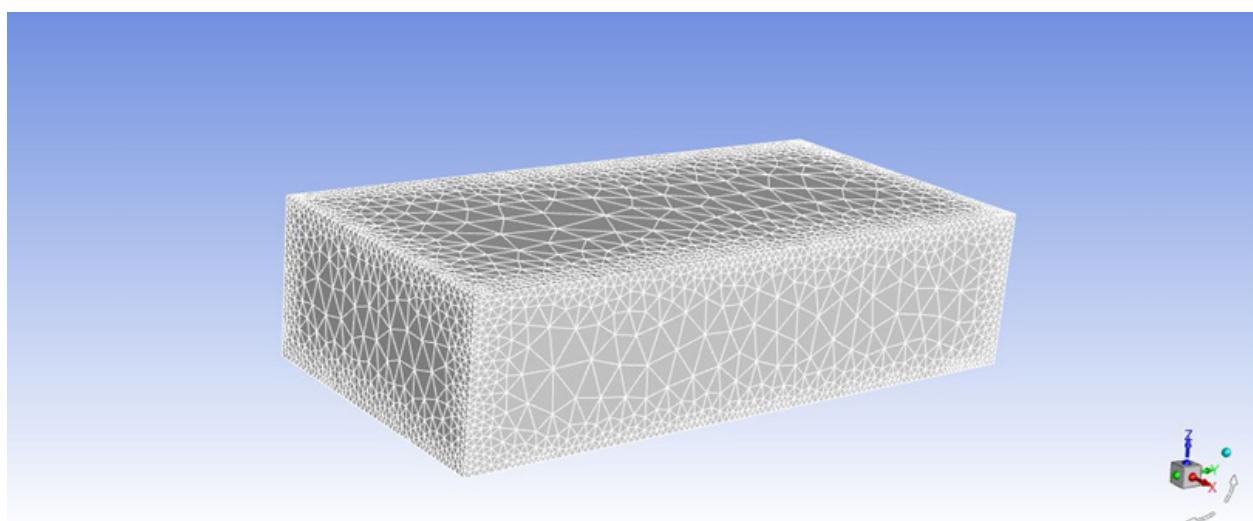


Figura 12: Vista isométrica del mallado del “cubo”.

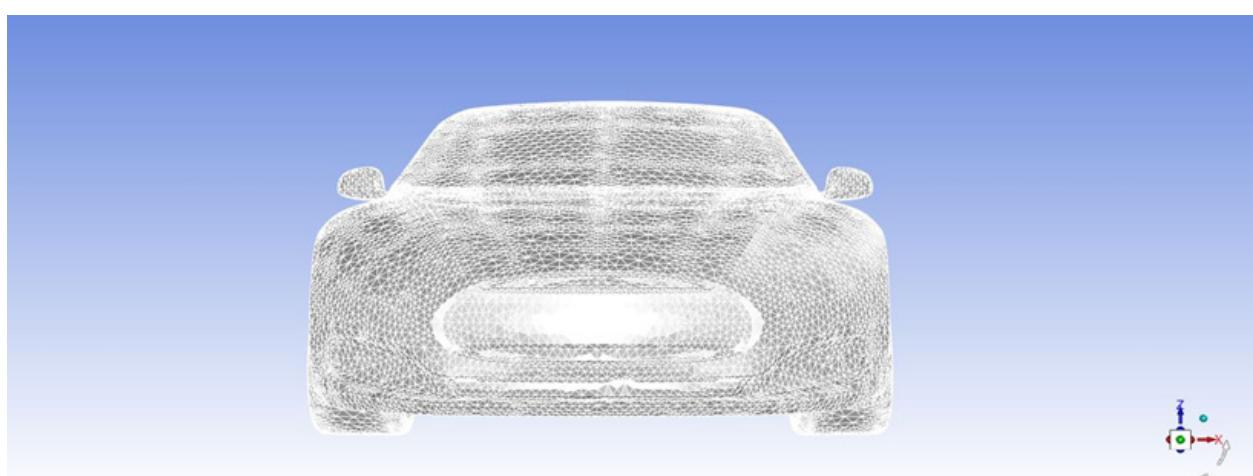


Figura 13: Vista frontal del mallado alrededor del Tesla Model S.

Por último, presentaremos algunos datos relacionados con la malla de cálculo como por ejemplo el área de celda mínima y máxima, así como el volumen o el número de nodos y celdas:

Celdas	Caras	Nodos	Particiones
1009336	2260503	321138	1

Tabla 1: Número de celdas, caras, nodos y particiones de la malla.

Unidades: m^3	Mín. Volumen	Max. Volumen	Volumen Total
Estadísticas Volumen	2.91e-10	6.56e+00	7.99e+03

Tabla 2: Mínimo y máximo volumen de la malla.

Unidades: m^2	Mín. Área	Max. Área
Estadísticas Área	3.65e-07	8.44e+00

Tabla 3: Mínimo y máxima área de la malla.

04. Condiciones iniciales y de contorno

Para determinar las condiciones iniciales y de contorno del modelo a estudiar se han analizado las distintas opciones existentes dentro del programa Ansys-Fluent. Los parámetros importantes a tener en cuenta dentro del “setup” del software son:

- a) Condiciones generales
- b) Tipo de modelo a simular
- c) Materiales
- d) Condiciones de contorno
- e) Valores de referencia

A continuación, se detallará cada uno de ellos y se explicará en cada uno de los casos los valores que se han usado para llevar a cabo las simulaciones.

- a) Condiciones generales:

Con el fin de realizar las simulaciones lo más parecidas posibles a la realidad, se va a incluir la aceleración de la gravedad, de modo que, teniendo en cuenta que el eje vertical es el “Z” tendremos que poner el vector de la siguiente forma:

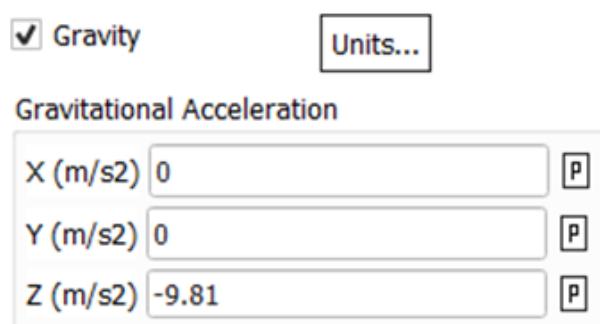


Figura 14: Vector gravedad, Ansys Fluent.

- b) Tipo de modelo a simular:

Para poder simular el flujo exterior con turbulencias, se elegirá un modelo viscoso (k-epsilon) de tipo estándar y “standard wall functions”.

El modelo K-epsilon es uno de los modelos de turbulencia más comunes de CFD. Incluye dos ecuaciones de transporte adicionales para representar las propiedades turbulentas del flujo. La primera variable transportada es la energía cinética turbulenta, k. La segunda variable transportada en este caso es la disipación turbulenta (ϵ , epsilon).

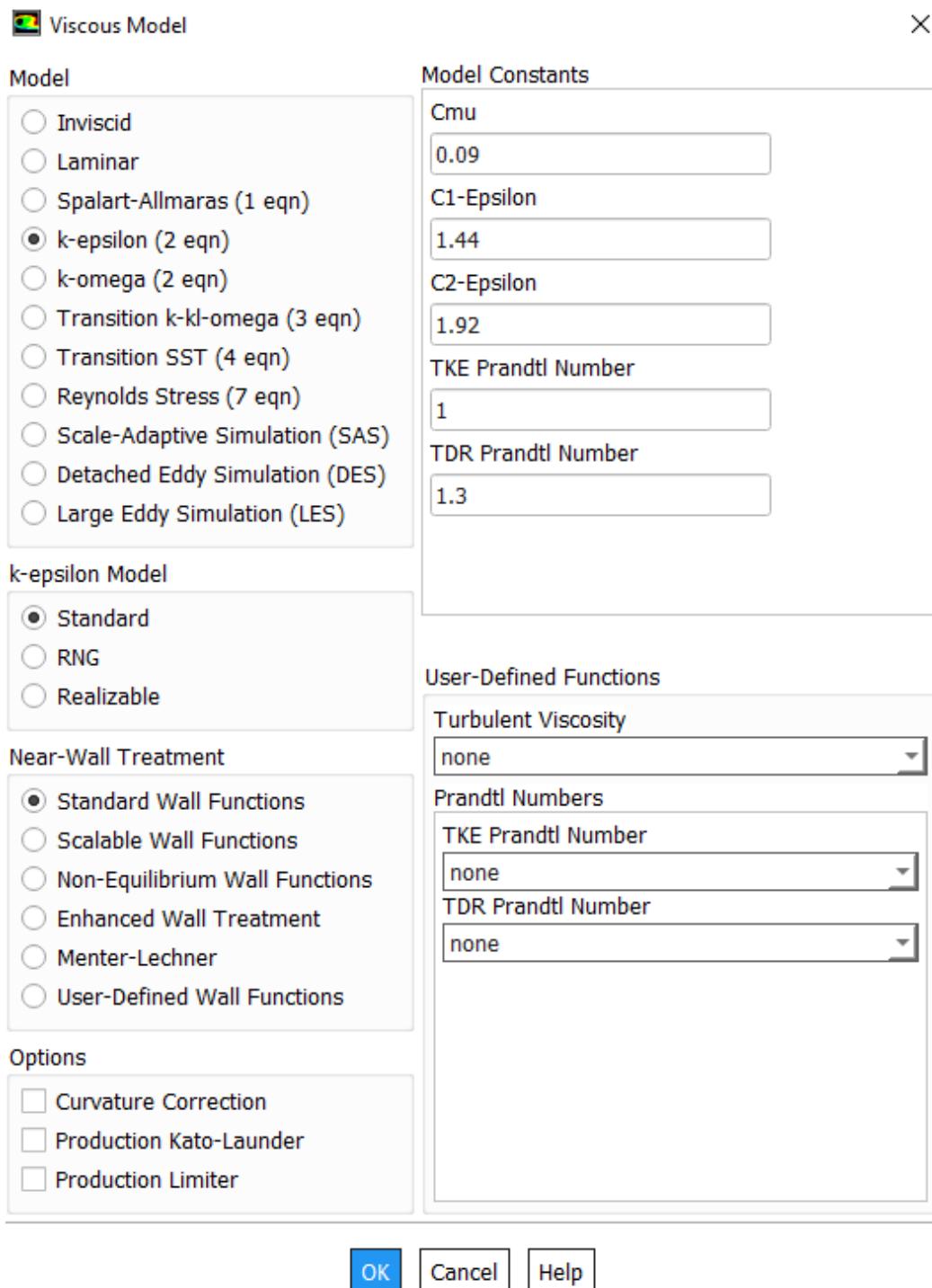


Figura 15: Características modelo de viscosidad k-epsilon. Ansys Fluent.

c) Materiales:

En el apartado de materiales tenemos dos distintos, por un lado, el del fluido y por otro el del sólido.

Para el caso del fluido se define aire con la densidad y viscosidad correspondientes y para el sólido será aluminio el material escogido.

d) Condiciones de contorno:

Para las condiciones de contorno se deberá definir la velocidad en la superficie de entrada del flujo (magnitud y dirección) así como la presión en la superficie de salida. Cada una de las caras del “cubo” tiene un nombre en concreto. La cara llamada “in” se nombrará de tipo “velocity-inlet” y se editará para poder poner la dirección y magnitud del flujo en ella. Si se quiere un flujo completamente frontal con respecto al vehículo, la dirección será paralela al mismo (teniendo en cuenta que se trata del eje Y):

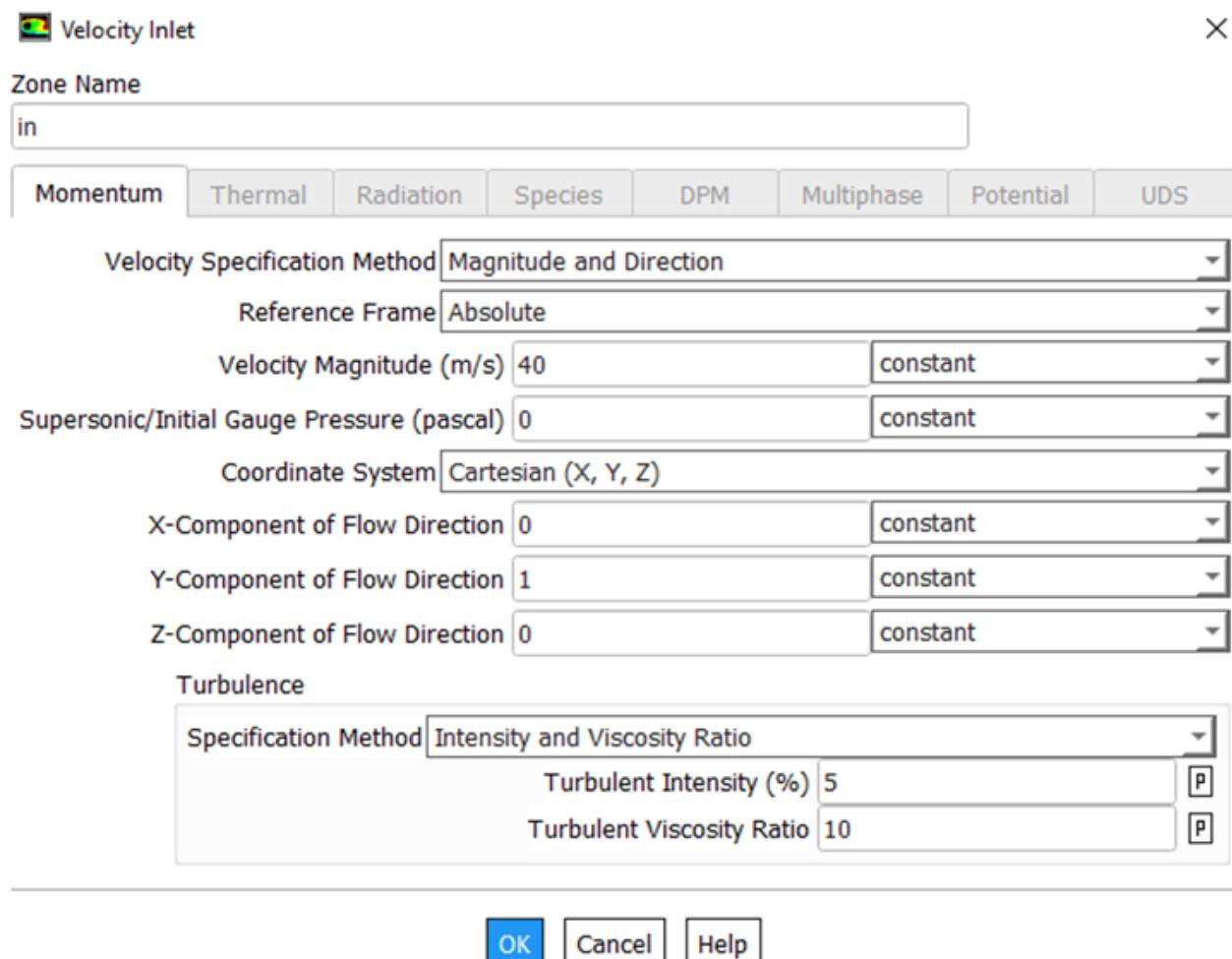


Figura 16: Propiedades de la velocidad del flujo de aire. Ansys Fluent.

Para la cara llamada “out”, la superficie se nombrará de tipo “pressure-outlet” y se impondrá la presión que se quiera en la superficie de salida del mallado creado anteriormente. La presión manométrica será igual a cero en esta superficie de salida y se impone también que al ser la presión mínima, la velocidad es máxima, es decir, la derivada de la velocidad nula. El resto de superficies, se consideran de tipo pared (“Wall”), dicho de otra manera, que el flujo no puede atravesarlas.

e) Valores de referencia:

En este apartado final del “setup” es donde se fija el área frontal del vehículo (en caso de querer calcular la fuerza y coeficiente de resistencia) o el área del vehículo que crea sustentación (en caso de querer calcular la fuerza y coeficiente de sustentación). Además, también se define la magnitud de la velocidad del fluido:

Reference Values	
Area (m ²)	2.36
Density (kg/m ³)	1.225
Enthalpy (j/kg)	0
Length (m)	1
Pressure (pascal)	0
Temperature (k)	288.16
Velocity (m/s)	40
Viscosity (kg/m·s)	1.7894e-05
Ratio of Specific Heats	1.4

Figura 17: Valores de referencia. Ansys Fluent.

05. Método de resolución en Ansys Fluent

A la hora de resolver las ecuaciones dentro del programa Ansys Fluent, se dispone de varios métodos de discretización para obtener una solución aproximada. En primer lugar, se deberá indicar el tipo de acoplamiento presión – velocidad que se quiera, en este caso, se ha elegido de tipo simple (se trata de indicar la manera en la que interaccionarán la presión y la velocidad). Para ello, se resolverá la ecuación de cantidad de movimiento empleando un campo de presiones ficticio, de forma que se añade una corrección al flujo conservando la ecuación de continuidad. Este algoritmo es el que se suele usar por defecto, existen otros disponibles en el programa sobre todo cuando la convergencia a la solución depende del acoplamiento entre la presión y la velocidad. En flujos complejos con turbulencia, como el que nos ocupa, podría mejorarse la convergencia usando el método *simplec*, pero en realidad son los modelos físicos los que impiden una convergencia más rápida y por tanto se estima que tanto *simple* como *simplec* dan resultados parecidos.

Para la interpolación de las variables, se ha elegido de mínimos cuadrados con las variables almacenadas en los centros de las celdas (“Least Squares Cell Based”).

Por defecto, el programa interpola los valores de la presión en los lados de las celdas usando los coeficientes de la ecuación de cantidad de movimiento. Esto funciona cuando la variable presión entre celdas contiguas es pequeña.

Una de las hipótesis del programa que puede conducir a errores es que toma gradiente de presión normal cero en las paredes, que es válido en la capa límite, pero no en flujos con grandes fuerzas sobre las superficies ni en superficies curvas. Por ello, se usan a veces esquemas de interpolación.

Las derivadas espaciales de las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento se resuelven usando un método numérico de tercer orden, (“Third-Order MUSCL”), apto para resolver discontinuidades en el flujo. Básicamente, se trata de reconstruir la aproximación de valores constantes de las variables en celdas por valores lineales reconstruidos con los valores de las variables obtenidas en el tiempo anterior y limitadas por la pendiente obtenida con el gradiente. La discretización del modelo K-epsilon de turbulencia se realiza con un modelo de volúmenes finitos descentrado en la celda.

Todo en conjunto quedaría de la siguiente manera:

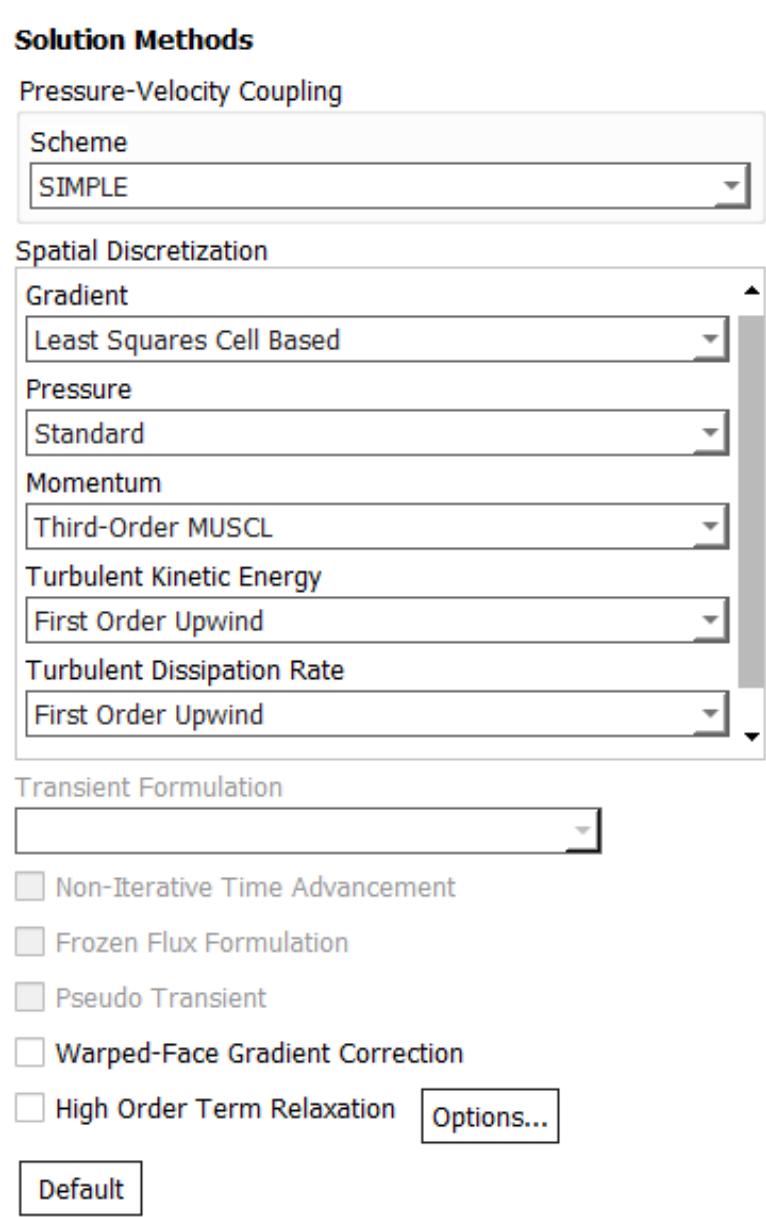


Figura 18: Método de resolución. Ansys Fluent.

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS AERODINÁMICA DEL VEHÍCULO

Análisis de Resultados de la Aerodinámica del Vehículo

Una vez que se tiene el modelo parametrizado y dividido en celdas se ha procedido a realizar las simulaciones con los parámetros que se han indicado en el capítulo anterior. Se han seleccionado una serie de velocidades en las que el vehículo opera, desde 30 km/h hasta la máxima velocidad punta marcada por el fabricante de 260 km/h. En primer lugar, se presenta mediante una tabla los resultados numéricos obtenidos:

Velocidades:	F _d (N)	C _d	Reynolds (Cd)	F _l (N)	C _l	Reynolds (Cl)
30 km/h	32,5727	0,3271	7,92E+05	-21,4780	-0,0560	2,82E+06
50 km/h	88,9618	0,3268	1,32E+06	-66,1230	-0,0615	4,69E+06
120 km/h	518,8650	0,3231	3,18E+06	-565,3320	-0,0916	1,13E+07
200 km/h	1445,5360	0,3246	5,30E+06	-1651,1900	-0,0962	1,89E+07
260 km/h	2446,6665	0,3247	6,89E+06	-2855,3420	-0,0984	2,46E+07

Tabla 4: Resultados numéricos obtenidos en Ansys – Fluent.

En relación con la tabla anterior, se puede observar la evolución de los parámetros medidos en las distintas simulaciones llevadas a cabo. Se obtienen valores de fuerzas de sustentación y arrastre, así como los coeficientes de sustentación y arrastre. Para cada uno de los casos, se ha calculado también el número de Reynolds teniendo en cuenta la longitud característica en cada caso.

Se observa que conforme la velocidad aumenta, el número de Reynolds aumenta, tomando valores desde $2,8 \cdot 10^6$ hasta $2,4 \cdot 10^7$ (en el caso del coeficiente de sustentación) manteniendo siempre la condición de flujo turbulento. También se aprecia que la fuerza de arrastre es siempre mayor que la de sustentación, aumentando ambas conforme la velocidad aumenta, lo cual es esperable. El que la fuerza de arrastre aumente con la velocidad significa que, a mayor velocidad, mayor será la fuerza de resistencia al viento que el coche deberá de vencer y por otro lado, el vehículo crea mayor carga aerodinámica conforme la velocidad aumenta.

En cuanto a los coeficientes, el de arrastre permanece aproximadamente constante con valor de 0,32, mientras que el de sustentación a velocidades bajas va aumentando y a partir de la tercera simulación cuando el vehículo viaja a una velocidad de 120 km/h se mantiene constante en 0,9.

