

Trabajo Fin de Grado

Estudio mediante CFD del rendimiento
aerodinámico de la parte delantera de un vehículo
de competición

CFD study of the aerodynamic performance of the
front end of a racing vehicle

Autor/es

Jorge Muñoz Ballarin

Director/es

Pilar Brufau García

Titulación del autor

Grado en Ingeniería Mecánica

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2023

*A mi familia y a mi novia, que me han apoyado durante esta etapa.
Gracias por estar siempre conmigo.*

Resumen

Los equipos de competición de Fórmula 1 cada año buscan cómo mejorar la tecnología disponible para lograr una ventaja competitiva. Dado el gran coste económico que suponen las posibles pruebas experimentales, la simulación mediante códigos CFD (Computational Fluid Dynamics) arroja resultados satisfactorios y ahorra costes. El trabajo que se propone se centra en analizar el rendimiento aerodinámico en términos de coeficientes de arrastre y sustentación de la parte delantera de un Fórmula 1 mediante el software OpenFOAM. Para ello, se representa el vehículo de competición mediante AutoCAD a grandes rasgos, y poniendo especial detalle en el diseño de diferentes geometrías para la parte delantera del mismo. Una vez se tiene la geometría del vehículo, se busca la malla y refinamiento óptimos para poder obtener unos buenos resultados numéricos de la simulación del flujo de aire alrededor del vehículo, proponiendo unas condiciones iniciales y de contorno adecuadas para el flujo, que se acerquen a las condiciones reales. A través del software OpenFOAM, código abierto de CFD con aplicación en muchas áreas de la ciencia y la ingeniería, y en particular, en flujos complejos de fluidos, se simula el flujo externo de aire alrededor del vehículo; buscando siempre la optimización de su rendimiento aerodinámico; es decir, intentando mejorar los coeficientes de arrastre y sustentación. Se proponen 9 modificaciones sobre el modelo original y se analizan los resultados numéricos obtenidos comparando las variables de interés entre las modificaciones y el modelo original del vehículo y entre todas las modificaciones. Se obtiene como conclusión que la modificación que mejora sustancialmente el modelo, reduciendo el coeficiente de arrastre y disminuyendo el *downforce*, corresponde a mantener el alerón delantero completo en la sección central, extender el fondo plano con forma de perfil alar en el borde y colocar un bifurcador afilado del flujo en la parte inferior.

Abstract

Every year, Formula 1 racing teams seek for new technological advancements to give themselves a competitive edge. The use of Computational Fluid Dynamics (CFD) algorithms produces excellent results with economic savings compared to experimental tests. The work proposed here focuses on utilizing OpenFOAM software to analyze the front of a Formula 1 car's aerodynamic performance in terms of drag and lift coefficients. In order to undertake this work, the race car is depicted using AutoCAD, paying close attention to the design of different front-end shapes to be studied. Once the vehicle's geometry is known, the optimal mesh and refinement are sought in order to get fast and accurate numerical results for the simulation of the airflow around the vehicle, offering suitable initial and boundary conditions for the flow that are similar to reality. The external air flow around the vehicle is simulated using OpenFOAM, an open source CFD program with applications in many fields of science and engineering, specialized in complex fluid flows. The main objective is centered on optimizing the vehicle's aerodynamics, trying to improve the drag and lift coefficients. Nine modifications over the original model are proposed and the numerical results obtained are analyzed by comparing the variables of interest between the modifications and the original model and among all the modifications proposed. The conclusion is that the modification that substantially improves by reducing the drag coefficient and decreasing the *downforce* corresponds to maintaining the complete front wing in the central section, include an extension of the flat bottom with a wing profile shape on the edge and a splitter tapered flow at the bottom.