Para poder analizar estos últimos valores, se ha realizado una comparación con resultados obtenidos de los coeficientes de arrastre y sustentación de otros vehículos que se muestran en la tabla 5. Se observa que el Tesla Model S se encuentra muy bien posicionado. Por ejemplo, el valor calculado del coeficiente de arrastre del Tesla es menor que el de un Opel Astra ($C_d = 0,33$), el de un Peugeot 807 ($C_d = 0,33$) o el de un Porsche 911 ($C_d = 0,34$) y por supuesto, menor que modelos más antiguos donde el diseño aerodinámico cobraba menos importancia como por ejemplo, el de un Alfa Romeo 1750 GT ($C_d = 0,38$) o un Ford Escort ($C_d = 0,42$) [<http://www.technicalcourses.net/portal/estudiodelaerodinamicadeunvehiculo>].

Modelo	Cd
Tesla Model S (Simulación)	0,32
Audi A3 (2003)	0,32
Peugeot 807 (2002)	0,33
Opel Astra (2004)	0,33
Porsche 911 (1973)	0,34
Ford Escort (1999)	0,42

Tabla 5: Comparación resultados (Cd) de la simulación con otros vehículos.

No obstante, el valor obtenido de la simulación del Tesla Model S con respecto al proporcionado por el fabricante es algo diferente. De todos modos, no dan información de en qué condiciones se obtiene dicho valor y quizás si se hiciese una simulación más refinada o cambiando alguno de los métodos seleccionados se podría llegar a valores similares. Este modelo de Tesla cuenta con un sistema de suspensión neumática inteligente que consiste en que, conforme la velocidad del vehículo aumenta, la altura del vehículo se reduce y por tanto el área frontal del modelo también. Esto es algo que en el CAD del que se ha partido para desarrollar el trabajo, no se ha incorporado, por tanto, hay muchas variables por las que los resultados obtenidos en las simulaciones no sean iguales a los proporcionados por el fabricante, en este caso, Tesla.

Por otro lado, para el coeficiente de sustentación, si realizamos el mismo análisis de comparación con otros vehículos, vemos que la mayoría de turismos de calle no son capaces de crear carga aerodinámica, en cambio, en los coches de competición se prioriza la generación de carga aerodinámica a costa de que el vehículo sea un poco más resistente al viento. Este es el caso de los monoplazas como los F1 que tienen un coeficiente de arrastre cercano a 0,8 (Cd = 0,8) pero son capaces de crear mucha carga aerodinámica que les empuje en dirección al asfalto con los beneficios de estabilidad y agarre que ello conlleva.

Modelo	Cl
Tesla Model S (Simulación)	-0,09
Mazda GTO	-0,44
Porsche 917	-1,04
Peugeot 305 GL	0,40

Tabla 6: Comparación resultados (Cl) de la simulación con otros vehículos.

Así pues, el Tesla Model S se encuentra lejos de los coches de competición como por ejemplo el Porsche 917 (Cl = -1,04) o el Mazda GTO (Cl = -0,44) pero sí que crea mayor carga aerodinámica que vehículos convencionales como por ejemplo el Peugeot 305 GL (Cl = 0,4).

Al final de este capítulo se mostrará una serie de gráficas donde se analiza de una manera más detallada la evolución y comportamiento de los coeficientes de arrastre y sustentación.

A continuación, se presenta el análisis cualitativo de los resultados numéricos obtenidos de las simulaciones. Para poder visualizar los parámetros que el programa devuelve, usaremos los gráficos ("plots") y líneas de corriente ("pathlines") para observar la influencia que tiene el viento en las distintas partes del vehículo, o en qué partes del mismo la presión ejercida es mayor o menor, así como la velocidad o turbulencia creada.

No se mostrarán en la memoria todas las figuras obtenidas ya que son parecidas para valores de velocidad cercanos. Únicamente se presentarán las que son consideradas como más representativas y el resto se muestran en el anexo III.

En las figuras 19, 20 y 21 se muestran, según la escala de colores, los valores de la presión total ejercida sobre las superficies del vehículo (vista isométrica, lateral y en planta respectivamente) para la máxima velocidad punta que alcanza el vehículo, es decir, 260 km/h.

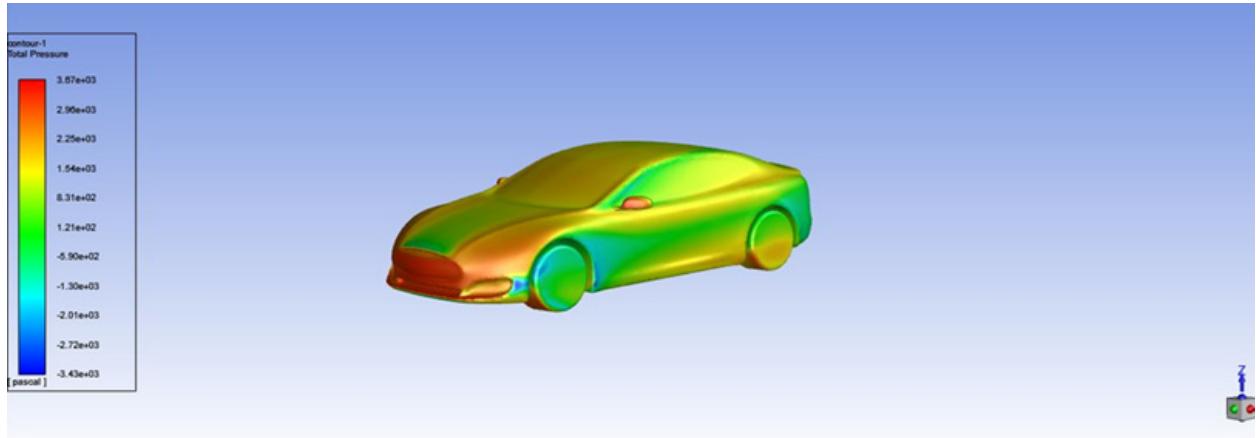


Figura 19: Vista isométrica presión total. Velocidad 260 km/h. Ansys-Fluent.

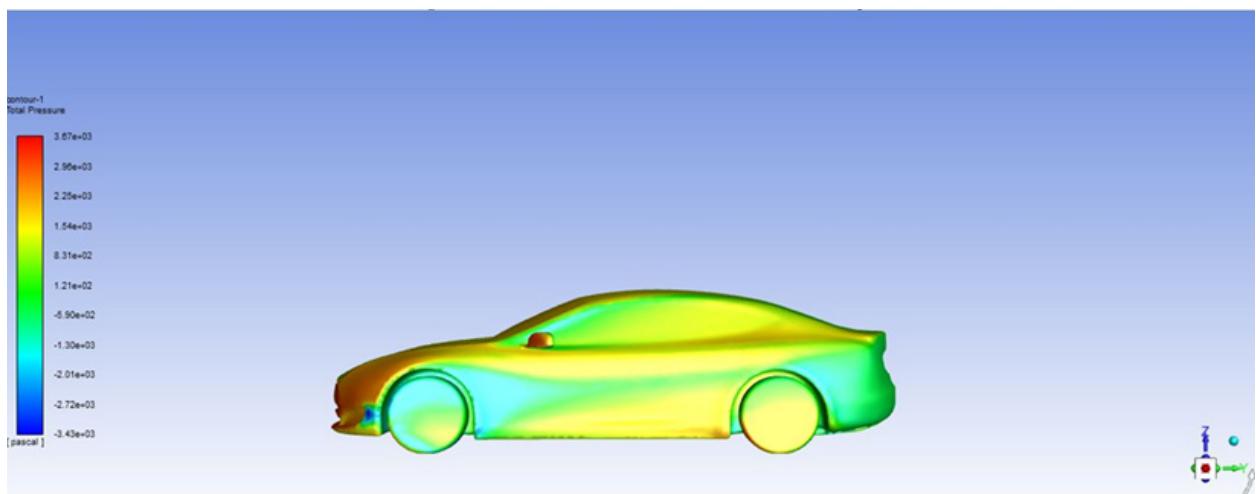


Figura 20: Vista lateral presión total. Velocidad 260 km/h. Ansys-Fluent.

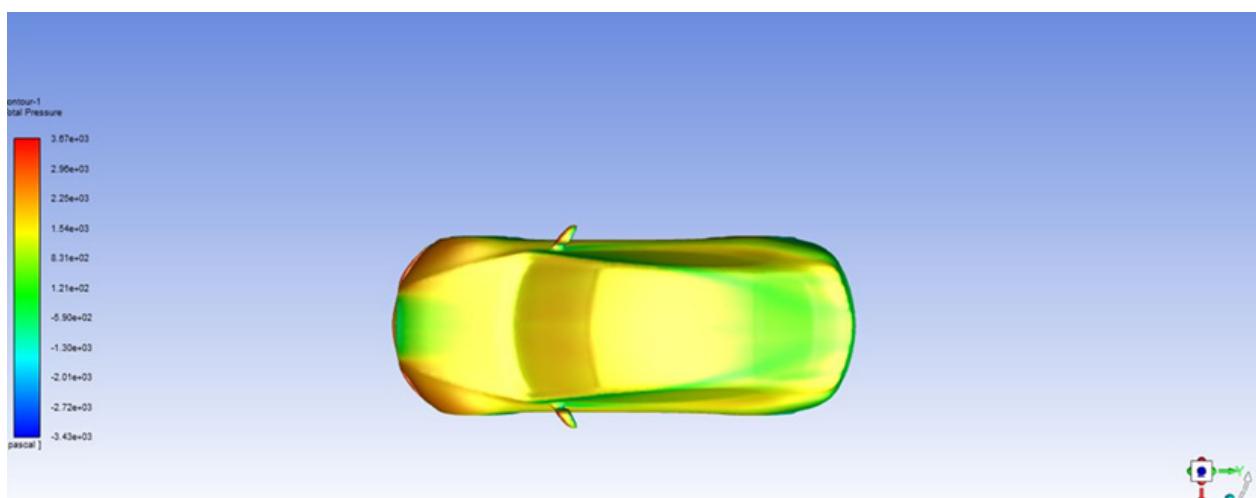


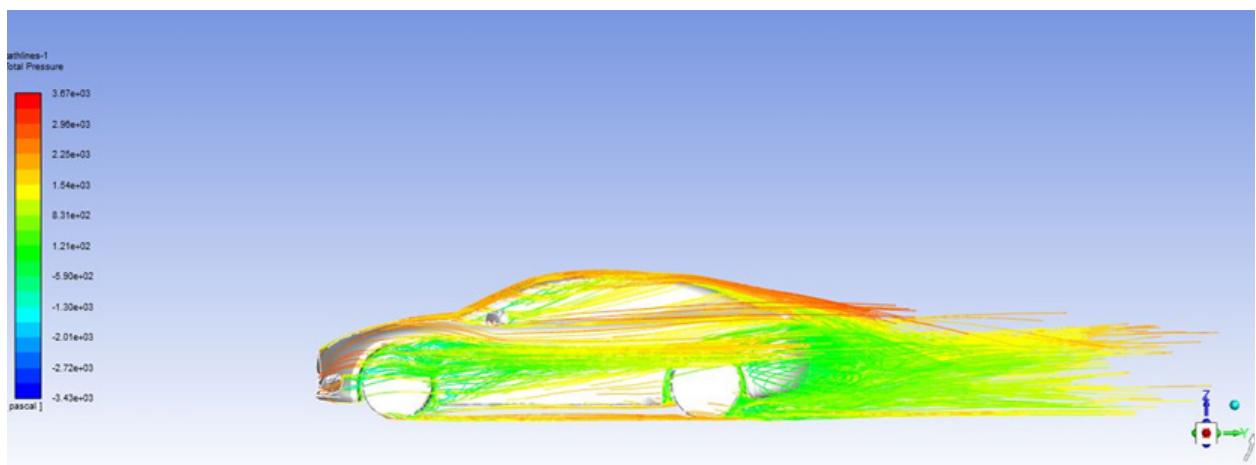
Figura 21: Vista cenital presión total. Velocidad 260 km/h. Ansys-Fluent.

(5) E.c: Escala de colores.

En las figuras anteriores, podemos observar en qué zonas del vehículo se ejerce mayor presión por parte del viento según la escala de colores. El valor máximo de presión total es de 3670 Pa y se encuentra en la zona del paragolpes (parte frontal) y en los retrovisores. Esto se debe a que son las partes del vehículo más expuestas a la incidencia del viento ya que son completamente perpendiculares a la dirección del fluido.

El valor mínimo de presión total ejercida es de -3430 Pa, es decir, hay en zonas del vehículo donde se crea depresión y son las partes de debajo del vehículo, en el fondo del mismo, así como en algunas pequeñas zonas laterales cercanas a las ruedas delanteras (se puede ver en la figura 19 y 21). El hecho de que en la parte inferior del vehículo se cree depresión, concuerda perfectamente con los coeficientes de sustentación negativos que se pueden observar en la tabla 4. Esto quiere decir que, gracias a su diseño, el vehículo es capaz de crear carga aerodinámica, que proporcionará mayor agarre en la conducción del mismo.

En la figura 22, se visualizan las líneas de corriente representadas/coloreadas con la escala de la presión total ejercida por el viento en una vista lateral.



En la imagen anterior, se puede apreciar la diferencia de presiones que se produce entre la parte superior e inferior. Por la parte superior del vehículo, la presión que se ejerce es mucho mayor a la de la parte inferior según la escala de colores, por tanto, el modelo viajando a una velocidad de 260 km/h experimentará una fuerza vertical y en sentido descendente. Se puede observar en el lateral del vehículo a la altura de las ventanillas unas líneas de color rojo que nos indican que se está produciendo alta presión en esas zonas y que son debidas a los retrovisores ya que se trata de un elemento esencial para la seguridad vial (sin ellos sería mucho más difícil circular) pero en términos aerodinámicos es un elemento que produce mucha resistencia al viento y no son convenientes para reducir el coeficiente de arrastre, de hecho lo aumenta en gran cantidad. Una gran innovación en el diseño de vehículos sería la supresión de los retrovisores. Hoy en día quizás podría pensarse en sustituirlos por cámaras que se encontraran en el interior del vehículo.

A continuación, en las figuras 23 y 24, se mostrarán las líneas de corriente debidas a la velocidad en sentido contrario al vehículo (eje y) y a la turbulencia que se genera.

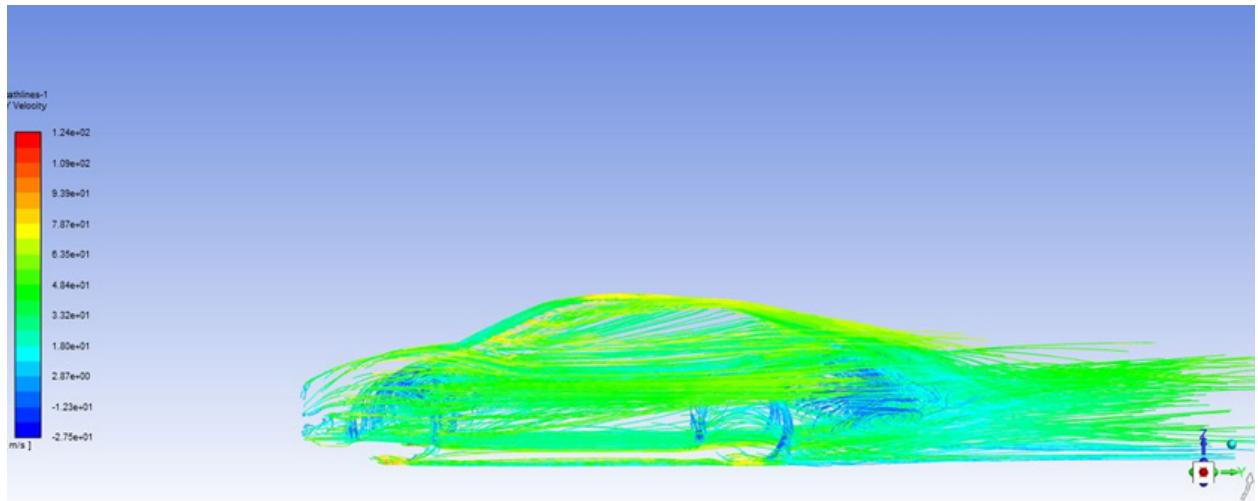


Figura 23: Vista lateral líneas de corriente. E.c velocidad eje (y). Velocidad: 260 km/h. Ansys - Fluent.

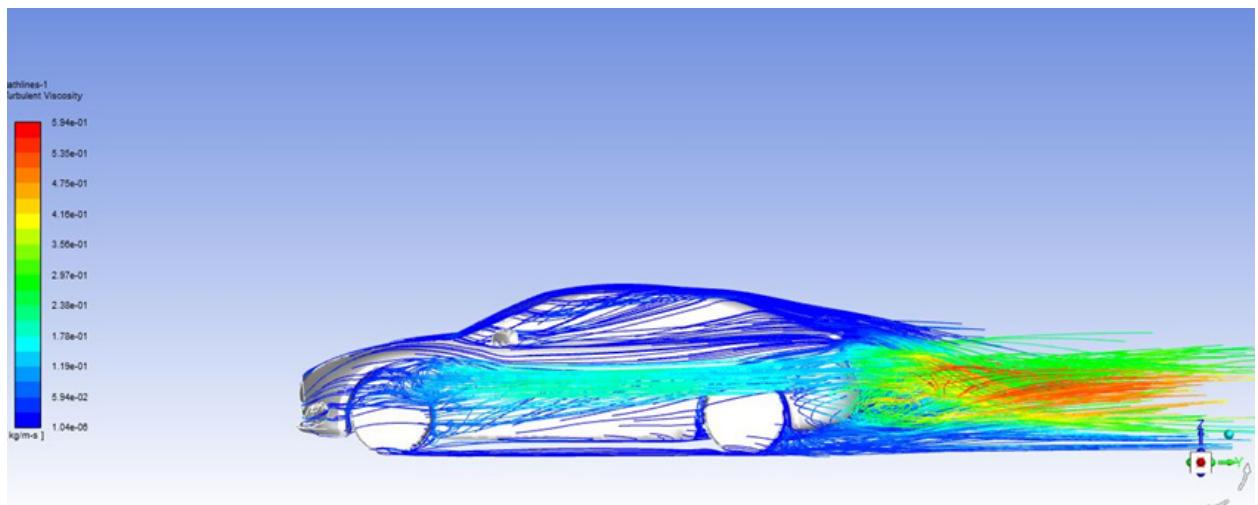


Figura 24: Vista lateral líneas de corriente. E.c turbulencias. Velocidad 260 km/h. Ansys - Fluent.

En la figura 24, se puede observar que el flujo de aire experimenta cambios conforme avanza sobre la longitud del vehículo. En la parte posterior del mismo, las turbulencias generadas por el modelo alcanzan su punto máximo, según la escala de colores, el rojo alcanza un valor de 0,594 kg/m.s. Resulta interesante observar cuando un coche va en carretera con el suelo mojado y levanta una estela a su paso, ya que se puede examinar como incide el flujo alrededor del vehículo y se observaría en cierto modo lo mismo que ocurre en la figura 24. Es por eso que, al hacer el diseño de la malla, hay que refinarla aguas abajo, pudiendo dejar la malla más gruesa aguas arriba. En este caso, al no poder disponer de la representación gráfica en CAD original del vehículo, no se ha podido realizar este refinamiento y la malla es igual en todos los sitios. Si se quisiera hacer un análisis más detallado de la zona aguas abajo para mejorar el diseño de la parte trasera del vehículo, habría que refinar esta zona como se ha comentado.

En las figuras 25 y 26, se muestran dos representaciones de la evolución de los coeficientes de sustentación y arrastre con un total de 1000 iteraciones, bajo la hipótesis de que el vehículo viaja a una velocidad de 120 km/h:

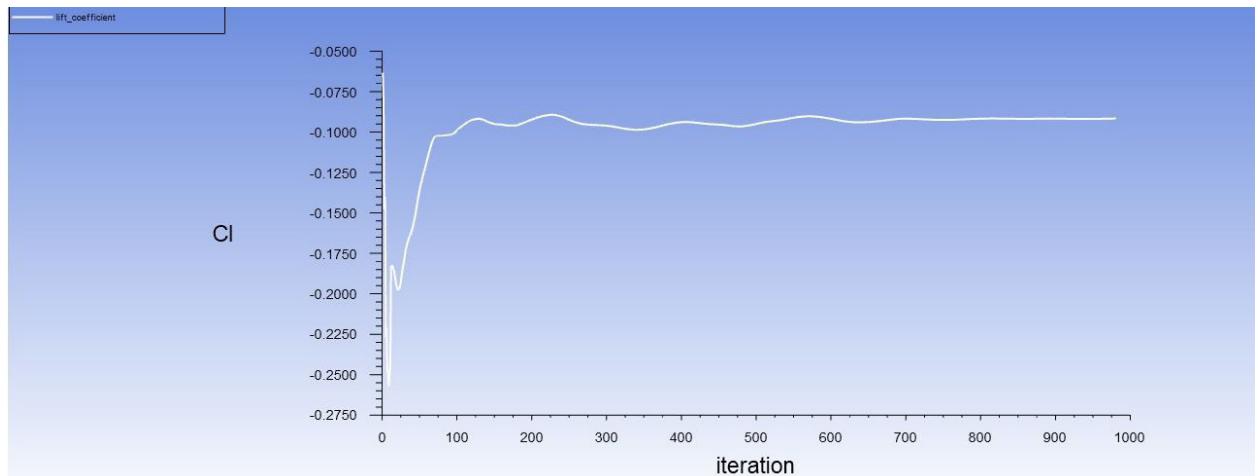


Figura 25: Evolución coeficiente de sustentación. Velocidad 120 km/h. Ansys - Fluent.

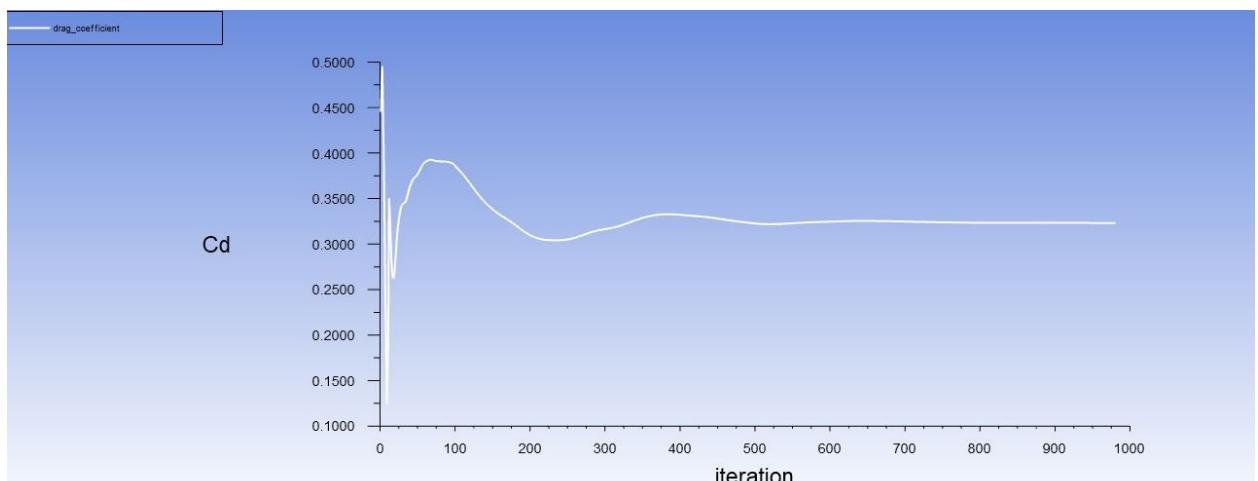


Figura 26: Evolución coeficiente de arrastre. Velocidad 120 km/h. Ansys – Fluent.

Para poder realizar las figuras anteriores, se ha usado una de las herramientas dentro del programa Fluent que describe la evolución de la convergencia de coeficientes y fuerzas de arrastre y sustentación entre otros aspectos. En esta evolución, se ve cómo ambos coeficientes siguen una tendencia ascendente en los primeros pasos para estabilizarse rápidamente en un valor constante, para el caso del coeficiente de sustentación de $Cl = -0,0916$ y para el de arrastre de $Cd = 0,3231$.