Índice general

1. Introducción y objetivos	1
2. Modelo de vehículo original y modificaciones	4
2.1. Breve introducción a AutoCAD	4
2.2. Representación gráfica del vehículo original	4
2.2.1. Simplificación del modelo de vehículo original de referencia	5
2.3. Modificaciones propuestas sobre el modelo original de vehículo	7
2.3.1. Nariz	8
2.3.2. Alerón frontal	10
2.3.3. Fondo	10
2.3.4. Características de la modificación 4	11
2.3.5. Características de la modificación 6	11
2.3.6. Características de la modificación 8	12
3. Simulación numérica del flujo externo alrededor del vehículo	14
3.1. Breve introducción a OpenFOAM	14
3.1.1. Ecuaciones de Navier-Stokes	14
3.1.2. SimpleFoam	16
3.1.3. Modelo de turbulencia	16
3.2. Malla de cálculo	17
3.3. Condiciones de contorno, condiciones iniciales y parámetros de la simulación	21
3.3.1. Condiciones de contorno	21
3.3.2. Condiciones iniciales	22
3.4. Convergencia de la simulación	23
4. Resultados numéricos	25
4.1. Análisis del modelo original del McLaren MP4/4	25
4.2. Análisis de resultados tras la modificación 4	33
4.3. Análisis de resultados tras la modificación 6	41
4.4. Análisis de resultados tras la modificación 8	49
4.5. Comparación de las tres modificaciones propuestas y el modelo original . .	56
5. Conclusiones	60
Bibliografía	62

Anexos	63
A. Conceptos Básicos de Aerodinámica	64
A.1. Tipos de flujo	64
A.2. Números adimensionales	66
A.3. Líneas de corriente	67
A.4. Fuerzas aerodinámicas	67
A.4.1. Fuerza de arrastre	67
A.4.2. Coeficiente de arrastre (C_d)	67
A.4.3. Fuerza de sustentación	69
A.4.4. Coeficiente de sustentación (C_l)	70
A.5. Capa límite	71
B. Modelos de turbulencia	72
B.1. DNS	72
B.2. LES	72
B.3. RANS	72
C. Propuestas de diseño de las diferentes modificaciones sobre el modelo CAD del vehículo original	76
C.1. Modificación 1	76
C.2. Modificación 2	77
C.3. Modificación 3	79
C.4. Modificación 4	80
C.5. Modificación 5	81
C.6. Modificación 6	82
C.7. Modificación 7	83
C.8. Modificación 8	84
C.9. Modificación 9	85
D. Librerías de OpenFoam	87
D.1. fvSchemes	87
D.2. BlockMesh	87
D.3. SnappyHexMesh	89
D.3.1. CastellatedMesh	90
D.3.2. Snapping	92
D.3.3. Layers	92
D.4. ControlDict	93
D.5. DecomposeParDict	93
D.6. ForceCoeffs	94

1 | Introducción y objetivos

La primera carrera oficial de Fórmula 1 fue en 1950. En estas carreras, el diseño de la carrocería desempeña un papel crucial en la mejora del comportamiento del vehículo, donde inicialmente tenían la misma forma que los aviones de combate para conseguir un perfil aerodinámico. Conforme se avanzaba en el conocimiento del comportamiento del flujo de aire alrededor de obstáculos, el diseño de los coches de carreras mejoraba, permitiendo su circulación a mayor velocidad en las curvas.

Las primeras técnicas de estudio de la aerodinámica en este tipo de vehículos la constituyen los tests en un túnel de viento; en el que se genera una corriente de aire contra el coche a la velocidad que se quiera estudiar. De esta manera, se crea una situación inversa a la realidad y el aire choca contra el coche, y no el coche contra el aire. Sin embargo, lo que realmente interesa es la velocidad relativa entre el coche y el aire. Los costes de construcción de estos túneles son muy elevados, y a menudo, por sus dimensiones, necesitan un espacio muy amplio.

Así mismo, a medida que la tecnología avanzaba, comenzaron los estudios de simulación numérica (Computational Fluid Dynamics, CFD), en el que los ingenieros empezaron a diseñar cada aspecto del coche y estudiar cómo afectaba a la aerodinámica. Pese a la facilidad a la hora de hacer cambios en un modelo de ordenador, en comparación con las pruebas en el túnel de viento, cuando se utiliza CFD, siempre hay una incertidumbre en el análisis final, y por este motivo se ensayan múltiples configuraciones en CFD y se prueban solo unas pocas en túnel de viento, de ahí que estos resultados numéricos sean tan útiles en la industria del automóvil, en general.

Este trabajo se apoya en las técnicas de simulación CFD con el objetivo de estudiar la influencia de la parte frontal en el comportamiento aerodinámico de un vehículo de Fórmula 1 usando conceptos teóricos de la mecánica de fluidos, e incluyendo los neumáticos como sólido móvil para tener un modelo más cercano a la realidad. El modelo escogido para el proyecto es el McLaren MP4/4, uno de los vehículos más icónicos de la historia de la Fórmula 1, que ganó el campeonato de 1988 con bastante holgura [9, 17], siendo un vehículo desafiante para mejorar aerodinámicamente.

Mediante un modelo CAD se modifica la parte frontal del vehículo proponiendo varios diseños, especialmente la forma de la *"nariz"*, con el objetivo de ver lo que suponen estos cambios en la aerodinámica del coche mediante simulaciones de CFD, poniendo énfasis en aquella variación que produzca alguna mejora. Sobre todo, se va a implementar el concepto de *"nariz alta"*, ya que fue a partir de este diseño cuando se utilizó en esta competición en algunos vehículos, mejorando sustancialmente la aerodinámica, siendo

aplicada de ahí en adelante a todos los demás modelos. Más adelante se exponen los beneficios que proporciona este diseño.

Para acometer el trabajo, se analiza en primer lugar el modelo original, simplificado, para evitar un alto coste computacional, y una vez se obtienen los resultados numéricos, y se ha alcanzado la convergencia de los mismos y se analizan, se proponen nuevas configuraciones para estudiar su comportamiento aerodinámico. Previamente, se ha realizado un estudio cualitativo de la malla, optimizando el número de celdas a usar en el cálculo para adquirir el mejor compromiso entre detalle del flujo y coste computacional. Principalmente, se analizan las fuerzas de sustentación y resistencia que genera el coche con respecto al flujo de aire, ya que son las fuerzas más importantes en esta competición, observando como varían según las diferentes configuraciones objeto de estudio, y cuáles son las partes del coche que tienen mayor contribución a la hora de producirlas. Además, se tienen en cuenta parámetros adicionales como zonas de turbulencia, líneas de corriente o desprendimiento de la capa límite.

Al inicio del siglo XIX, las ecuaciones de Navier-Stokes [11], las cuales describen completamente el movimiento de un fluido, fueron establecidas; y por primera vez, era posible describir matemáticamente cualquier movimiento de un fluido viscoso. No fue hasta 100 años después cuando estas ecuaciones pudieron ser utilizadas a la hora de resolver problemas de ingeniería, convirtiéndose en un trade-off entre tiempo y precisión, ya que únicamente pueden ser resueltas numéricamente y no analíticamente, salvo en casos muy simplificados. A la rama de mecánica de fluidos que resuelve mediante métodos numéricos estas ecuaciones se le denomina CFD (*Computational Fluid Dynamics*), como ya se ha avanzado. Se pueden recordar algunos conceptos teóricos útiles para el análisis que se realizará en este trabajo en el anexo A.