Tras observar los resultados de la tabla 4 y las dos últimas figuras 25 y 26, se comprueba que los valores de la fuerza y coeficiente de sustentación son de signo negativo, teniendo en cuenta que el vector de dirección del flujo se ha introducido en dirección positiva, lo que nos indica que se está produciendo una fuerza de sustentación negativa, es decir, se crea carga aerodinámica que es exactamente lo que se busca en los vehículos deportivos y de competición.

Esto es una gran ventaja en comparación con los vehículos de calle que no son específicos de circuitos de carreras ya que no son capaces de crear carga aerodinámica y únicamente se focaliza en el objetivo de conseguir una menor resistencia al viento.

Por ejemplo, si a un turismo se le añade un alerón trasero, aumentará la carga aerodinámica y será un coche que nos facilite su conducción ya que proporcionará un gran agarre en contacto con el asfalto, pero por otro lado, el hecho de introducir un elemento aerodinámico como es un alerón, hará al vehículo mucho más resistente al viento y aumentará su coeficiente de arrastre, por tanto, se trata de conseguir un buen equilibrio entre resistencia al flujo de viento y carga aerodinámica.

En el caso del modelo Tesla Model S que es un vehículo deportivo pero preparado para circular por la calle, queda demostrado que tiene poca resistencia al viento (drag) y que además por su propio diseño, se consigue cierta carga aerodinámica (downforce) que podría aumentar considerablemente con la introducción del alerón comentado anteriormente. Hubiese sido interesante introducir este elemento en la simulación para poder comparar los resultados, pero como hemos dicho anteriormente no se ha podido disponer del fichero original de representación gráfica del vehículo, por tanto, introducir nuevos elementos a un fichero que no es el original desvirtuaría los resultados obtenidos.

Siguiendo con el análisis de los coeficientes de sustentación y arrastre, se han realizado dos figuras para ver la dependencia de los coeficientes con el número adimensional más importante en este tipo de estudios, el número de Reynolds. Hay que tener en cuenta la elección de la longitud característica para el cálculo del número de Reynolds; ya que para el caso del coeficiente de sustentación será la longitud del vehículo y para el coeficiente de arrastre la altura del mismo.

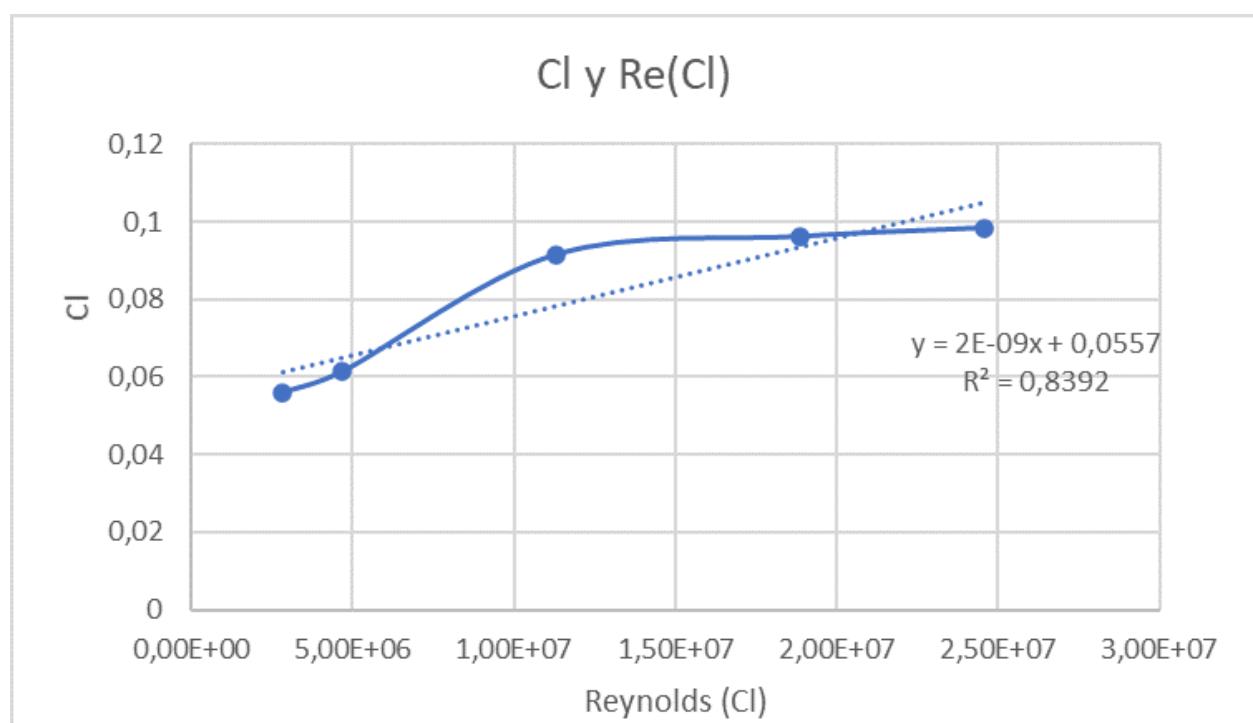


Figura 27: Evolución coeficiente de sustentación en función del número de Reynolds.

En la figura 27, se muestra la dependencia del coeficiente de sustentación (eje y) frente al número de Reynolds (eje x), para las distintas velocidades a las que se ha simulado el modelo (30, 50, 120, 200 y 260 km/h). Aunque el comportamiento de este coeficiente no es claramente significativo, sí que se aprecia una cierta tendencia a aumentar a bajos números de Reynolds para posteriormente estabilizarse y hacerse constante en torno a el valor de 0,1.

Como hemos visto anteriormente, el valor medio obtenido para el coeficiente de sustentación, nos informa de que siendo un coche que está destinado a ser usado en vías o carreteras públicas, tiene la capacidad de crear carga aerodinámica aunque como es lógico, mucha menos de lo que puede generar cualquier vehículo destinado a la competición.

A continuación, en la figura 28, haremos lo mismo, pero en este caso, para el coeficiente de arrastre:

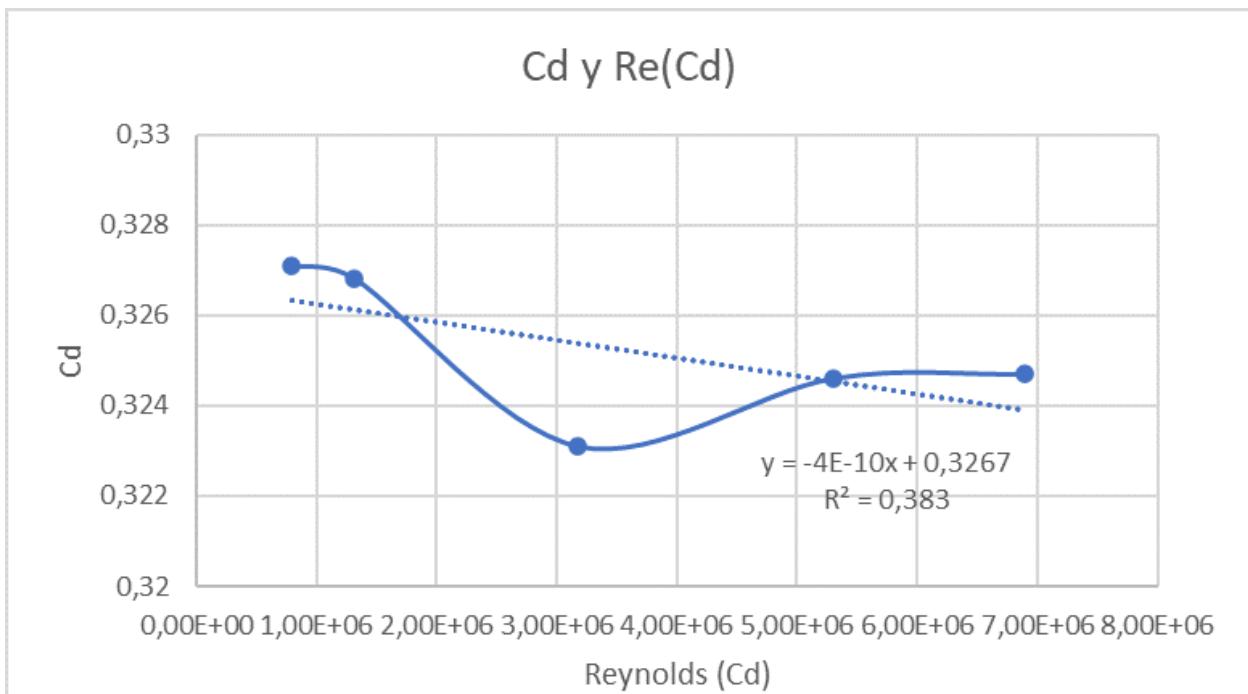


Figura 28: Evolución coeficiente de arrastre en función del número de Reynolds.

En la figura 28, se aprecia como el coeficiente de arrastre disminuye conforme el número de Reynolds aumenta, tendiendo a estabilizarse para altos valores de Reynolds.

Aun así, la disminución que se produce a bajos valores del número de Reynolds es mínima como se puede observar en los valores indicados del eje "y" de la figura 40.

De todos modos, se pone de manifiesto que el resultado del coeficiente de arrastre obtenido es realmente pequeño, prueba de ello, el Tesla Model S es un modelo que tiene poca resistencia aerodinámica.

Algunas variaciones con respecto a las simulaciones originales

Después de haber analizado la incidencia del flujo frontal sobre el vehículo a estudiar, se nos plantean diferentes situaciones que experimenta el coche en la vida real que no se han visto hasta ahora, como por ejemplo, ¿qué sucede cuando el flujo de aire no es constante y por tanto es racheado?, ¿cómo reacciona el Tesla Model S a un viento que tiene cierta incidencia lateral y por tanto ya no es completamente frontal como hasta ahora?, ¿y si el flujo de viento es “a favor”, (es decir, en la misma dirección y sentido en la que viaja el vehículo)?. Algunas de estas preguntas son complejas y requieren de una gran noción en el campo de la aerodinámica e incluso otras, como la situación en la que se pueda producir una ráfaga de viento, se hace realmente complicado analizarlo. Tal es así, que hoy en día, algunos departamentos de aerodinámica de grandes equipos de competición siguen sin saber por qué su vehículo pierde o gana rendimiento ante un viento racheado ya que es difícil analizarlo mediante CFD o túnel de viento.

En este apartado, se analizará una de estas situaciones, que es, cuando el flujo de aire pasa de ser frontal como hasta ahora a tener 30º de incidencia con respecto a la línea longitudinal del vehículo, es decir, este nuevo flujo es frontal-lateral. A continuación, se realizará una comparación del coeficiente de arrastre para un flujo frontal (situación anterior) y un flujo frontal-lateral con 30º de inclinación para una serie de velocidades a las que puede viajar el modelo Tesla Model S.

Velocidades	Cd (Flujo Frontal)	Cd (Flujo con 30º de incidencia)
30 km/h	0,3271	0,4713
50 km/h	0,3268	0,4745
120 km/h	0,3231	0,4771
200 km/h	0,3246	0,4870
260 km/h	0,3247	0,4901

Tabla 7: Comparación resultados (Cd) entre flujo frontal y flujo frontal-lateral (30º de incidencia).

Lo primero que se observa en la tabla 7 comparativa es que, cuanto mayor es el ángulo de incidencia (es decir el flujo de aire se vuelve cada vez más lateral), mayor es el coeficiente de arrastre. Se puede ver que conforme la velocidad a la que viaja el vehículo aumenta, el coeficiente de arrastre también y se aprecia que tiende a estabilizarse en torno a Cd = 0,49 para velocidades más altas. Una de las afirmaciones que más se utilizan para dar explicación a el porqué de ese aumento del coeficiente de arrastre conforme al incremento del ángulo de incidencia es que “se debe al aumento de la región de recirculación aguas abajo del vehículo que afecta directamente al coeficiente de arrastre” [Kumar, 2019].

En cambio, otras fuentes apuntan a que al entrar en contacto el flujo de aire con el vehículo se vuelve más turbulento que en el caso de un flujo frontal y por tanto dichas turbulencias hacen que aumente el coeficiente de arrastre [Newey, 2019].

A continuación, se analizará en la figura 29 las líneas de corriente en una situación en la que el flujo de aire es de incidencia lateral.

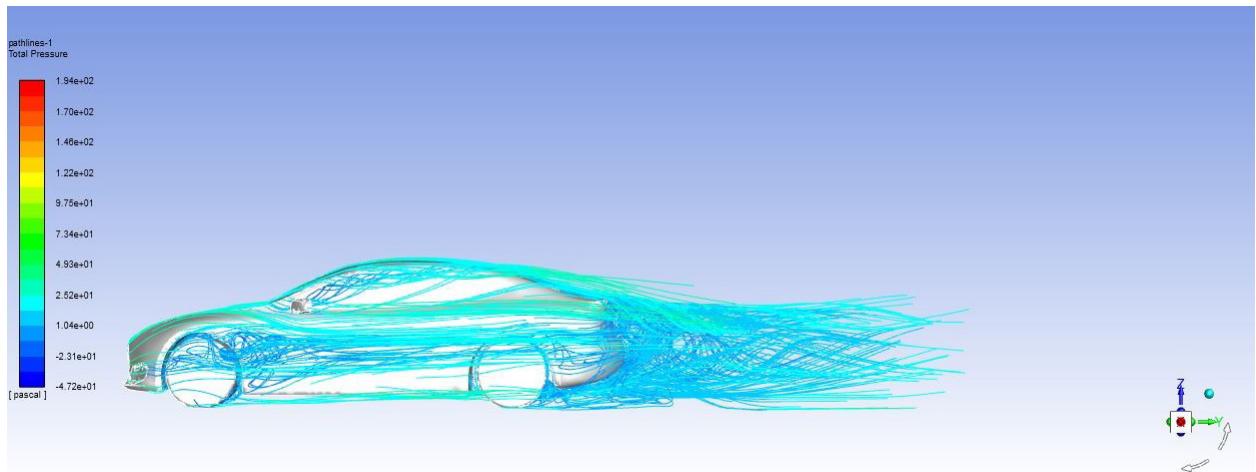


Figura 29: Vista lateral líneas de corriente. Flujo de incidencia lateral. Velocidad 30 km/h. Ansys-Fluent.

En la figura anterior, se aprecia cómo es el movimiento del flujo de aire alrededor del vehículo. Si se compara con un flujo de aire de incidencia frontal vemos que es mucho menos uniforme. En la parte posterior del vehículo se ven zonas donde se produce recirculación de flujo provocado porque se producen mayores turbulencias cuando el fluido entra en contacto con la carrocería del coche. Esto coincide totalmente con lo que dicen ciertas fuentes comentadas anteriormente.

En la figura 30, se analiza las líneas de corriente desde una vista cenital para un flujo de aire de incidencia lateral.

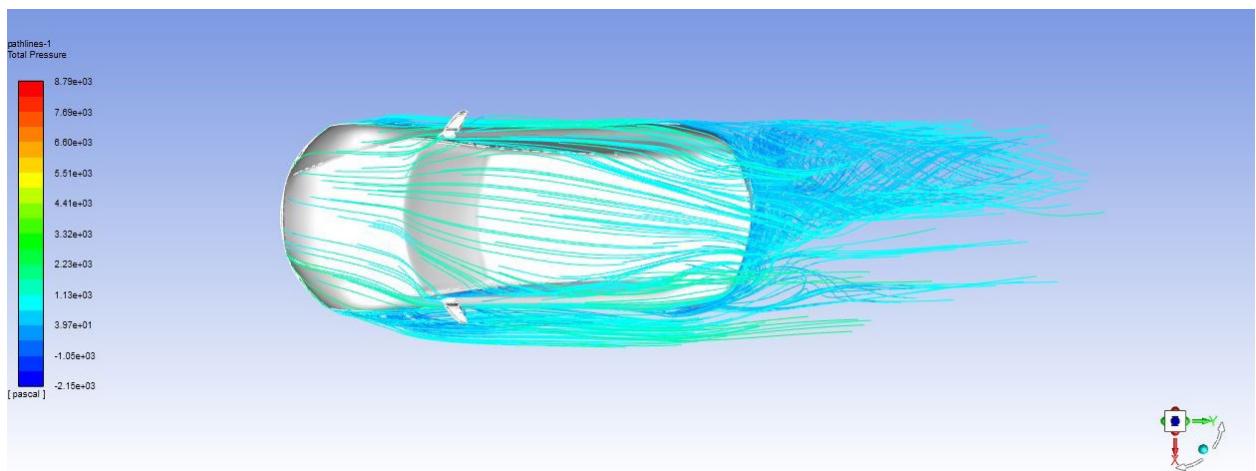


Figura 30: Vista cenital líneas de corriente. Flujo de incidencia lateral. Velocidad 200 km/h. Ansys-Fluent.

En la figura anterior, se observa la asimetría del flujo de aire aguas abajo del vehículo. Este hecho hace que afecte directamente a la estabilidad del vehículo, así como a la resistencia al avance del mismo. Por tanto, se puede dar una explicación a el porqué del aumento del coeficiente de arrastre cuando el flujo ya no es de incidencia frontal como antes.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

Conclusiones

Después de realizar el estudio aerodinámico del modelo “Tesla Model S” se puede afirmar que, se ha obtenido un modelo físico adecuado a las necesidades del proyecto. Ha sido necesario hacer un estudio de las fuerzas que actúan sobre el vehículo y qué influencia tienen éstas sobre el coche. Al final, se ha visto que la implementación del modelo en un programa de cálculo facilita de manera importante la resolución del mismo.

Tras la realización de este trabajo fin de grado, se ha comprendido de una manera mucho más específica los principios por los cuales se rige la aerodinámica en el campo del automóvil, la forma en la que se trata de encontrar la mayor eficiencia posible del vehículo con su correspondiente reducción de resistencia al flujo de aire o en el caso de los coches deportivos, la búsqueda de la carga aerodinámica que permita obtener el comportamiento que se deseé.

Se ha estudiado de forma genérica el funcionamiento del programa Ansys – Fluent de fluidodinámica computacional a través del modelo simulado. Se ha estudiado la influencia de los distintos modelos numéricos y parámetros de simulación además de la importancia de las condiciones de contorno y el tipo de acoplamiento presión – velocidad deseado.

Los resultados obtenidos de las simulaciones llevadas a cabo hay que ponerlos en contexto, ya que el fichero CAD del vehículo no se corresponde exactamente con el modelo real y no se ha podido disponer de los datos originales para poder hacer nuevas propuestas, mejoras o sugerencias. Esto también ha afectado a la hora de hacer un posible refinamiento de la malla ya que es igual en todas sus zonas. Tanto es así, que si comparamos el valor del coeficiente de arrastre del modelo simulado ($C_d = 0,32$) con el valor que el fabricante (en este caso Tesla) nos proporciona ($C_d = 0,23$) se observa una clara diferencia. De todos modos, son valores que entran dentro de lo habitual en simulaciones aerodinámicas de coches deportivos, con un coeficiente de arrastre realmente pequeño y un coeficiente de sustentación de signo negativo, lo que nos indica que el “Tesla Model S” es capaz de crear carga aerodinámica.

En cuanto a las modificaciones realizadas con respecto a las simulaciones originales, se aprecia que, con la introducción de un ángulo de incidencia, en este caso, ángulo de 30° , el coeficiente de arrastre aumenta en comparación con un flujo de incidencia frontal.

Tras estudiar su comportamiento, se concluye que es debido a un aumento de las zonas donde se producen turbulencias aguas abajo del vehículo. Esto se explica porque el nuevo flujo de incidencia frontal-lateral es asimétrico y afecta directamente a la estabilidad del vehículo.

Algunas de las simulaciones iniciales han tenido que ser repetidas porque mostraban resultados poco coherentes.

Esto supone un proceso de iteración bastante tedioso hasta dar con el error en el que el aprendizaje es la base para poder solucionarlo.

Una manera interesante de poner en correlación los resultados obtenidos sería hacer una simulación del modelo a escala en el túnel de viento del área de mecánica de Fluidos. Aquí entra en juego otro de los aspectos importantes en este trabajo, que son los números adimensionales, en concreto, los que son de gran influencia en una simulación aerodinámica, el número de Mach y el número de Reynolds, principalmente este último ya que las velocidades que se usan para las simulaciones son demasiado bajas como para que el número de Mach tenga ninguna influencia.

A la hora de poder analizar los datos obtenidos del programa sirve de gran ayuda poder comparar la dependencia de los coeficientes respecto al número de Reynolds.

Una vez obtenidos los resultados de las simulaciones, se podría implementar mejoras en el vehículo para poder obtener la aerodinámica deseada.

Si por ejemplo se quisiese adaptar el Tesla Model S para un circuito de carreras, sería conveniente que, a la vista de los resultados obtenidos, el modelo tuviese mayor carga aerodinámica para poder facilitar el paso por curva, así como conseguir un mayor agarre. Una de las soluciones posibles sería colocar un gran alerón trasero y un splitter delantero para que el vehículo experimentase una considerable diferencia de presiones entre la parte superior e inferior del mismo.

En el caso de un coche de carreras, esto significa que el aire de detrás del automóvil se lanza hacia arriba, creando una forma denominada cola de gallo, que se puede ver claramente cuando los coches de Formula 1 corren en mojado, [Newey, 2019]. No obstante, con la implementación de estos componentes aerodinámicos, se vería afectada la fuerza de resistencia al flujo de aire generada por el vehículo que aumentaría de forma significativa, por tanto, habría que tener un gran equilibrio entre carga aerodinámica y resistencia al viento para que el vehículo tuviese un buen rendimiento.

Un claro ejemplo de esto es el campeonato mono marca “Electric GT” que cuentan con modelos Tesla Model S totalmente eléctricos preparados para la competición. En la siguiente figura (31), se puede observar el alerón trasero y el splitter comentados anteriormente:



Figura 31: Tesla Model S diseñado para la competición.

Otra de las posibilidades que se puede plantear es, mantener el Tesla Model S como coche deportivo pero destinado a circular por la calle. En este caso, lo que interesaría primordialmente es reducir al máximo la resistencia al flujo de aire que pueda experimentar. Una de las posibilidades a introducir sería la sustitución de los espejos retrovisores convencionales por cámaras interiores ya que como se ha comentado los espejos retrovisores son elementos que producen mucha resistencia al viento. Hoy en día, se trata de un proyecto en estudio y en experimentación y algunas marcas ya han hecho pruebas con este sistema como por ejemplo Tesla. Otras marcas han decidido dar un paso intermedio con la introducción de cámaras exteriores, es decir, retrovisores que, en vez de ser espejos, son cámaras. Lo que se pone de manifiesto es que finalmente esta novedad tecnológica llegará a todos los vehículos en el futuro.

Otro punto a destacar en el trabajo es, el número de aplicaciones de software que se han usado para realizarlo y que son de vital importancia en el mundo de hoy en día y en concreto en el de la ingeniería. Para poder realizar el acople de las ruedas del modelo al chasis por medio de las transmisiones y para calcular el área frontal y el área que crea sustentación del Tesla Model S, se ha utilizado el programa SolidEdge de diseño de CAD. Para poder realizar las simulaciones se ha utilizado el programa de CFD, Ansys-Fluent, para la redacción de la memoria y análisis de post-simulaciones los programas de Word y Excel respectivamente y por último, para maquetar esta memoria se ha usado el programa Adobe InDesign.

Finalmente, este trabajo ha representado un buen ejercicio de esfuerzo conceptual uniendo la formación académica alcanzada en el grado junto con los primeros pasos de una especialización en un tema altamente motivador que ha concluido de una manera satisfactoria ya que el objetivo principal no era otro más que realizar una introducción al mundo de la aerodinámica en el sector del vehículo. Es por tanto, que lo que se ha obtenido del mismo, es el deseo de poder continuar en un futuro próximo con más estudios aerodinámicos.