El estudio por CFD es una herramienta importante en el diseño y desarrollo de vehículos de competición, especialmente en la optimización de la aerodinámica. La forma y los diseños en la parte frontal de un vehículo tienen un impacto significativo en su eficiencia aerodinámica y, por lo tanto, en su rendimiento. Las simulaciones CFD en vehículos de competición se remontan a las décadas de 1950 y 1960, donde los ingenieros y científicos comenzaron a aplicar estas técnicas para simular el flujo de aire alrededor de los vehículos de carreras, con el objetivo de mejorar su eficiencia aerodinámica y rendimiento. Con el tiempo, el uso del CFD en los vehículos de competición se fue extendiendo, y en la década de 1990 comenzó a utilizarse de manera más amplia, como por ejemplo para la optimización de perfiles alares [12, 18, 24]. Gradualmente, estas simulaciones se volvieron más útiles conforme avanzaba la tecnología computacional disponible.

En la actualidad, la CFD es una herramienta esencial, y se utiliza en todas las etapas del diseño y desarrollo de los componentes de un vehículo, desde la conceptualización hasta la validación y la optimización. Es una tecnología vital para el éxito de la industria, y su impacto y evolución continúan siendo una historia de continuos avances y mejoras. Consiste en el uso de programas que emplean técnicas numéricas para resolver las ecuaciones dinámicas de fluidos (la ecuación de continuidad, la ecuación de cantidad de movimiento y la ecuación de la energía). La ventaja más importante de la CFD es su capacidad de mejorar y modificar la forma del vehículo de una forma ágil frente a la construcción de

un modelo del mismo, utilizando un software de tipo CAD. Además, evitar tener que construir un modelo de automóvil conduce a una enorme reducción de tiempo y costes económicos de los nuevos diseños, además de que permite simular condiciones complejas para vientos laterales o el comportamiento de la aerodinámica de cargas en suspensión. El único inconveniente es que los programas comerciales de CFD pueden resultar caros, necesitan una enorme capacidad de cálculo computacional para poder resolver todas las ecuaciones del flujo y requieren de personal cualificado para interpretar las condiciones de flujo a modelizar y los resultados numéricos obtenidos. Por otro lado, es un método muy eficiente, ya que en una sola simulación permite conocer la mayoría de los parámetros aerodinámicos: fuerza de arrastre, carga aerodinámica, fuerza lateral, líneas de corriente, distribución de presión y coeficientes de arrastre y sustentación. La CFD se espera que siga evolucionando en los próximos años y se prevé que se convierta en el principal método de validación aerodinámico para los equipos de Fórmula 1, y mundo del automóvil en general.

2 | Modelo de vehículo original y modificaciones

En este capítulo se describe el proceso de representación gráfica 3D del McLaren MP4/4, mediante el programa AutoCAD, que se ha elegido como modelo para este trabajo por ser estadísticamente uno de los mejores en la historia de la Fórmula 1, dado el alto número de premios conseguidos. También se presentan las modificaciones propuestas en este trabajo sobre el vehículo original a modelizar para analizar la respuesta del flujo de aire.

2.1. Breve introducción a AutoCAD

En la actualidad, los modelos CAD (Computer-Aided Design) se han convertido en una herramienta fundamental en la industria del diseño y la ingeniería. Un modelo CAD [13] es una representación digital en 2D o 3D de un objeto físico que permite su visualización, análisis y modificación en un entorno virtual. El programa AutoCAD, desarrollado por Autodesk [6], es uno de los software de diseño asistido por computadora más populares y utilizados en todo el mundo. AutoCAD ofrece una amplia variedad de herramientas de dibujo y edición que permiten la creación de objetos geométricos complejos con gran precisión y rapidez. Además, cuenta con funciones de visualización, animación y renderizado que permiten la presentación y análisis del modelo desde diferentes perspectivas.

La utilización de modelos CAD y el programa AutoCAD en particular, ha revolucionado la forma de diseño y fabricación en la industria, ya que permite reducir los tiempos y costes de producción, mejorar la calidad de los productos y aumentar la productividad de los diseñadores y fabricantes, como es el caso de este trabajo. Gracias a esta herramienta se pueden analizar diferentes partes frontales del vehículo sin necesidad de fabricarlas en la vida real, reduciendo todos los posibles costes que acarrearía la fabricación de todas las configuraciones que se quieren estudiar.