CAPÍTULO VII: BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

Bibliografía y Referencias

Libros

- [1] A. Newey. Cómo hacer un coche. Libros Cúpula, 2019.
- [2] T. Von Karman. Aerodynamics. History and analysis of flight. McGraw-Hill Paperback Edition, 31 – 97, 1963.
- [3] J. D. Anderson, Jr. A history of aerodynamics. Cambridge University Press, 1997.
- [4] Cithe. Aerodinámica básica. ANAC 47 – 96, 2012.
- [5] Y. Niño. Apuntes del curso Modelación Numérica en Ingeniería Hidráulica y Ambiental (volúmenes / elementos finitos), 2002.
- [6] T. Lajos. Apuntes del curso del Máster en Mechanical Engineering Modelling, Universidad de Budapest (“Basics of vehicle aerodynamics”), 2002.

Artículos

- [7] S. Thabet y H. Thabit. CFD simulation of the air flow around a car model (ahmed body). International Journal of Scientific and Research Publications, 2018.
- [8] Q. WANG, Z. WU, X. ZHU, L. LIU, Y. ZHANG. Analysis of aerodynamic performance of Tesla Model S by CFD. Atlantis Press, 2017.
- [9] C. Sacco y F. Giuggioloni. Análisis de cargas aerodinámicas en un auto de competición. Revista FCEFyN, 2019.
- [10] A. Kumar, S. Singh y N. Asija. Effect of slant angle variation on the drag force for Ahmed body car model. Vibroengineering procedia, 2019.

Webgrafía

- <https://www.abelcaro.com/f1/aerodinamica/>
- <https://hipertextual.com/2016/06/efecto-coanda>
- <https://www.xn--experimentosparanios-l7b.org/apagar-las-velas-detrás-de-los-objetos-solidos/>
- <https://www.motor.es/formula-1/el-difusor-un-elemento-aerodinamico-vital-201520754.html>
- https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642004000200005
- https://www.cfd-online.com/Wiki/Standard_k-epsilon_model
- <https://www.ecured.cu/Aerodin%C3%A1mica>
- <https://grupocarman.com/blog/2014/04/09/aerodinamica/>
- <https://www.autobild.es/motorsport/tecnica-f1-que-es-efecto-suelo-258303>
- <https://www.motorpasion.com/formula1/asi-funcionan-cuatro-parte-que-componen-aerodinamica-coche-formula-1>
- <https://www.diariomotor.com/consejos/aerodinamica-del-automovil-principios-basicos/>
- <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/fluidos/dinamica/magnus/magnus.htm>
- <https://www.formulaf1.es/29730/primer-analisis-del-mclaren-mp4-28/>
- <https://www.formula1atmosphere.com/aerodinamica/difusor/>
- <https://albrodpulf1.wordpress.com/2015/03/08/analisis-tecnico-splitter/>
- <https://www.formula1atmosphere.com/aerodinamica/fondo-plano/>
- <https://www.aerodinamicaf1.com/2019/09/el-fondo-plano-en-la-formula-1-ii-funcionamiento/>

LISTADO DE ANEXOS

Anexo I: Efectos aerodinámicos en vehículos

La mayoría de efectos aerodinámicos que se producen en cualquier sólido inmerso en el seno de un fluido pueden explicarse de una forma simplificada con el **principio de Bernoulli**.

Este teorema es una aplicación simplificada bajo ciertas hipótesis del principio de conservación de la energía. Describe el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una línea de corriente, siempre que las propiedades sean uniformes, en el caso de flujo incompresible, sin transferencia de calor, sin pérdidas mecánicas como el rozamiento, etc. Esta ecuación tiene en cuenta la energía de presión, la energía cinética y la energía potencial. Si consideramos que para los vehículos las propiedades del aire no varían con la altura y despreciamos las pérdidas de energía por rozamiento (caso ideal), la ecuación de Bernoulli se simplifica todavía más y queda de la siguiente manera:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} = cte \quad EC(10)$$

De esta expresión podemos ver fácilmente que, si la aportación de la presión es menor en un estado cualquiera, la aportación de la velocidad deberá ser mayor y viceversa. Entendido este principio, será sencillo explicar los efectos aerodinámicos producidos en los vehículos. En definitiva, presión y velocidad se comportarán siempre de forma inversa.

01.1 Efecto suelo:

El principio fundamental del efecto suelo es la aplicación del principio de Bernoulli a los vehículos. Este establece que cuando reducimos la sección (la distancia del fondo del coche con el asfalto) se crea una línea de corriente con una velocidad mucho mayor a la que hay por la parte superior del coche, en la carrocería. Por tanto, si por debajo del vehículo tenemos aire a alta velocidad, y por encima la velocidad es menor, la presión tendrá que ser mayor arriba que abajo con lo que conseguimos una fuerza de sustentación negativa llamada downforce, lo que proporciona un mejor agarre del vehículo con el asfalto.

En el caso de los monoplazas como los coches de fórmula 1, para poder asegurarnos de que el aire circula por todo el suelo del coche y no se distribuye por los laterales del mismo, se diseñan faldones laterales que impidan que el flujo de aire se escape y lo conducen hacia la parte trasera del vehículo, [Newey, 2019].

Uno de los inconvenientes que tiene el efecto suelo y que se ha comprobado en competiciones generalmente de monoplazas es que en aquellas circunstancias en las que se encuentren con un bache en medio de una curva y roce el suelo, instantáneamente el coche pierde toda la carga aerodinámica al verse interrumpido el flujo que crea esa succión que le permitía ir a altísima velocidad a la que estaba trazando la curva.

Esto implica que el monoplaza continuaría en línea recta pudiendo alcanzar uno de los muros del circuito como si de una pista de hielo se tratase.

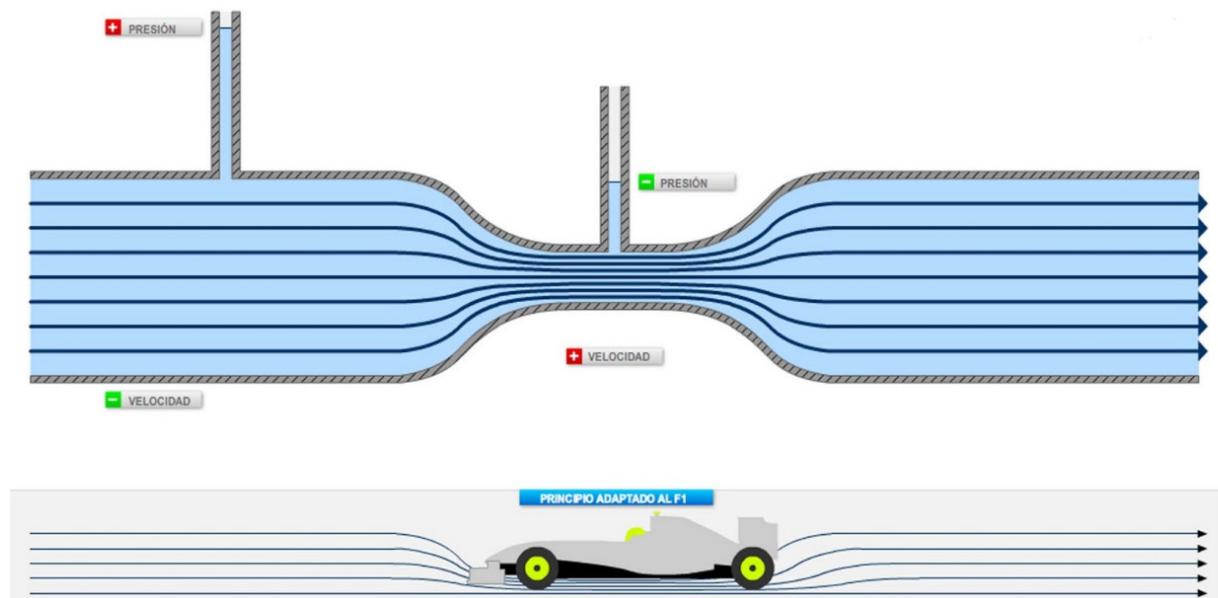


Figura 32: Efecto suelo en un monoplaza. <http://planetadelmotor.com/efecto-suelo-f1-que-es/>

01.2 Efecto Coandă

El efecto Coandă es una de las claves de la aerodinámica moderna. Esencial para el vuelo de los aviones o el desarrollo de vehículos.

Un experimento sencillo, ayuda a entender perfectamente este efecto. Si imaginamos una vela encendida y colocamos una caja de tamaño razonable entre la vela y nosotros, será imposible poder apagar la vela por mucho que soplemos ya que el aire se dispersa hacia ambos laterales al impactar con la superficie de la caja.

En cambio, si esta vez, colocamos por ejemplo una botella de vino en lugar de la caja anterior, la vela si se apagará ya que el fluido toma la curvatura de la botella al entrar en contacto con ella.

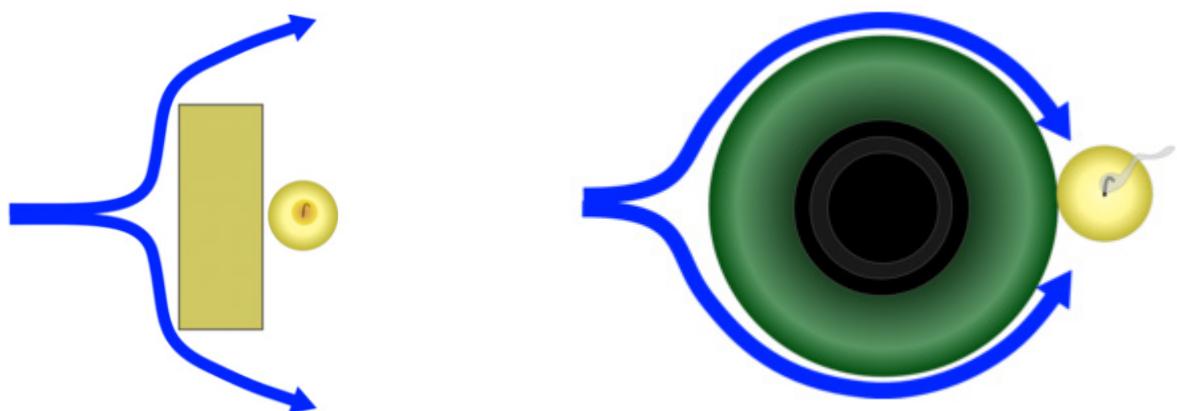


Figura 33: Experimento 1 y 2. Efecto Coanda. <https://www.xn--experimentosparanios-l7b.org/apagar-las-velas-detras-de-los-objetos-solidos/>

Por tanto, este efecto simplemente consiste en que el aire (y cualquier fluido ya sea gas o líquido) tiende a no separarse de un cuerpo sólido. Solo se separará si hay un cambio brusco en la superficie del cuerpo o si hay aristas o rugosidad. De modo que, la forma aerodinámica ideal de un cuerpo para que el aire no se separe de él sería la de “lágrima”, que es a la que tienden muchos monoplazas como por ejemplo los coches de fórmula 1:

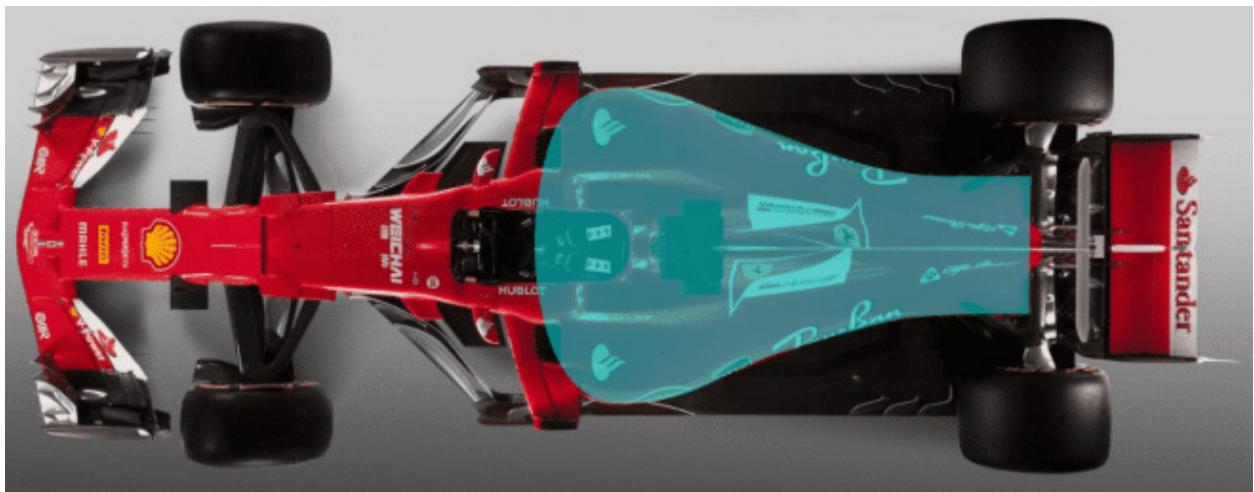


Figura 34: Efecto Coandă en un monoplaza. <https://www.abelcaro.com/f1/aerodinamica/>.

En términos sencillos, el principal agente del efecto Coandă es la viscosidad del fluido. Cuando este impacta por primera vez con un cuerpo de contorno curvo y suave, la viscosidad del fluido hace que las partículas queden temporalmente adheridas a la superficie del cuerpo sólido, creando una lámina uniforme y paralela al contorno del cuerpo.

Las sucesivas partículas que impactan posteriormente con el cuerpo generarán nuevas capas paralelas a la inicial, resultando en una progresiva desviación de la trayectoria del fluido.

Es por eso que, en el mundo de la competición, salvo los aspectos que debes cumplir por reglamento, siempre se intentan diseñar vehículos con las menores zonas rectas posibles.

Siempre que se pueda, se intentará tener una mínima curvatura en todas las piezas para que el aire pueda pegarse a las superficies y por tanto no genere turbulencias.

01.3 Efecto Magnus

En 1878 Lord Rayleigh, estudió el flujo alrededor de un cilindro. Él encontró que “si el cilindro está expuesto a un flujo uniforme paralelo o se mueve uniformemente a través de un fluido en reposo, se aplica el teorema de D’Alambert, y no hay fuerza que actúe sobre el cilindro. Pero la superposición de un flujo circulatorio sobre un flujo paralelo produce una fuerza perpendicular a la dirección del movimiento del cilindro.”

Este es el resultado que fue usado para explicar el efecto Magnus, previamente estudiado por el físico alemán Heinrich Gustav Magnus y que da nombre al fenómeno por el cual la rotación de un objeto afecta a la trayectoria del mismo a través de un fluido, en particular, del aire.

Si imaginamos un cilindro que gira en el sentido de las agujas del reloj, y que está colocado perpendicularmente a las líneas de corriente de un fluido en régimen laminar con velocidad constante; por efecto de la viscosidad, los elementos de un fluido que se encuentran en contacto con la superficie límite son arrastrados por el movimiento del giro del cilindro, de tal forma que en la parte superior del cilindro A el fluido aumentará su velocidad y en cambio, en la parte inferior en B su velocidad disminuirá tal como se ve en la figura:

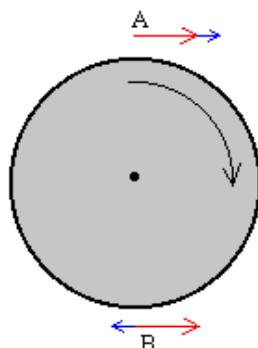


Figura 35: Efecto Magnus. <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/fluidos/dinamica/magnus/magnus.htm>.

De acuerdo con el principio de Bernoulli la presión en A será menor que en B. La resultante de todas las fuerzas que actúan sobre el cilindro debido a la presión del fluido es una fuerza vertical denominada sustentación que tiende a desplazar al cilindro en una dirección perpendicular a las líneas de corriente.

Este efecto es perjudicial en los vehículos, sobre todo en monoplazas ya que la carrocería no cubre los neumáticos que están completamente expuestos al aire y es un gran punto conflictivo donde se produce este fenómeno. También lo son los palieres que a causa de su rotación afecta a la trayectoria del flujo del aire, haciendo que el objetivo de hacer llegar ese flujo a las zonas posteriores del monoplaza como el difusor sea más complicado.

El efecto Magnus se utiliza en las pelotas de golf para alcanzar mayor distancia (junto con los hoyuelos que retrasan la separación de la capa límite, reduciendo la resistencia), o en el fútbol, que a lo largo de su historia, muchos futbolistas han conseguido goles que parecían imposibles gracias a la eficacia de este fenómeno.

Anexo II: Componentes aerodinámicos en vehículos

Como hemos dicho anteriormente, para conseguir buenos resultados aerodinámicos en los vehículos necesitamos minimizar al máximo la fuerza de resistencia al viento (drag) y conseguir la mayor fuerza de sustentación negativa posible (downforce) para poder pegar lo máximo posible la carrocería al asfalto.

Para ello, se han diseñado a lo largo de los años varios elementos aerodinámicos con el fin de mejorar las propiedades comentadas. Hay que tener en cuenta que, la mayoría de componentes aerodinámicos están basados en estudios de aeronaves que posteriormente se han llevado a la práctica en monoplazas de competición y por último, se han implementado en los coches de calle, como pueden ser, los alerones, splitters o difusores.

02.1 Alerones:

Los alerones son una parte muy importante de la aerodinámica de un vehículo. Básicamente tienen el perfil de un ala de avión colocada justamente al revés para poder conseguir mayor velocidad de flujo de aire en la parte inferior que en la superior que, aplicando de nuevo el principio de Bernoulli, nos proporcione una mayor presión arriba del alerón con respecto a la parte inferior creando así una depresión que haga aumentar la carga aerodinámica.

Hay que comentar, que un alerón puede ser capaz de crear mucha carga aerodinámica pero también produce resistencia aerodinámica. Se tiene que conseguir que el porcentaje de carga aerodinámica (downforce) sea mucho mayor que la resistencia aerodinámica (drag) que crea.

Hay varios tipos de alerones según nos convenga, de un sólo elemento, de dos, o de varios elementos.

En el alerón de un solo elemento, la carga aerodinámica que se produce en un vehículo es mayor cuanto mayor sea el ángulo de ataque de dicho flap hasta que se llega a un punto que se conoce como pérdida ya que hay desprendimiento de la capa límite.

El alerón de dos elementos, se usa cuando es necesaria una carga mayor que la que se dispone con uno de un solo elemento. Se compone de dos *flaps*⁽⁶⁾ normalmente colocados en la parte trasera del vehículo y tienen distinta inclinación.

(6) *FLAPS: Superficies de las cuales se compone un alerón que tiene el efecto contrario a los de un avión, es decir, se centran en crear fuerza de antisustentación, dicho de otra manera, carga aerodinámica. A su vez, están expuestos al flujo de viento y crean resistencia aerodinámica. Es por eso, que muchos de ellos, cuentan con un sistema de accionamiento el cual permite modificar la posición de los flaps según necesidades.*

De un solo elemento:

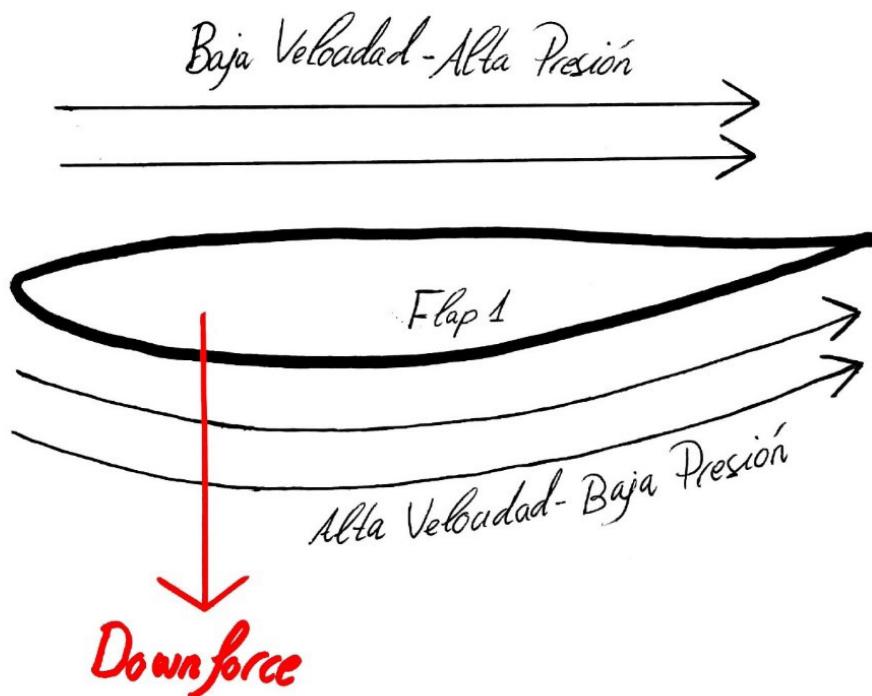


Figura 36: Boceto propio. Alerón 1.

De dos elementos:

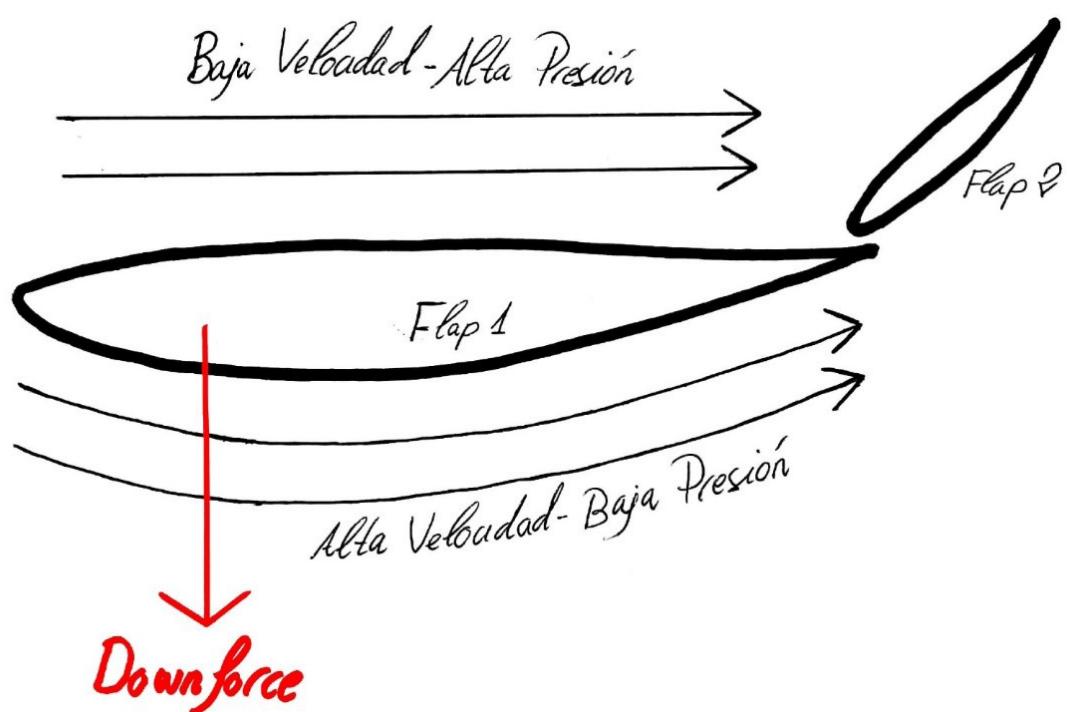


Figura 37: Boceto propio. Alerón 2.

02.2 Difusores:

El difusor es una zona del fondo del coche situada en la parte posterior, justo en el eje trasero, que permite que los gases se expandan y maximicen el efecto suelo.

El objetivo es el de acelerar el flujo de aire que circula por debajo del coche para crear una zona de baja presión y así generar carga aerodinámica (downforce).

El aire que pasa por debajo del coche tiene una presión inferior a la atmosférica y sufre una expansión causada por el difusor, es decir, al paso por el difusor, el flujo de aire sufre una disminución progresiva de velocidad a la vez que un aumento de presión. Lo que nos permite es, que durante todo el recorrido hasta el inicio del difusor creamos mucha carga aerodinámica.

Además de crear carga aerodinámica, si este aire a baja presión fuera extraído directamente al exterior, que se encuentra a presión ambiental, se generarían turbulencias que aumentarían las fuerzas de resistencia al avance del coche. Por ello, se disponen de una serie de láminas en el difusor para que el aire pueda ser extraído de la parte baja del vehículo de la forma más ordenada posible. Por tanto, el difusor tiene una doble función que a su vez es doblemente ventajoso, por un lado, creamos carga aerodinámica y por otro reducimos la resistencia al avance.

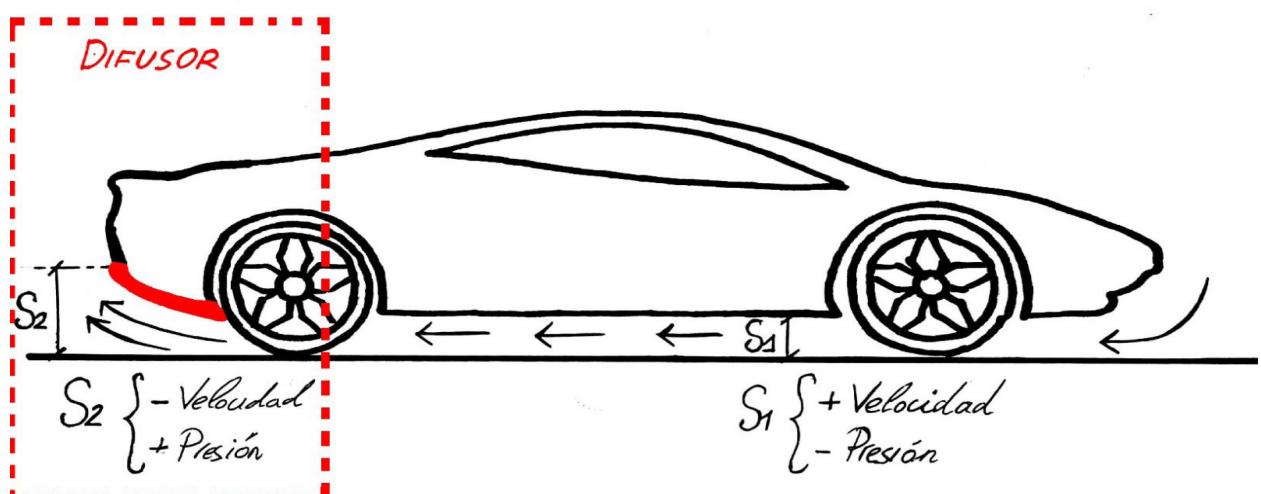


Figura 38: Boceto propio. Vehículo con difusor.



Figura 39: Difusor. <https://alldesign.es/store/exterior/difusor-trasero-bmw>.

02.3 Splitter:

El splitter es un componente aerodinámico esencial que sirven para equilibrar la distribución delantera de carga aerodinámica frente a la trasera. Este elemento se encuentra típicamente en la parte frontal de un coche y aparece como una extensión plana en la parte inferior del parachoques si hablamos de un turismo.

La finalidad de este elemento no es más que la formación de una diferencia de presión de aire entre la región superior y la inferior del mismo cuando el coche se desplaza.

Sin embargo, el splitter en sí mismo no se encarga de crear carga aerodinámica. Lo que realmente hace este elemento es aumentar el área sobre la cual, las altas presiones pueden acumularse. Cuanto más alta sea esta presión, más baja será por debajo del divisor, por lo que habrá más diferencia de presión, por tanto, más carga aerodinámica.

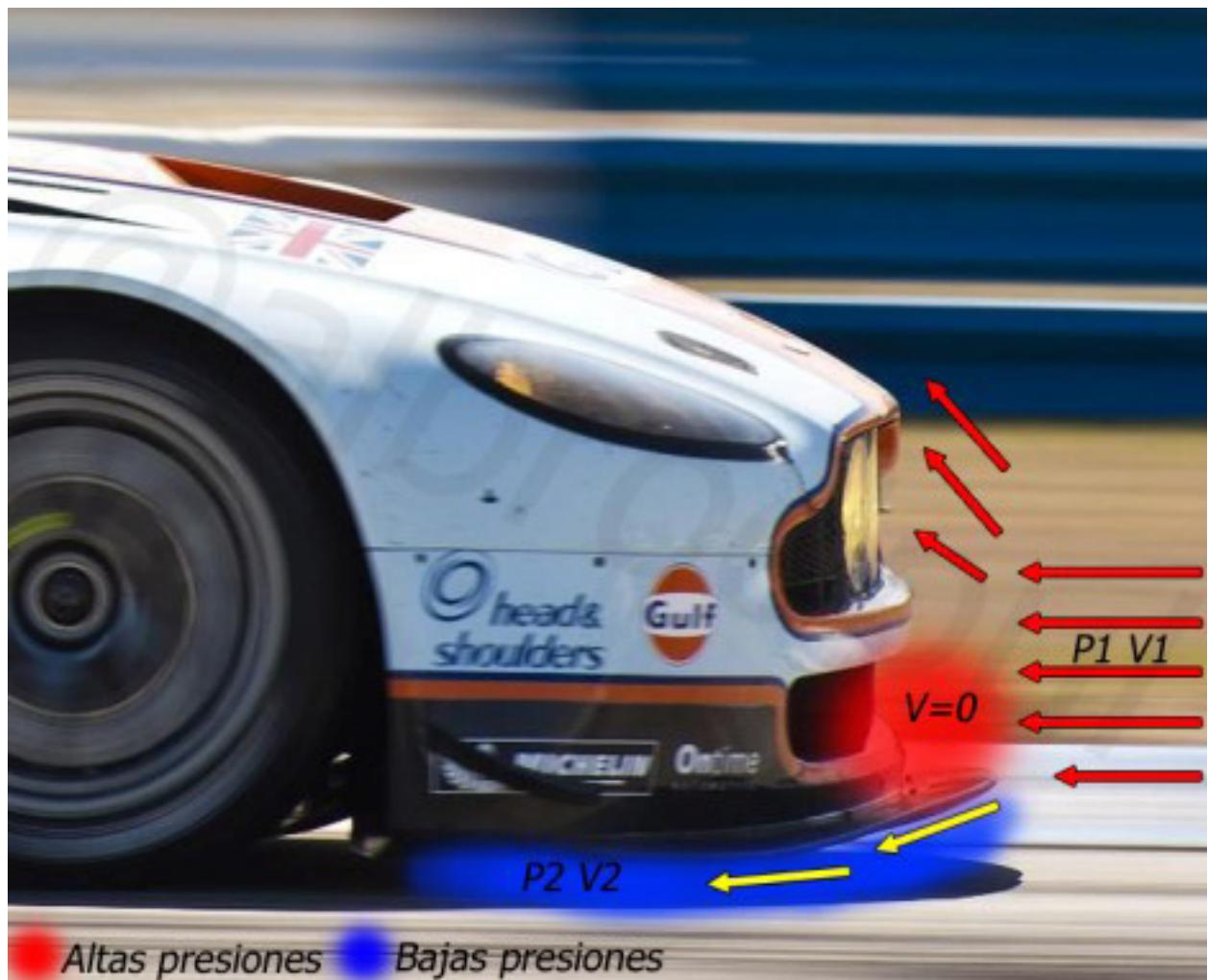


Figura 40: Splitter. <https://albrodpulf1.wordpress.com/2015/03/08/analisis-tecnico-splitter/>.

Cuanto más cercano esté el coche al suelo en este punto, mayor será la succión (efecto suelo), por lo que el splitter suele colocarse en el punto más bajo posible.

Sin embargo, si el divisor se sitúa demasiado cerca del suelo, se estancará y no formará carga aerodinámica, sino resistencia. Esto se debe a que el aire no es capaz de moverse en la parte inferior de dicho componente, de forma que la velocidad del flujo que logre cruzar disminuirá, aumentando la presión.

Por este motivo, podemos comprobar cómo la altura en esta región es muy sensible a cambios, ya que el objetivo es maximizar esta velocidad sin llegar a perder el efecto deseado. Con el fin de eliminar esta sensibilidad, se emplean distintas alturas en el splitter.



Figura 41: Splitter. <https://configurator.mercedes-benz-accessories.com/Splitter-Delantero>.

02.4 Fondo plano:

El fondo plano (junto con el difusor) es el elemento con mayor eficiencia aerodinámica, es decir, es el componente que más carga aerodinámica crea en relación con la resistencia al viento que provoca. Esto es así porque se trata en su mayor parte de geometrías muy planas y lisas y están muy cerca del suelo con lo que es fácil crear una superficie con muy poca presión y alta velocidad de flujo.

Para que el fondo plano sea capaz de generar downforce, su borde de ataque (borde más adelantado) debe ser la parte más baja del vehículo. A partir de ahí, según vamos recorriendo el vehículo hacia atrás, la distancia entre el fondo plano y el suelo debe ir aumentando poco a poco, hasta llegar al difusor. Esto es lo que se conoce como *rake*⁽⁷⁾. En resumen, si la parte delantera del fondo plano está más cerca del suelo que su parte final, se generará downforce. Sin embargo, esta transición en la altura debe ser muy suave, formando un ángulo de alrededor de 1 o 2 grados, para evitar el despegue de la capa límite.

Una de las cosas a evitar, es que el aire que circula a los lados del monoplaza o vehículo se introduzca bajo el fondo plano, lo que nos haría perder carga aerodinámica.

Hay que entender, que el fondo plano y el difusor de un vehículo son totalmente complementarios, es decir, sin el difusor, sería imposible que funcionase el fondo plano ya que la diferencia de presiones sería demasiado alta. Es por eso, que necesitamos esa transición progresiva que genera el difusor, consiguiendo cambiar las propiedades del fluido. En la parte inicial del fondo plano tenemos un flujo a velocidad muy alta y baja presión, en cambio, en la parte trasera del vehículo y gracias al *rake* del fondo plano y el propio difusor, tendremos un flujo prácticamente a presión atmosférica y a una considerable menor velocidad.

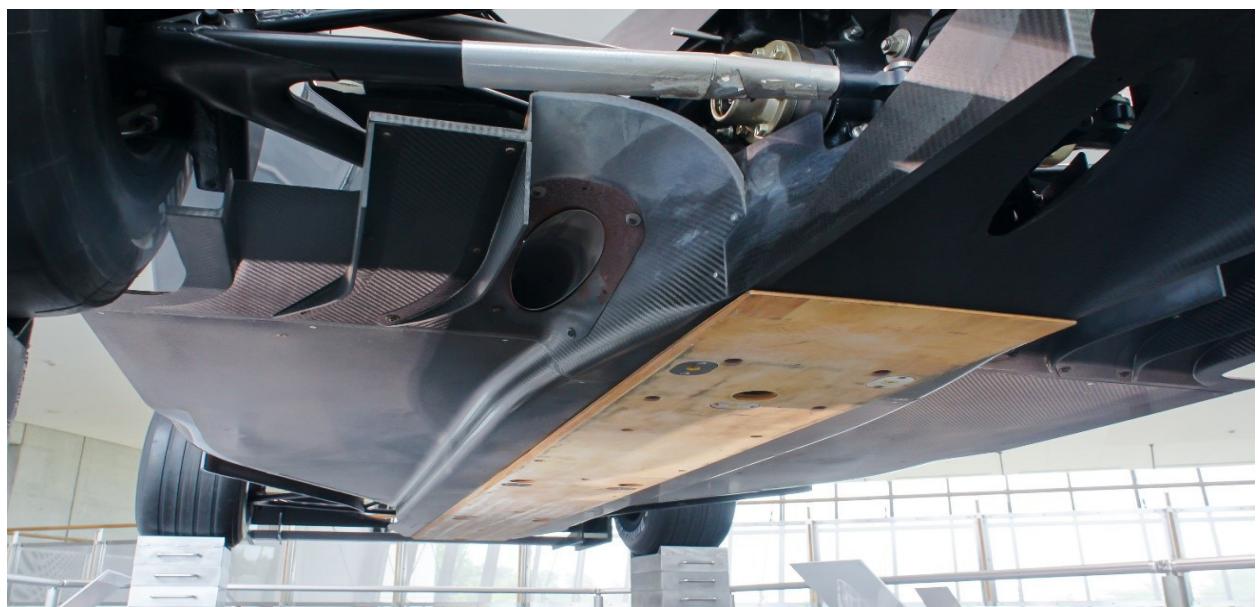


Figura 42: Fondo plano Honda RC F1. <https://www.formula1atmosphere.com/fondo-plano/>.

(7) RAKE: Concepto aerodinámico el cual consiste en dar un cierto ángulo al fondo plano de un vehículo respecto al asfalto, es decir, que se produzca una inclinación con respecto a ambos ejes del coche, estando al eje trasero más alto que el delantero.



Figura 43: Fondo Plano F1 HRT. <https://www.mercadoracing.org/9/614377/fondo-plano-f1-hrt.html>.

Anexo III: Resultados numéricos de las simulaciones

A continuación, se presentarán todos los resultados numéricos obtenidos de las simulaciones realizadas para las distintas velocidades a las que viaja el vehículo con el fin de observar de una forma más detallada para cada una de las simulaciones los resultados que se han obtenido y explicado en el capítulo V de la memoria.

Simulación 1: Vehículo viajando a una velocidad de 30 km/h.

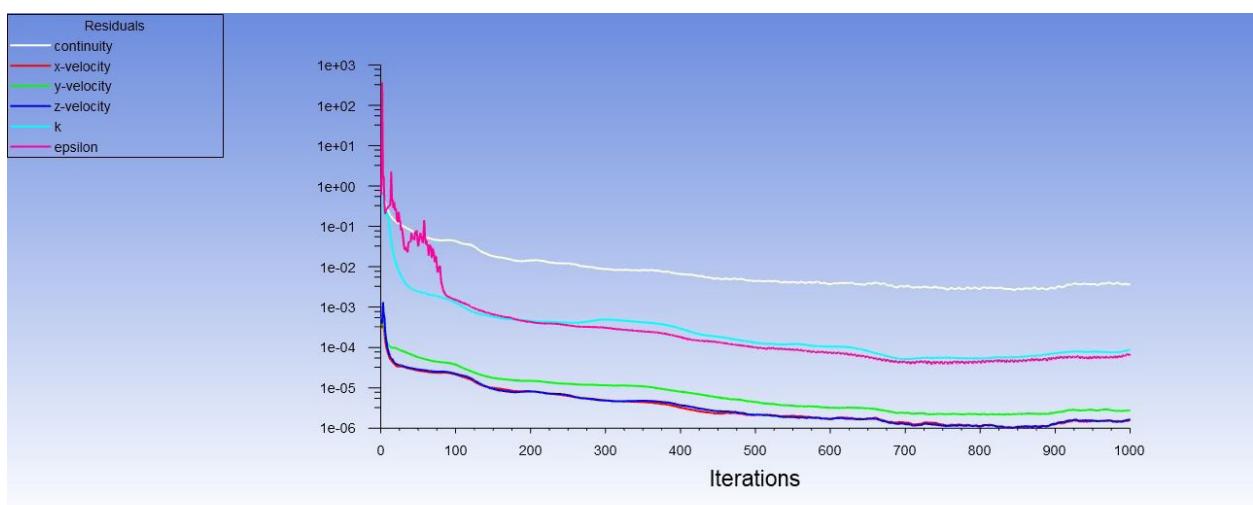


Figura 44: Evolución de la convergencia de las ecuaciones en las simulaciones. Velocidad 30 km/h.

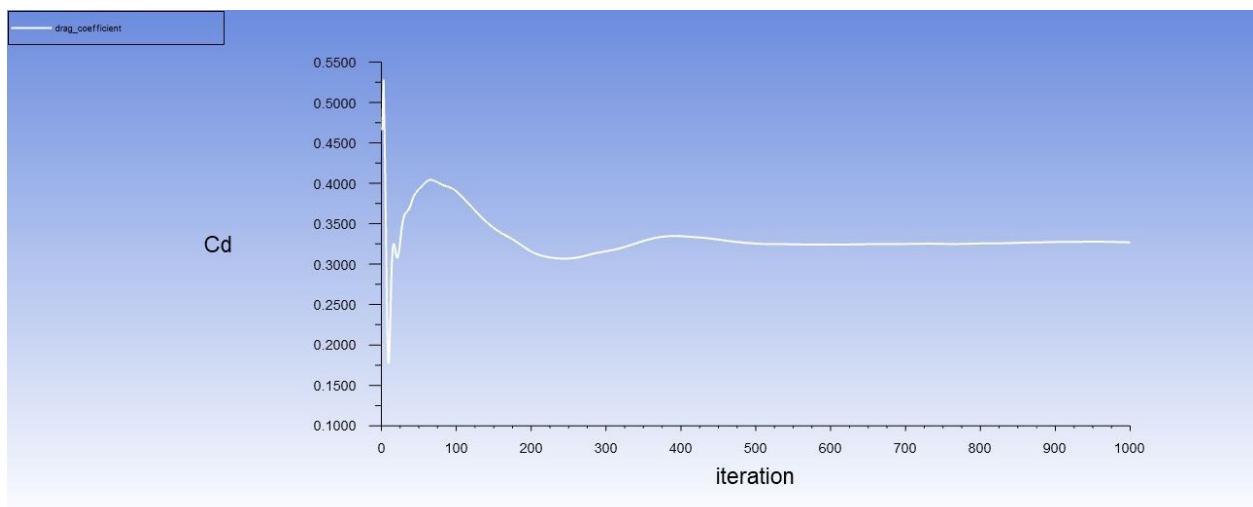


Figura 45: Evolución coeficiente de arrastre. Velocidad 30 km/h. Ansys-Fluent.

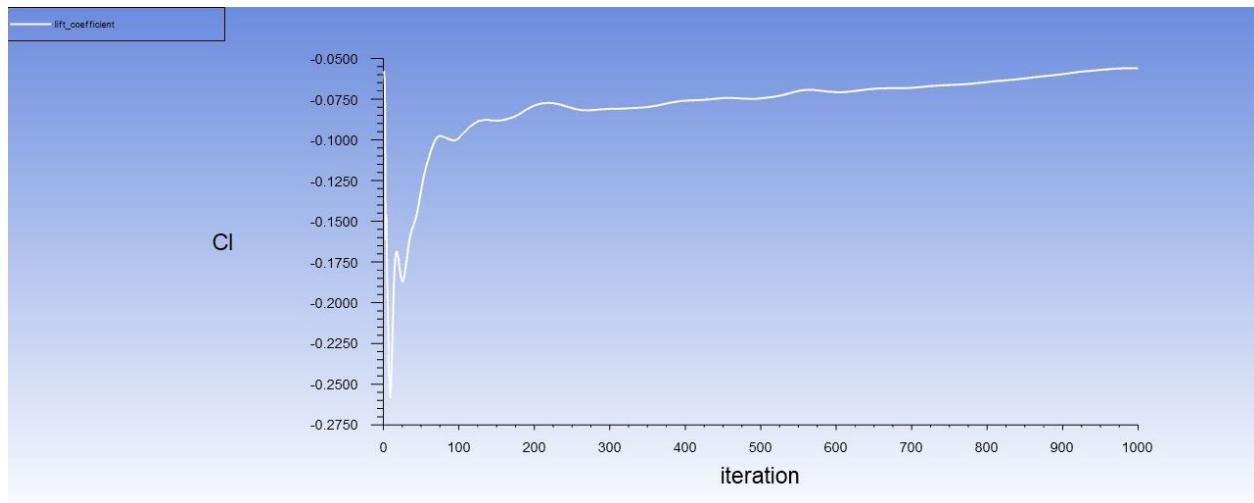


Figura 46: Evolución coeficiente de sustentación. Velocidad 30 km/h. Ansys-Fluent.

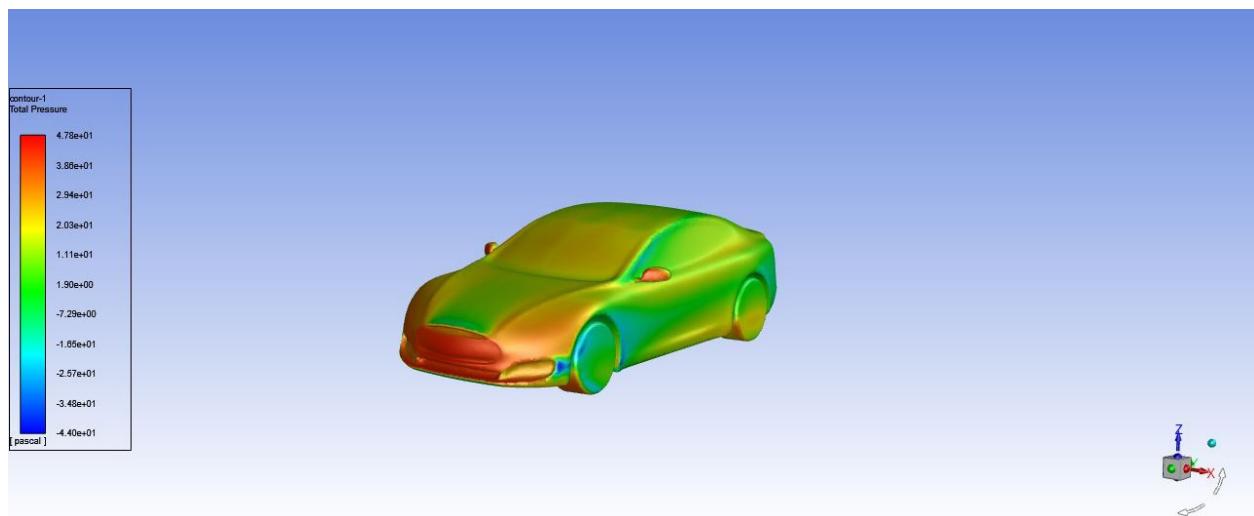


Figura 47: Vista isométrica presión total. Velocidad 30 km/h. Ansys-Fluent.

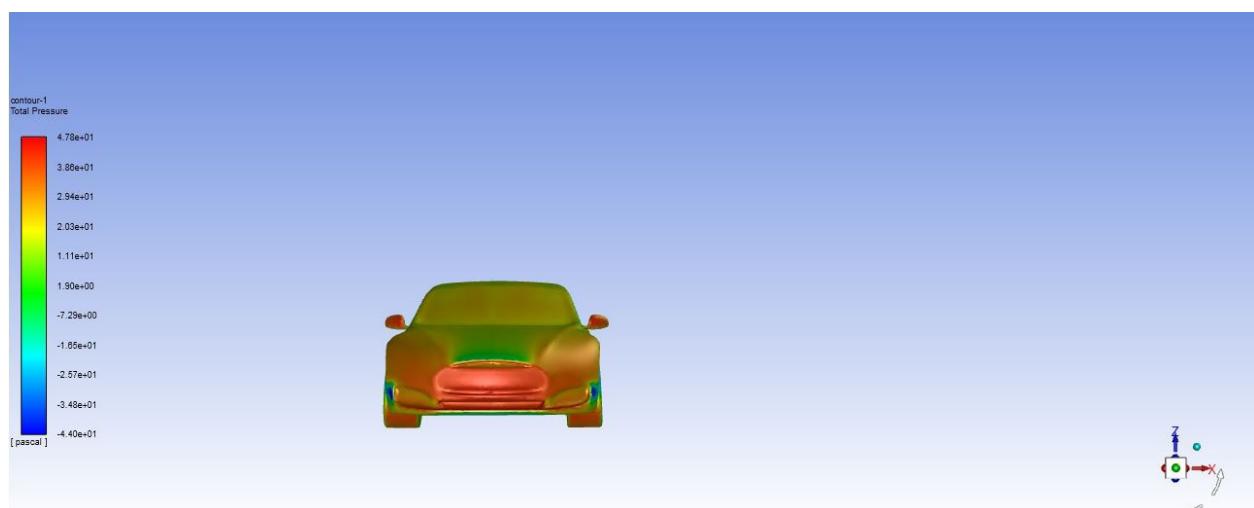


Figura 48: Vista frontal presión total. Velocidad 30 km/h. Ansys-Fluent.