2.2. Representación gráfica del vehículo original

Se utiliza el software AutoCAD para diseñar el modelo de vehículo a simular. El Fórmula 1 escogido es el McLaren MP4/4 de 1988, tal y como se ha mencionado anteriormente. Para ello, se toma como referencia un modelo de este vehículo accesible en la red [14],

con el fin de evitar emplear un tiempo elevado en esta parte del trabajo y centrarse en la simulación CFD.

Es importante obtener un diseño sobre un modelo fácilmente modificable, para poder realizar las variaciones pertinentes de forma sencilla y sin malgastar tiempo en volver a representar todo el vehículo de nuevo. Es por ello, que el diseño de la parte trasera del vehículo permanecerá fijo en todo el trabajo, variando únicamente la parte frontal del mismo, que es la zona del vehículo en la que se centra este trabajo.

2.2.1. Simplificación del modelo de vehículo original de referencia

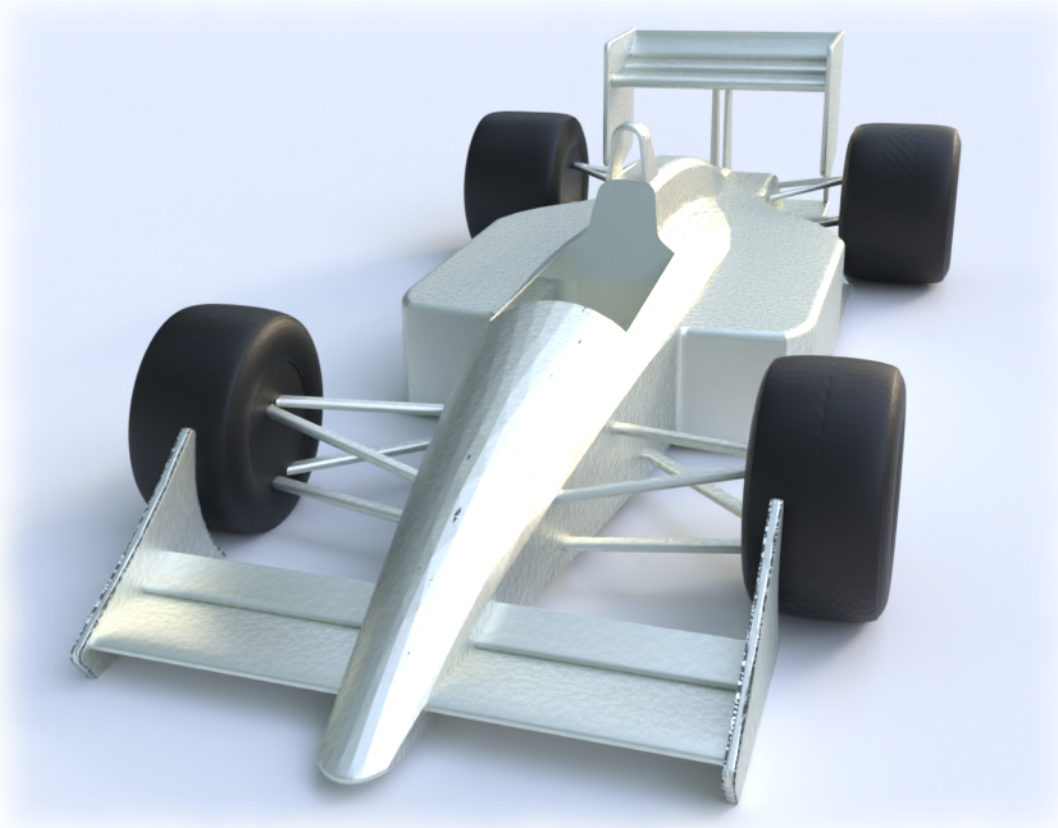
El modelo del vehículo original que se ha tomado como referencia a través de la red [14], cuenta con todas las dimensiones y detalles necesarios para su posterior modelización, habiéndose tenido en cuenta la información técnica disponible sobre el Fórmula 1. Cabe destacar, que el modelo tiene un nivel de detalle bastante elevado, lo cual supone un elevado coste computacional a la hora de simular, ya que existe una relación proporcional entre el nivel de complejidad del modelo CAD y el coste computacional a la hora de simular. Es por eso, que con el fin de reducir este coste computacional de la simulación CFD, se procede a una simplificación del modelo original de referencia, eliminando aquellos elementos del vehículo que tienen una pequeña (o nula) contribución aerodinámica respecto al resto.