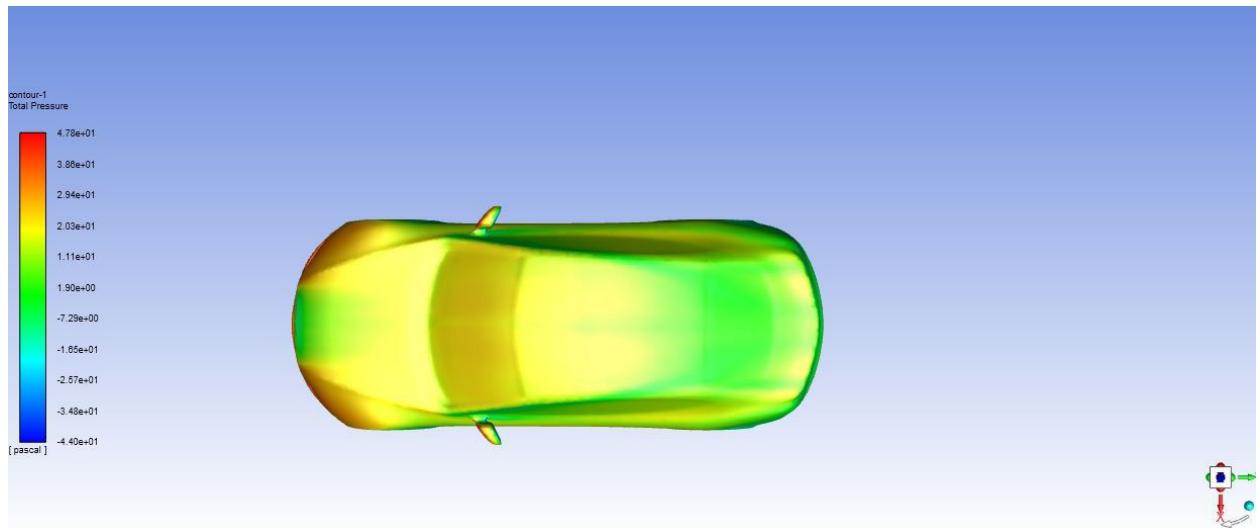


Figura 49: Vista cenital presión total. Velocidad 30 km/h. Ansys-Fluent.

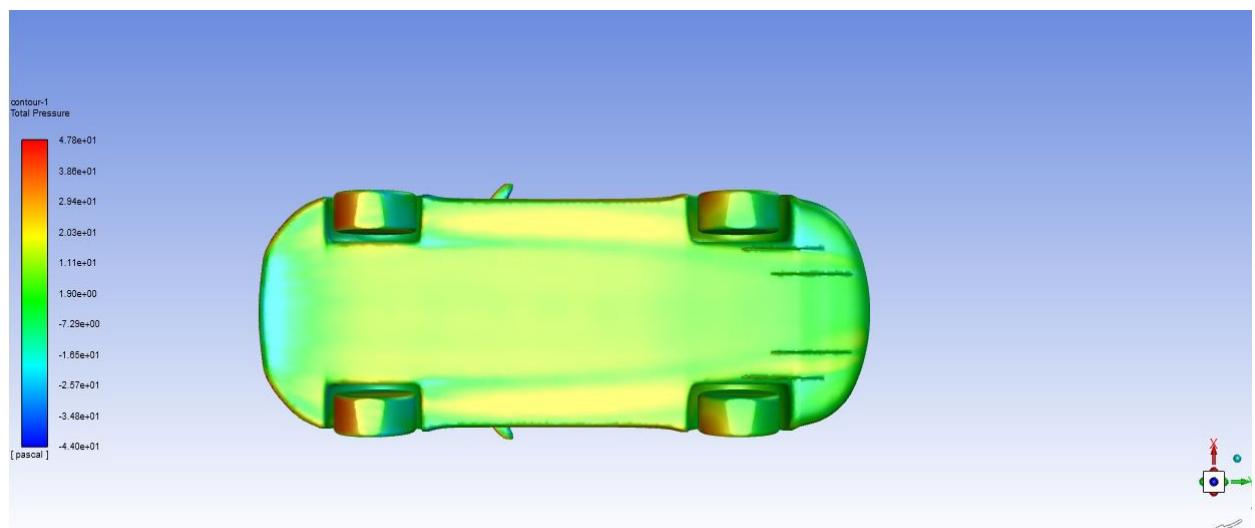


Figura 50: Vista inferior presión total. Velocidad 30 km/h. Ansys-Fluent.

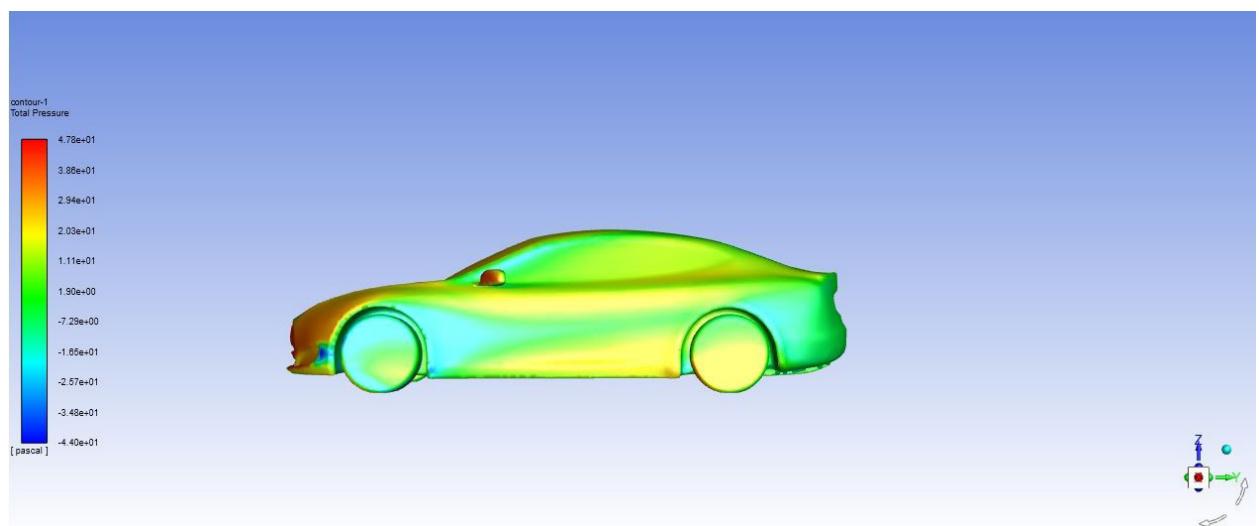


Figura 51: Vista lateral presión total. Velocidad 30 km/h. Ansys-Fluent.

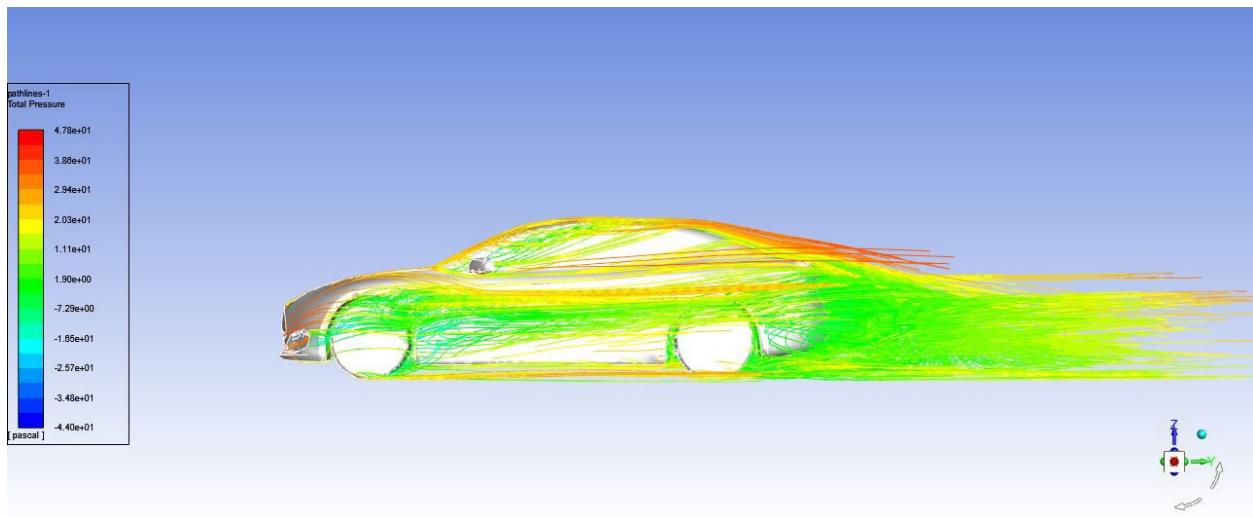


Figura 52: Vista lateral líneas de corriente. E.c presión total. Velocidad 30 km/h. Ansys-Fluent.

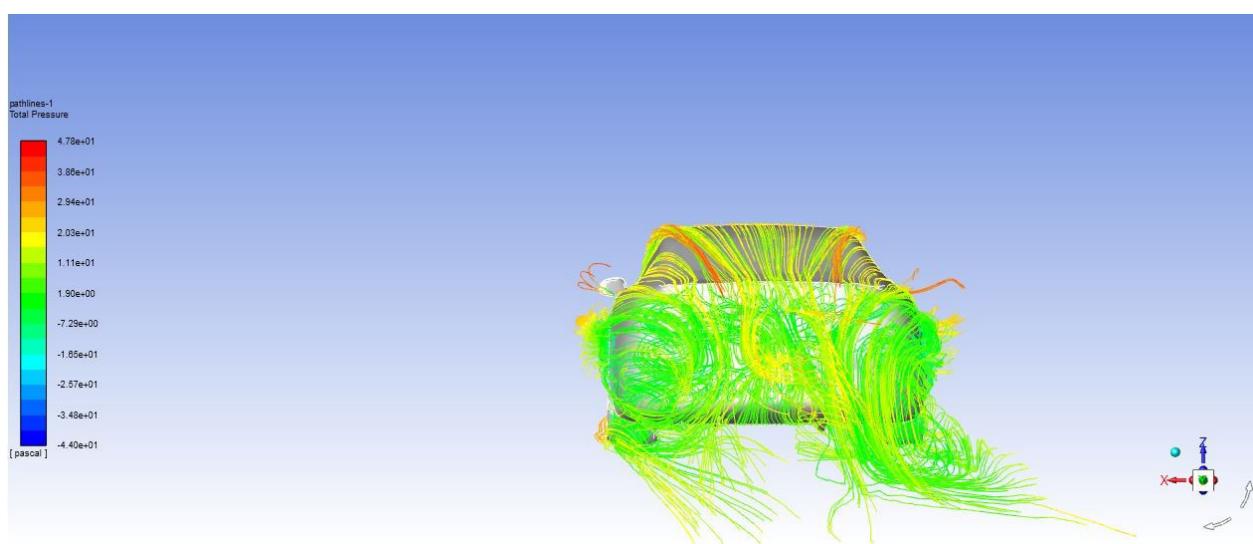


Figura 53: Vista posterior líneas de corriente. E.c presión total. Velocidad 30 km/h. Ansys-Fluent.

Simulación 2: Vehículo viajando a una velocidad de 50 km/h.

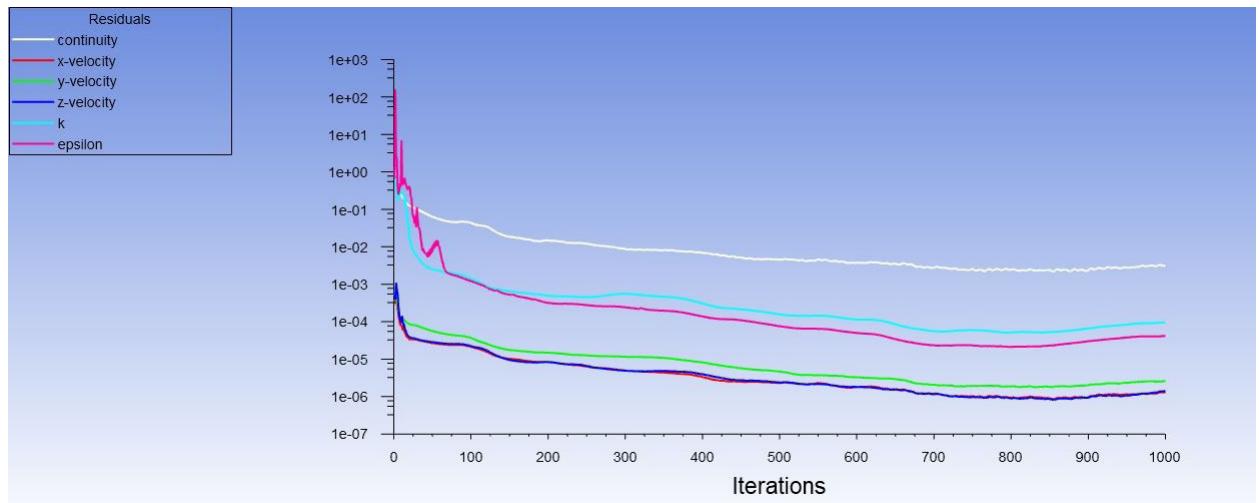


Figura 54: Evolución de la convergencia de las ecuaciones en las simulaciones. Velocidad 50 km/h.

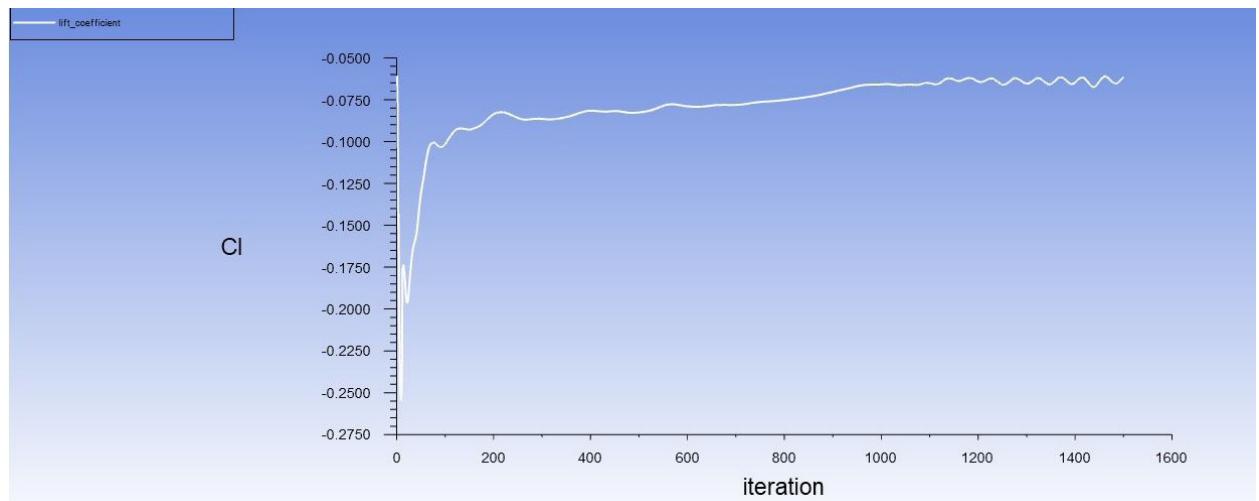


Figura 55: Evolución coeficiente de sustentación. Velocidad 50 km/h. Ansys-Fluent.

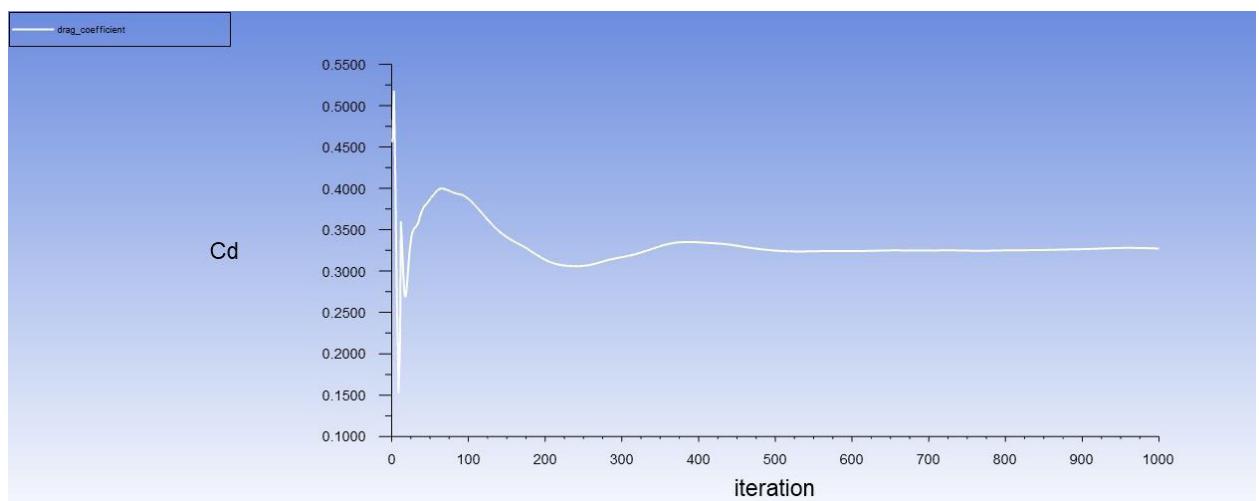


Figura 56: Evolución coeficiente de arrastre. Velocidad 50 km/h. Ansys-Fluent.

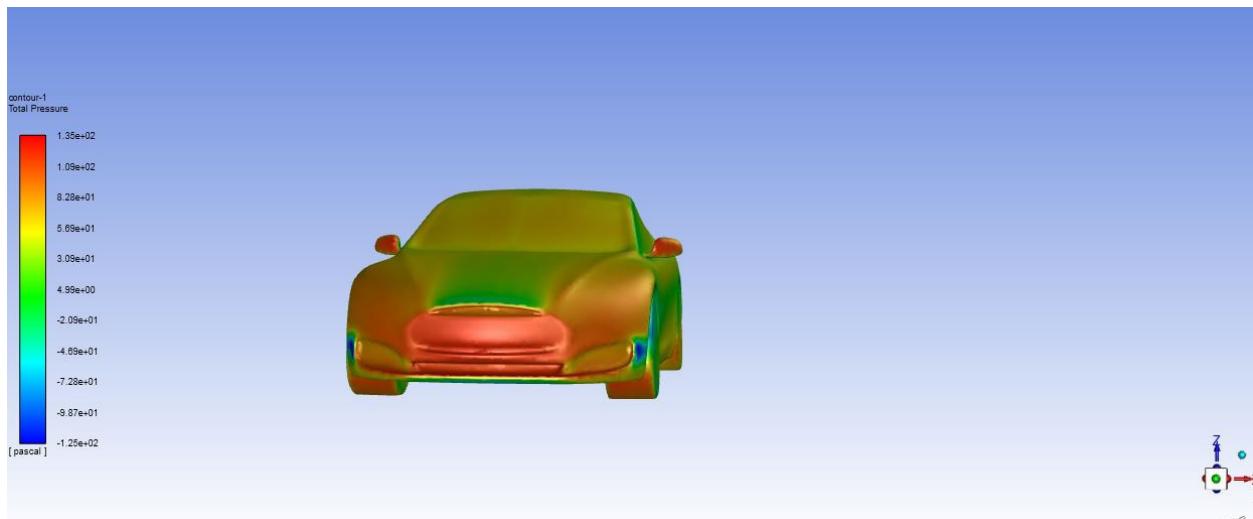


Figura 57: Vista frontal presión total. Velocidad 50 km/h. Ansys-Fluent.

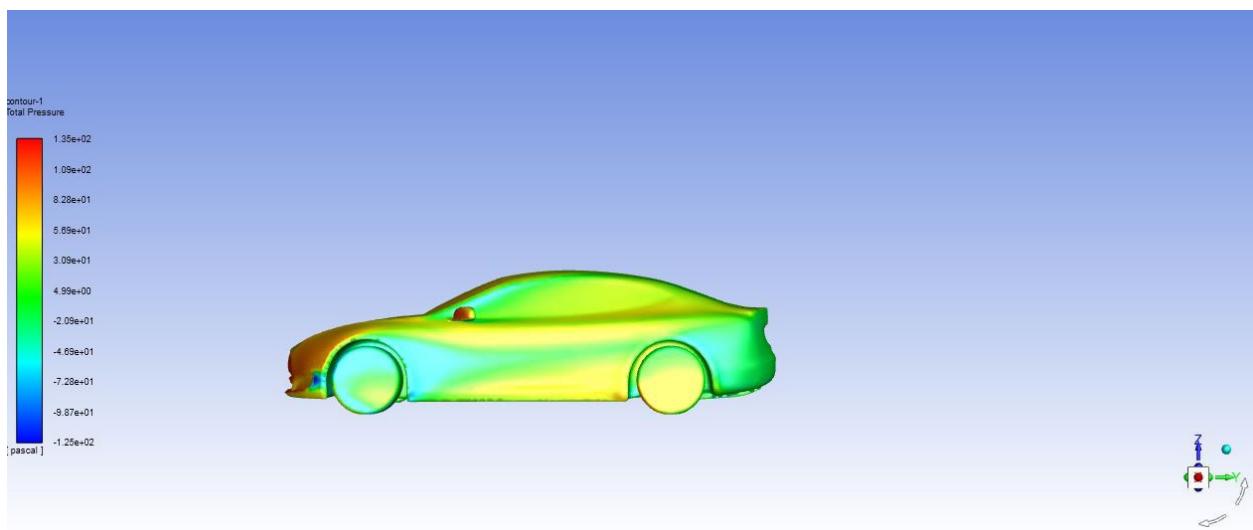


Figura 58: Vista lateral presión total. Velocidad 50 km/h. Ansys-Fluent.

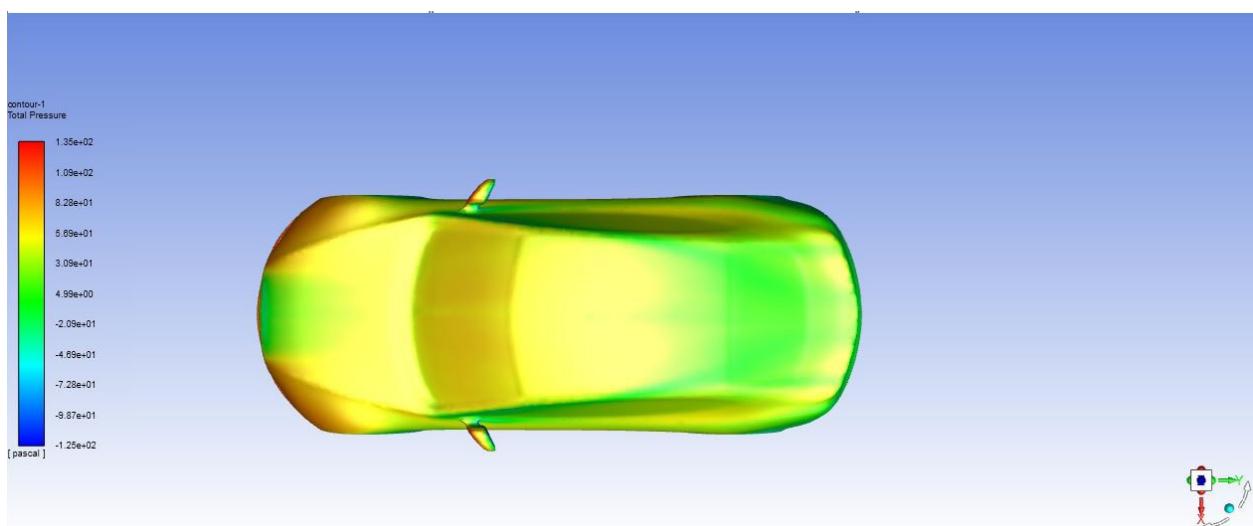


Figura 59: Vista cenital presión total. Velocidad 50 km/h. Ansys-Fluent.

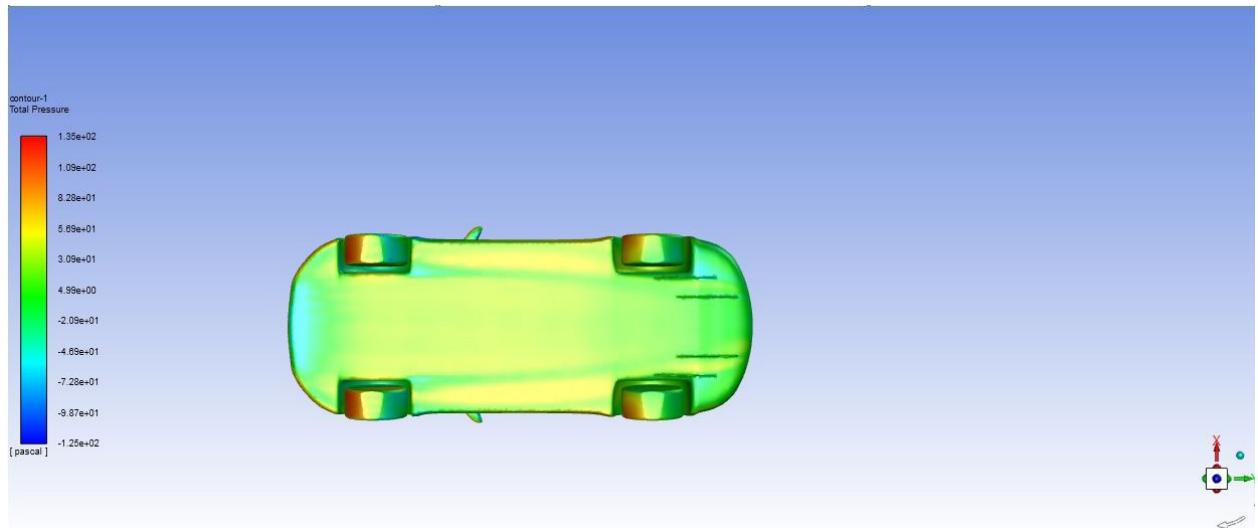


Figura 60: Vista inferior presión total. Velocidad 50 km/h. Ansys-Fluent.

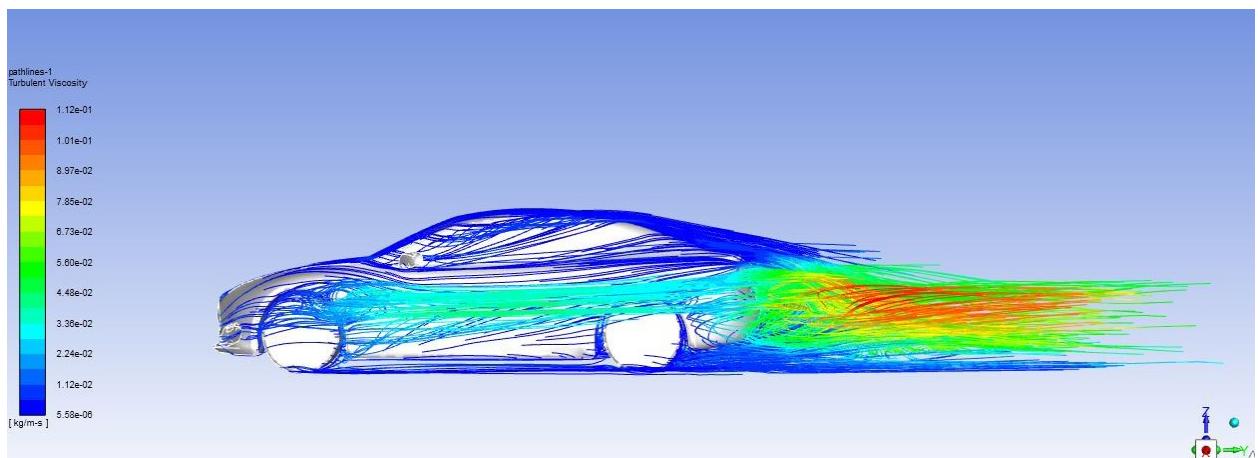


Figura 61: Vista lateral líneas de corriente. E.c turbulencias. Velocidad 50 km/h. Ansys-Fluent.

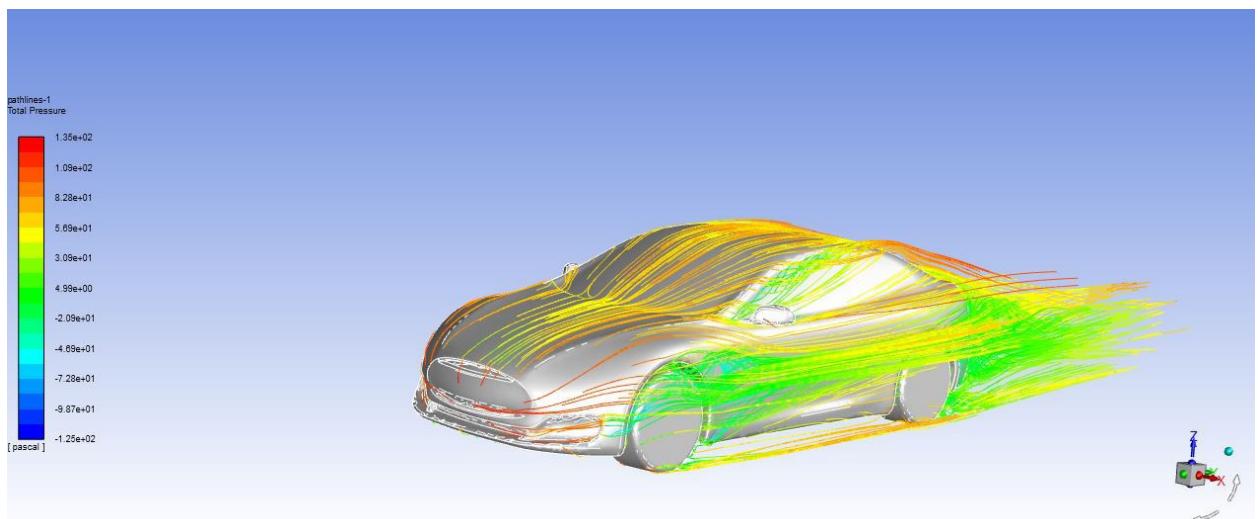


Figura 62: Vista isométrica líneas de corriente. E.c presión total. Velocidad 50 km/h. Ansys - Fluent.

Simulación 3: Vehículo viajando a una velocidad de 120 km/h.

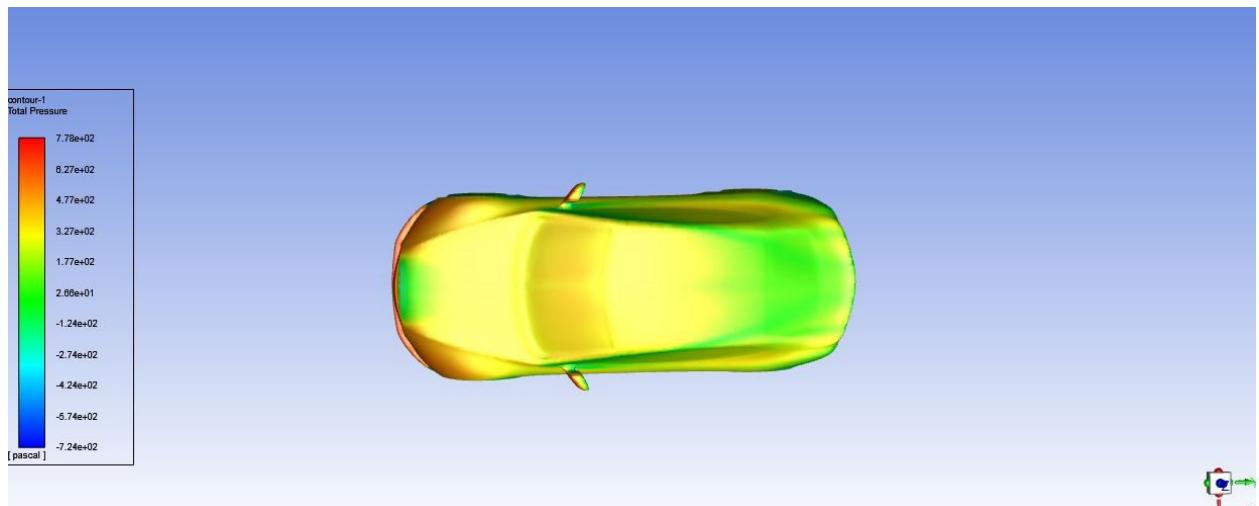


Figura 63: Vista cenital presión total. Velocidad 120 km/h. Ansys-Fluent.

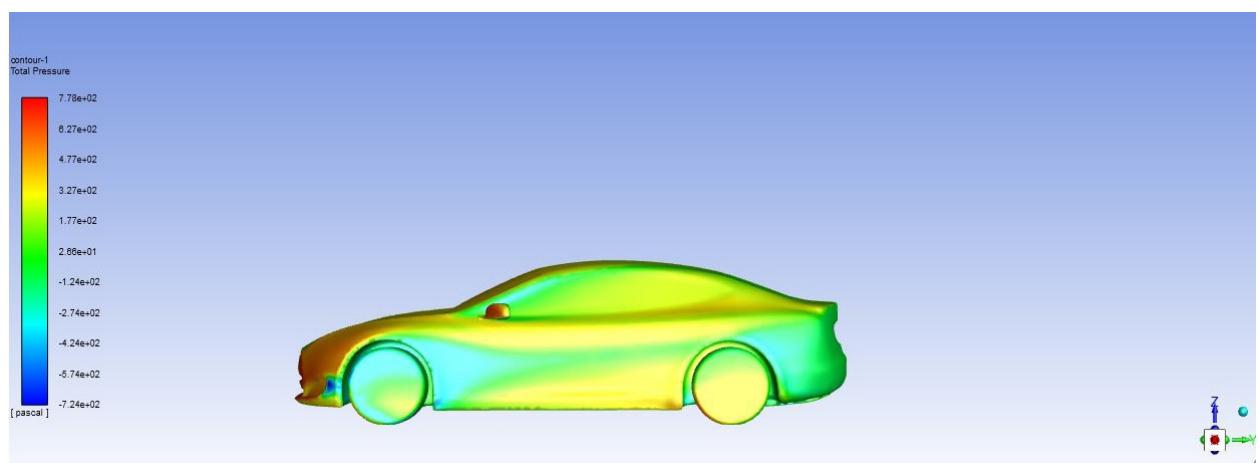


Figura 64: Vista lateral presión total. Velocidad 120 km/h. Ansys-Fluent.

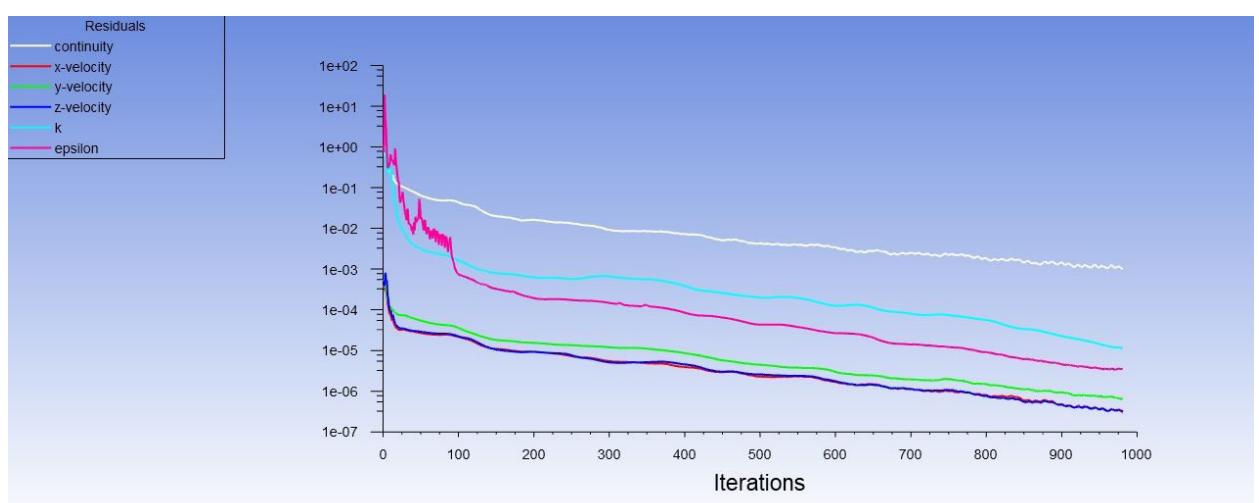


Figura 65: Evolución de la convergencia de las ecuaciones en las simulaciones. Velocidad 120 km/h.

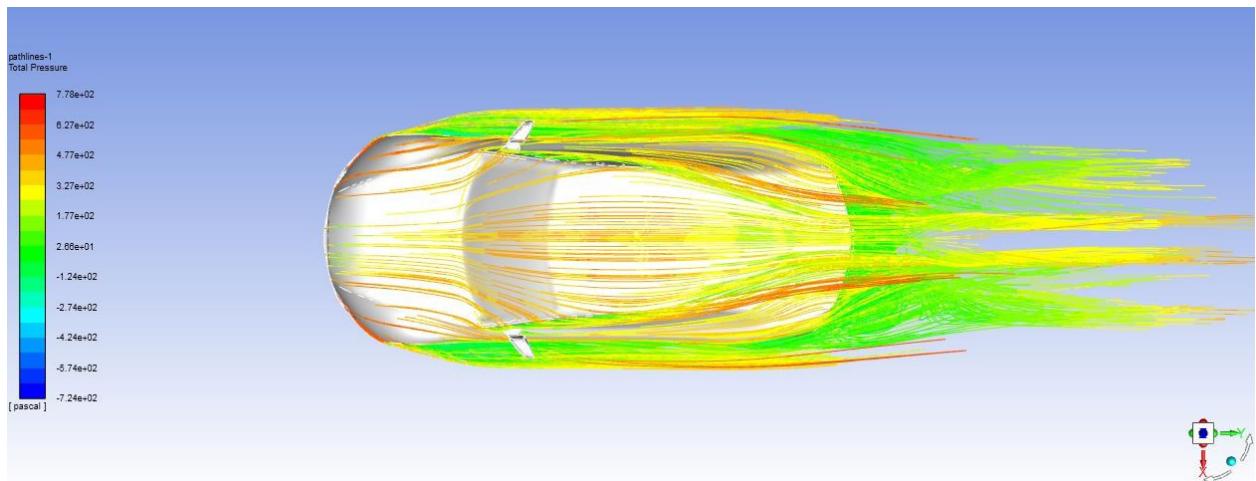


Figura 66: Vista cenital líneas de corriente. E.c presión total. Velocidad 120 km/h. Ansys-Fluent.

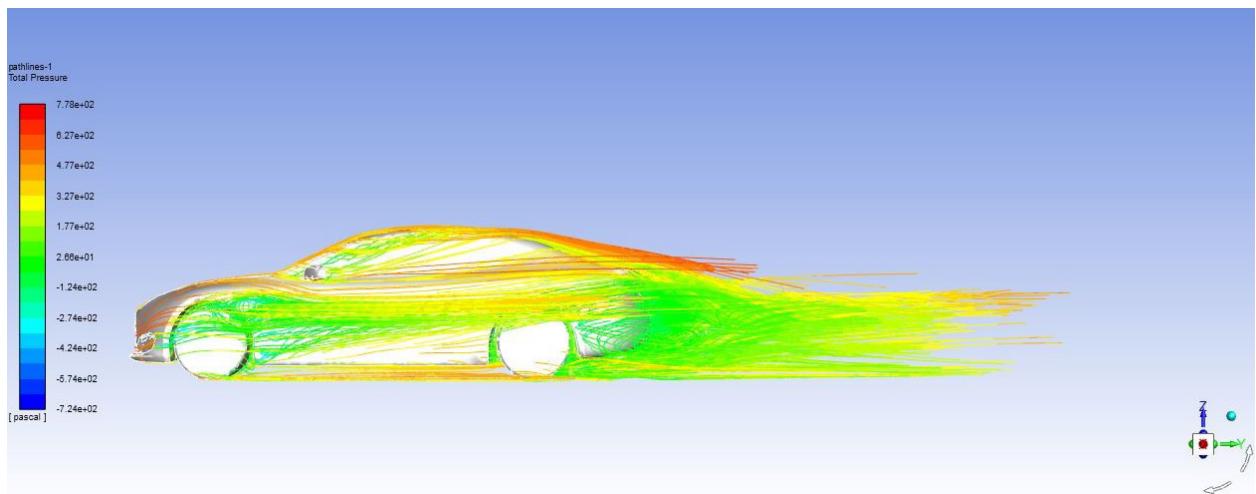


Figura 67: Vista lateral líneas de corriente. E.c presión total. Velocidad 120 km/h. Ansys-Fluent.

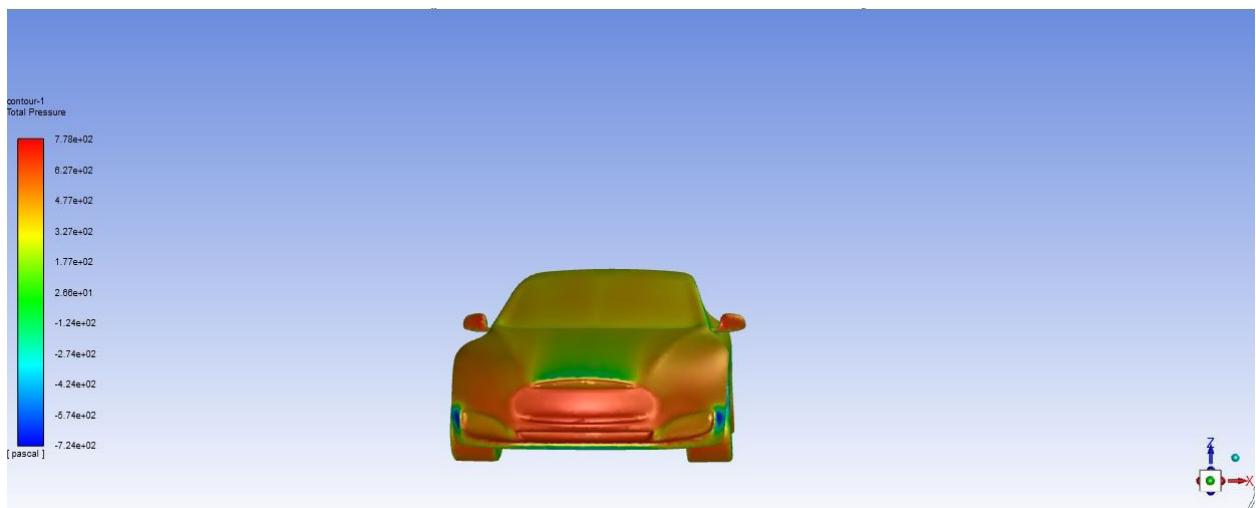


Figura 68: Vista frontal presión total. Velocidad 120 km/h. Ansys-Fluent.

Simulación 4: Vehículo viajando a una velocidad de 200 km/h.

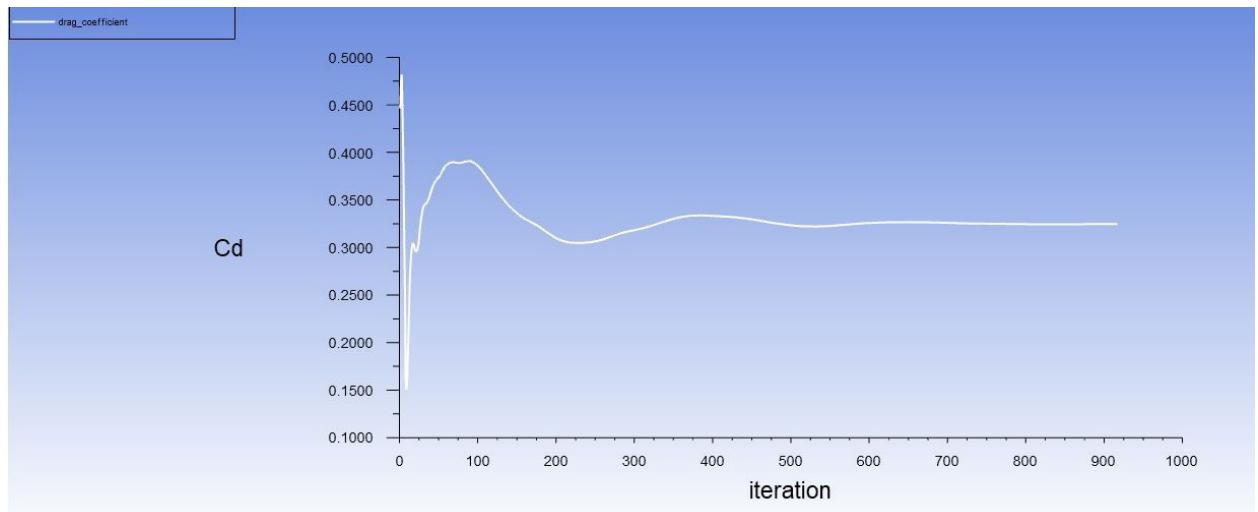


Figura 69: Evolución coeficiente de arrastre. Velocidad 200 km/h. Ansys-Fluent.

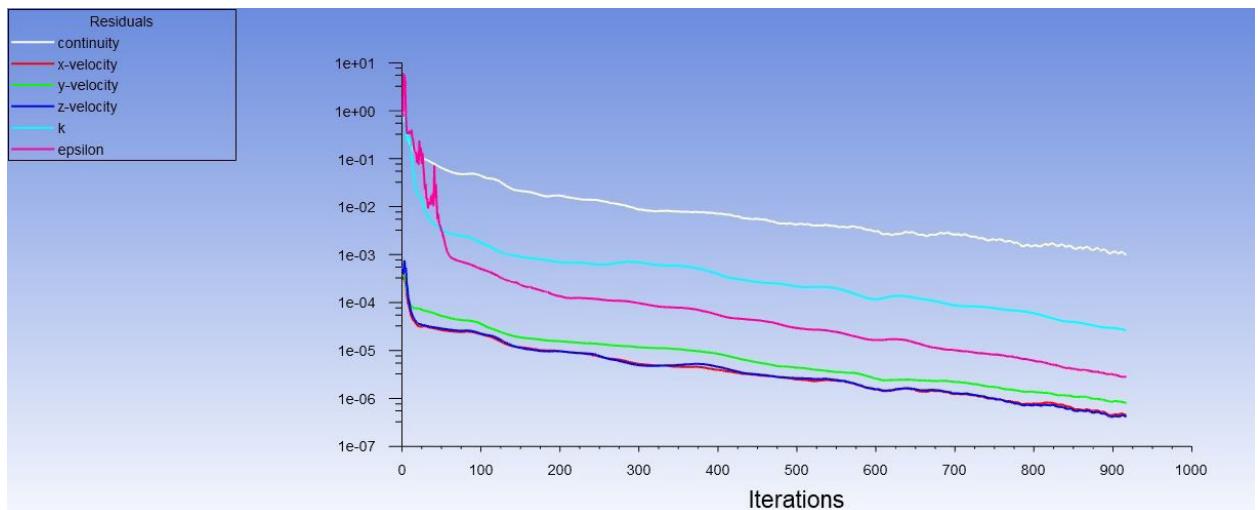


Figura 70: Evolución de la convergencia de las ecuaciones en las simulaciones. Velocidad 200 km/h.

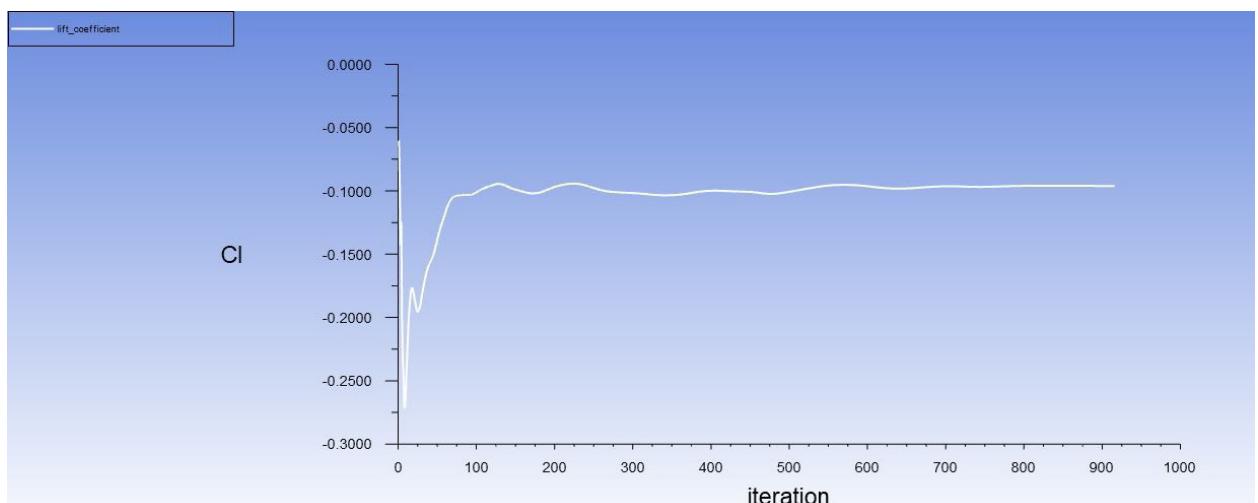


Figura 71: Evolución coeficiente de sustentación. Velocidad 200 km/h. Ansys-Fluent.