Ya que este trabajo se centra en el estudio de la aerodinámica externa del vehículo, se eliminan aquellos componentes internos del Fórmula 1 que no son objeto de estudio y únicamente añaden tiempo a la simulación. Entre estos se encuentran partes como el motor, la caja de cambios o el diferencial. Además, se cubren aquellas partes por donde el flujo de aire entra en el vehículo, como tomas de aire, con el fin de centrarnos únicamente en el estudio aerodinámico externo del vehículo.

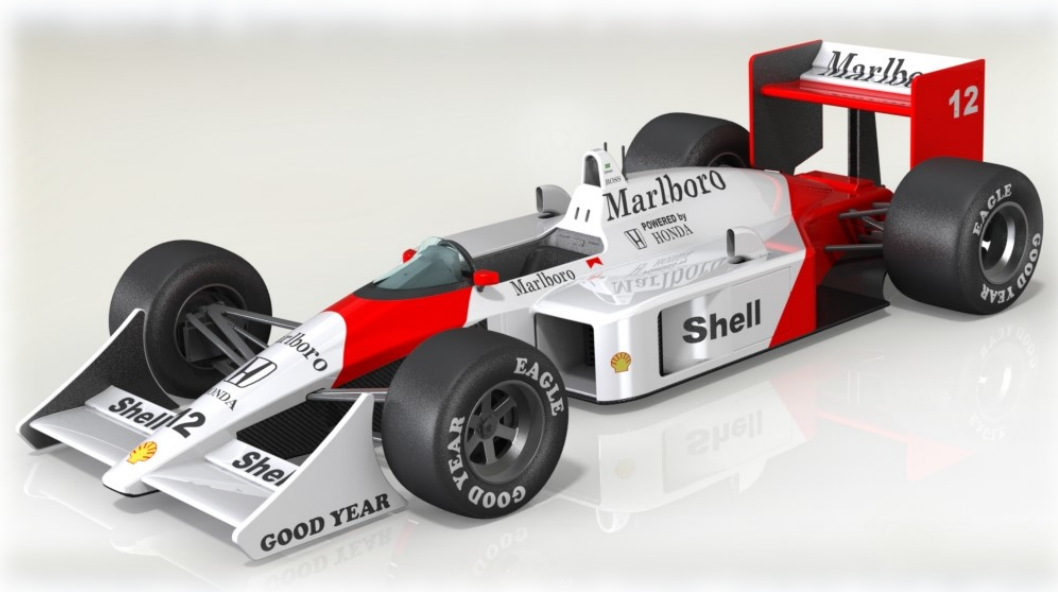
Además de reducir los elementos internos, se suprimen aquellos elementos externos que contribuyen minoritariamente a la aerodinámica externa, ya que la relación entre coste computacional y contribución aerodinámica es prácticamente nula, incrementando bastante el tiempo de simulación en comparación con la contribución aerodinámica que representan. Estos elementos incluyen partes pequeñas como los retrovisores o los anclajes de los cinturones de seguridad.

En esta misma línea, las ruedas se consideran como un sólido no hueco, eliminando los discos de freno, las pinzas, o las llantas. Así mismo, el número de brazos de suspensión se reducen a la mitad, tanto en la parte delantera como en la trasera, con el fin de obtener una noción de como se redirige el flujo al chocar con los brazos pero sin obtener un alto nivel de detalle de ello.