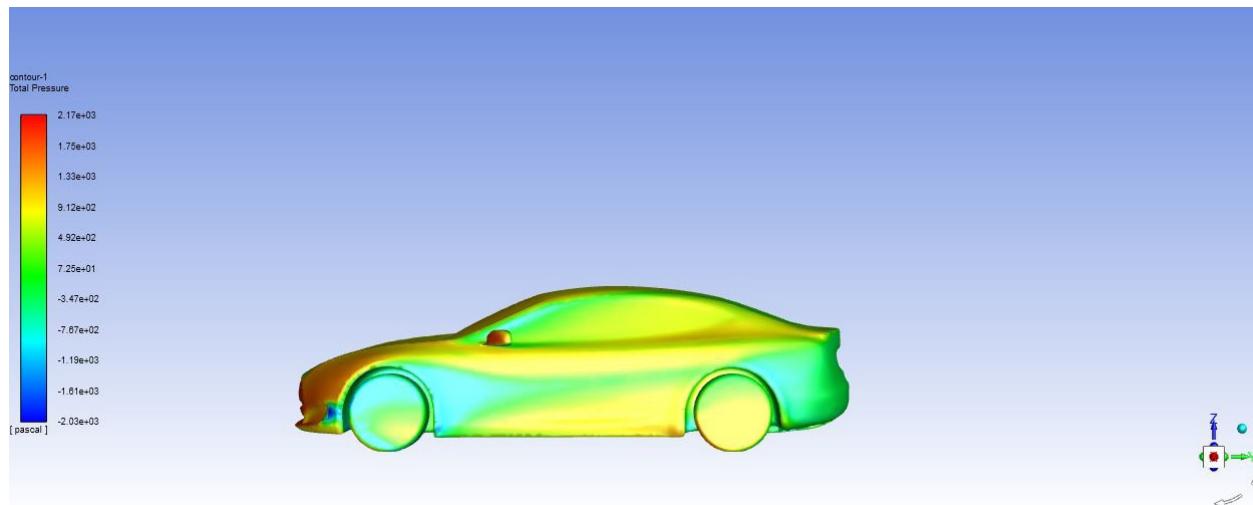


Figura 72: Vista lateral presión total. Velocidad 200 km/h. Ansys-Fluent.

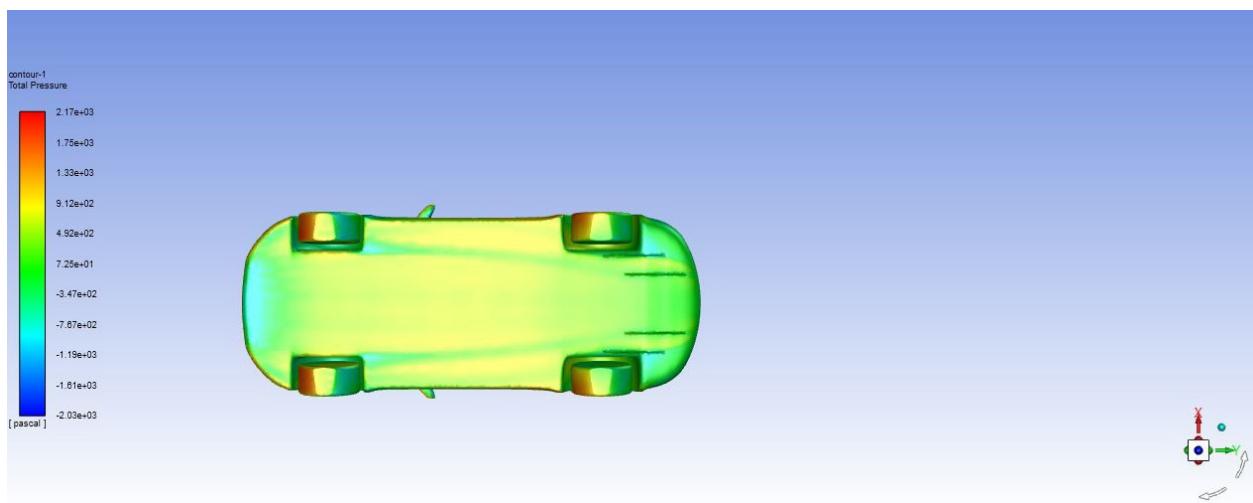


Figura 73: Vista inferior presión total. Velocidad 200 km/h. Ansys-Fluent.

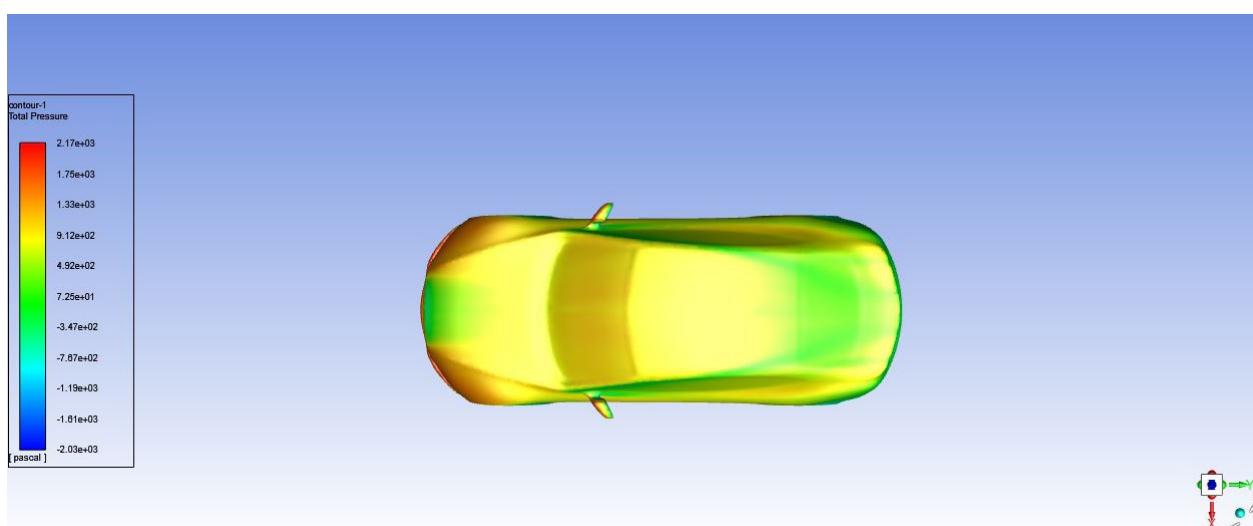


Figura 74: Vista cenital presión total. Velocidad 200 km/h. Ansys-Fluent.

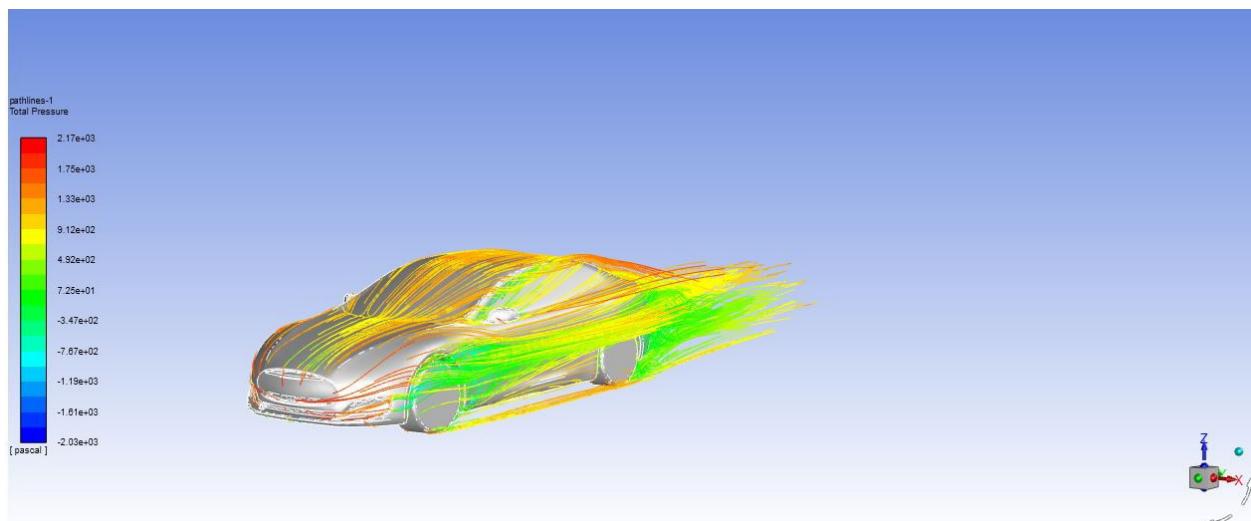


Figura 75: Vista isométrica líneas de corriente. E.c presión total. Velocidad 200 km/h. Ansys-Fluent.

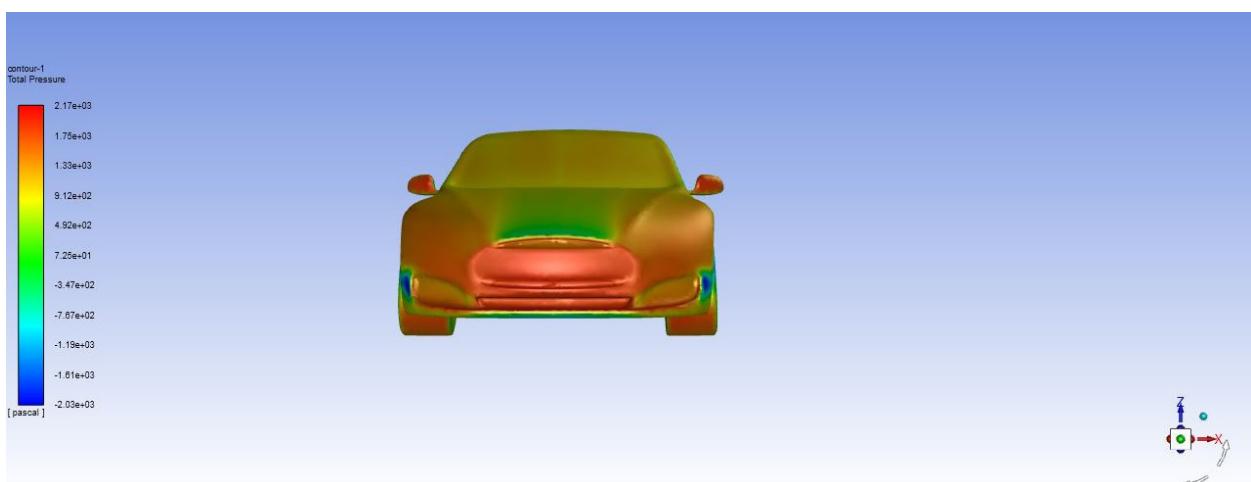


Figura 76: Vista frontal presión total. Velocidad 200 km/h. Ansys-Fluent.

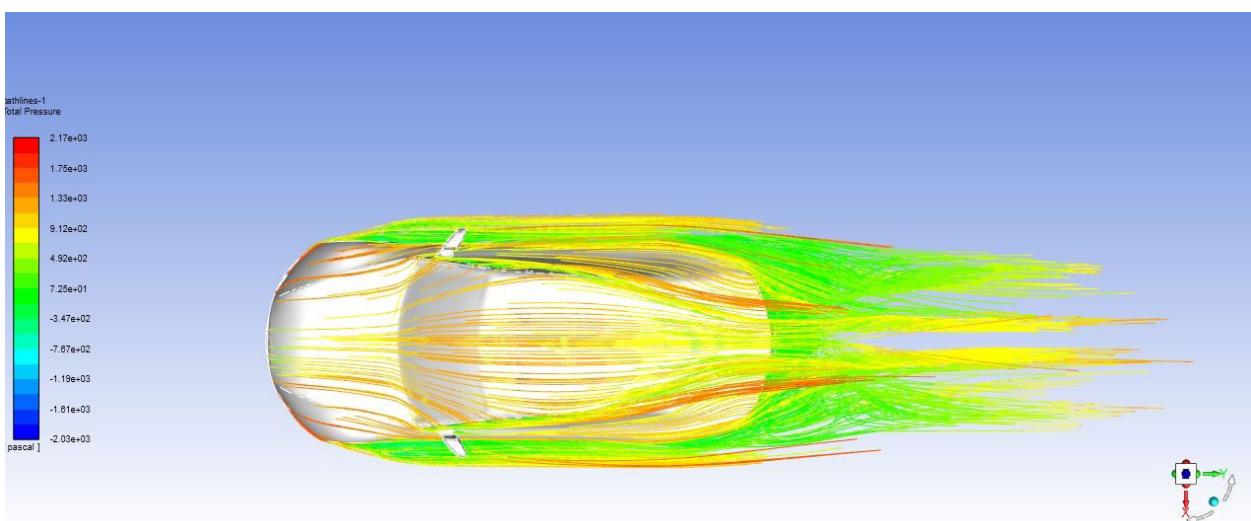


Figura 77: Vista cenital líneas de corriente. E.c presión total. Velocidad 200 km/h. Ansys-Fluent.

Simulación 5: Vehículo viajando a una velocidad de 260 km/h.

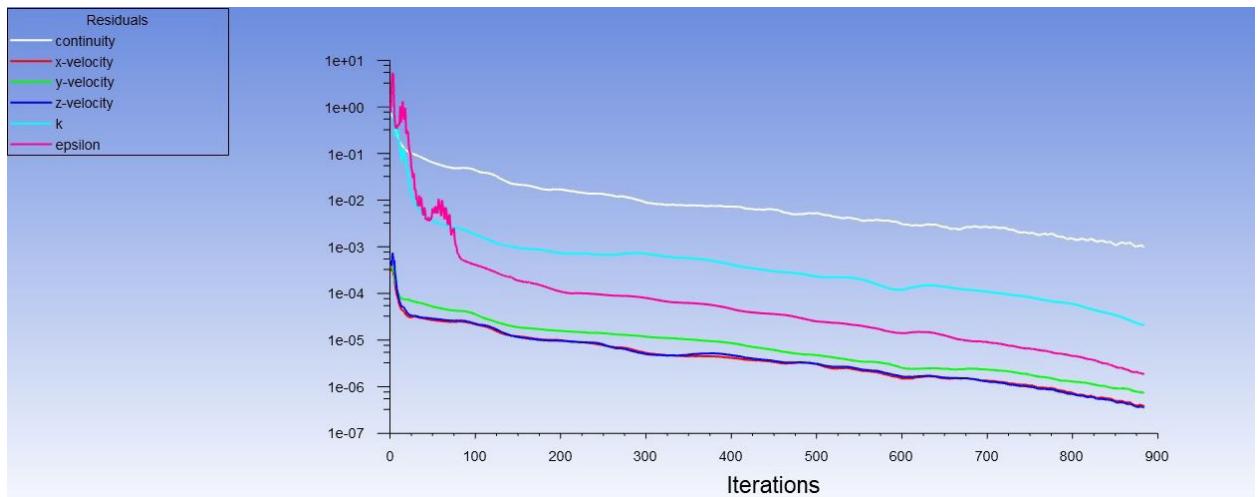


Figura 78: Evolución de la convergencia de las ecuaciones en las simulaciones. Velocidad 260 km/h.

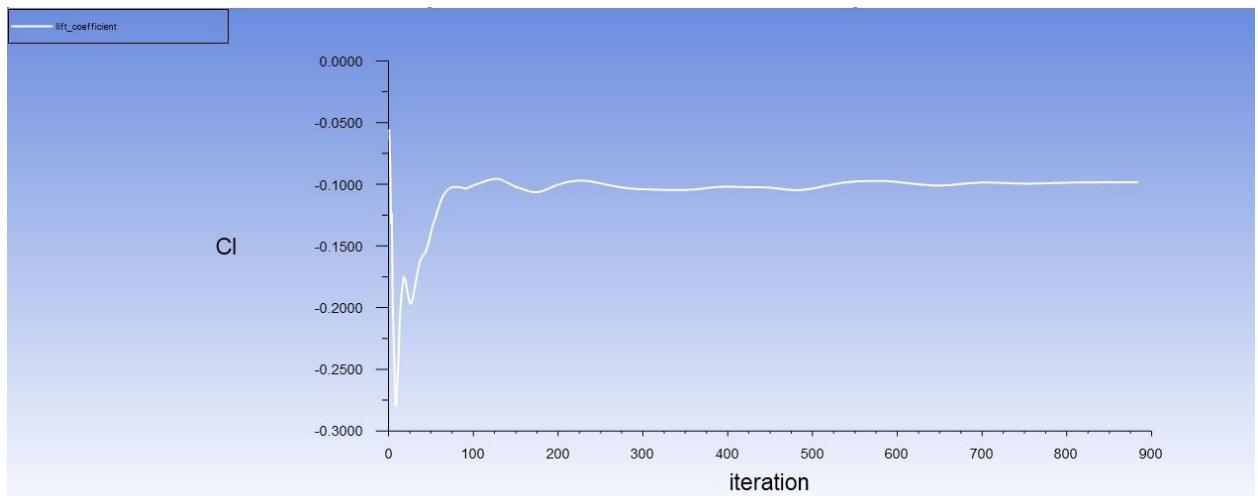


Figura 79: Evolución coeficiente de sustentación. Velocidad 260 km/h. Ansys-Fluent.

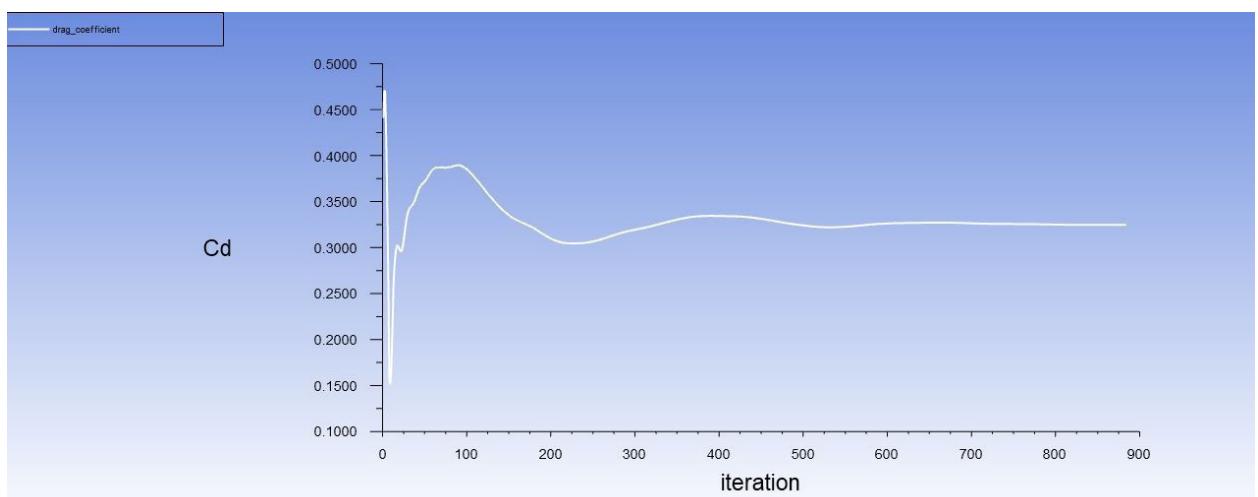


Figura 80: Evolución coeficiente de arrastre. Velocidad 260 km/h. Ansys-Fluent.

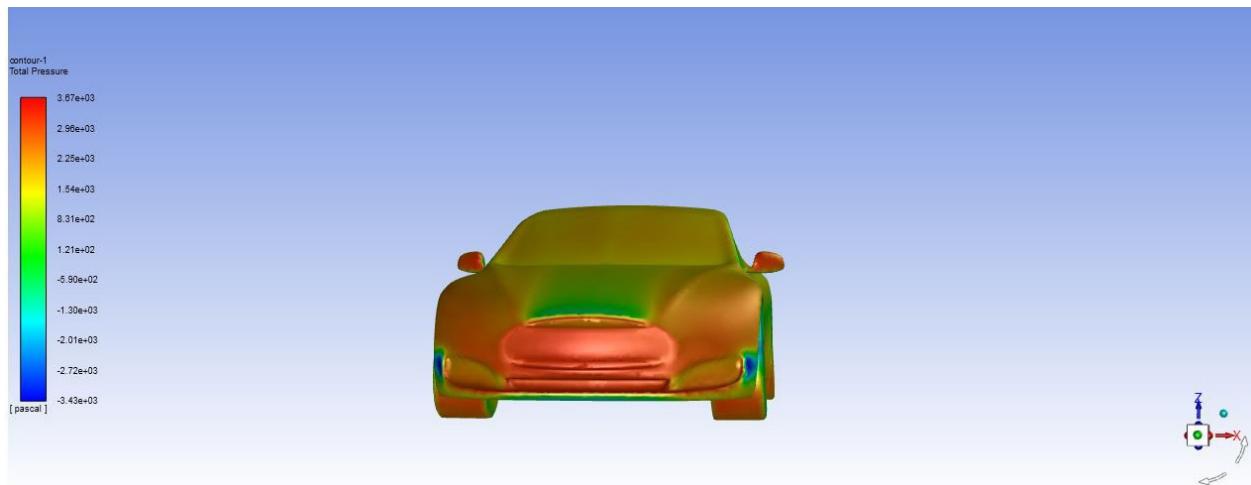


Figura 81: Vista frontal presión total. Velocidad 260 km/h. Ansys-Fluent.

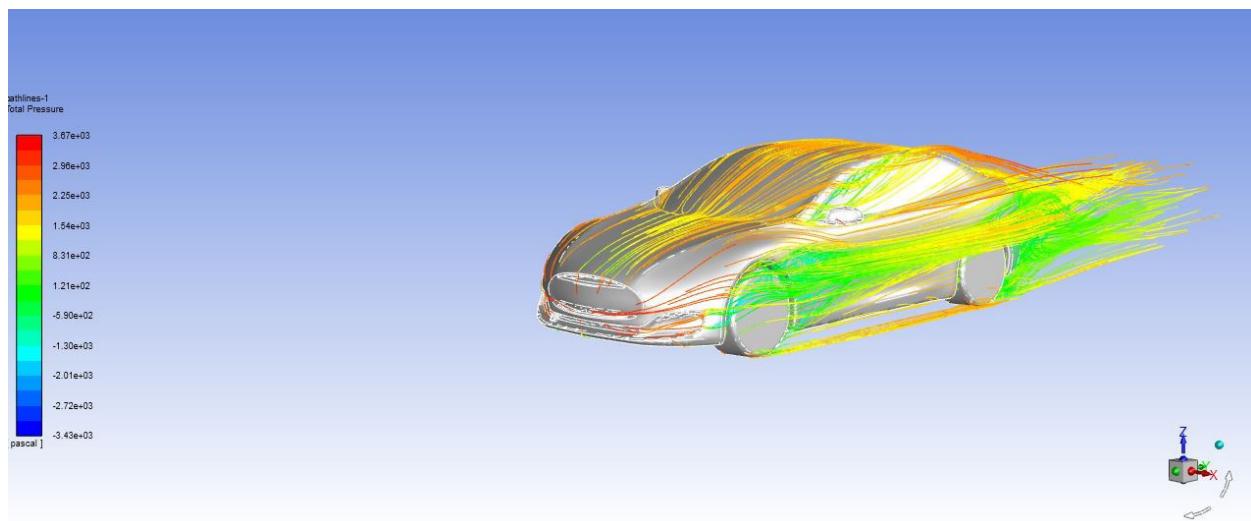


Figura 82: Vista isométrica líneas de corriente. E.c presión total. Velocidad 260 km/h. Ansys-Fluent.