El resto de componentes, superficies y partes del vehículo, permanecerán idénticas al modelo original de referencia. La figura 2.1 muestra ambos modelos, pudiéndose apreciar las simplificaciones realizadas.



(a) Modelo simplificado.



(b) Modelo de referencia.

Figura 2.1: Comparación del modelo de referencia (b) con el modelo simplificado CAD (a).

2.3. Modificaciones propuestas sobre el modelo original de vehículo

A la hora de modificar el vehículo original, se actúa sobre 3 partes del mismo: nariz, alerón y fondo. Para cada modificación propuesta se evalúa su impacto en los coeficientes de sustentación y arrastre (ver anexo A.4.2 y A.4.4) así como en el campo de presiones, velocidad y energía cinética turbulenta (ver capítulo 4).

En total se han estudiado 9 modificaciones diferentes respecto a la configuración original, cuyas características principales que diferencian a unas de otras se recogen en la siguiente tabla:

Configuración	Nariz	Alerón	Fondo
1	Convexa	Sin parte central	Sin variación
2	Convexa y ancha	Sin parte central	Sin variación
3	Forma de perfil alar	Sin parte central	Sin variación
4	Forma de perfil alar y ancha	Sin parte central	Sin variación
5	Cóncava	1 flap en parte central	Prolongado y bifurcador
6	Cóncava	1 flap en parte central	Prolongado, ajustado y bifurcador
7	Cóncava	1 flap en parte central	Prolongado, ajustado y bifurcador rediseñado
8	Cóncava	Entero	Prolongado, ajustado y bifurcador rediseñado
9	Cóncava	Entero	Prolongado, ajustado y bifurcador rediseñado de nuevo

Tabla 2.1: Características de las modificaciones propuestas sobre el modelo original.

de las cuales se explican y se exponen 3 en esta memoria principal, que son las que marcan una diferencia sustancial respecto al modelo original; y en el anexo C se presentan todas las modificaciones analizadas.

2.3.1. Nariz

Tal y como se describe en la introducción y objetivos (capítulo 1) del proyecto, se modifica la parte frontal del vehículo, especialmente implementando el concepto de *"nariz alta"*.

La historia de la nariz alta en la Fórmula 1 se remonta a principios de la década de 1990, cuando la aerodinámica se convirtió en un aspecto cada vez más importante del diseño de los autos de Fórmula 1.

El primer equipo en introducir este concepto fue Tyrrell Racing en 1990. Su modelo 019 presentaba una nariz elevada que permitía que el aire fluyera más limpiamente debajo del coche y mejoraba su eficiencia aerodinámica. En la figura 2.2 se puede observar con detalle el vehículo y su singular nariz. La nariz alta demostró ser una innovación significativa, y tuvo una gran repercusión en el diseño de los coches durante las décadas siguientes. Hoy en día la mayoría de los coches de Fórmula 1 utilizan este tipo de diseño.



Figura 2.2: Modelo de nariz elevada en el Fórmula 1 019 introducida por Tyrrell.

Este diseño de la parte frontal tiene varios beneficios aerodinámicos [7, 16]:

- Mejora el rendimiento de la parte frontal del vehículo, reduciendo el efecto de bloqueo de otros componentes del automóvil.
- Mejora el control del flujo de aire proveniente del alerón delantero.
- Permite una mayor flexibilidad en el diseño de la carrocería, incluyendo el chasis y las entradas laterales de flujo (sidepod), además de optimizar la eficiencia del tren trasero.

- Mejora el sistema de refrigeración pudiendo rediseñar los conductos de entrada de aire.

Todo esto hace que la eficiencia aerodinámica general mejore por completo [4], consiguiendo una mejora total del vehículo. Para implementar este diseño en el vehículo, la anchura, longitud y el resto de medidas permanecen constantes, cambiando el perfil longitudinal de las partes superior e inferior de la nariz según varias configuraciones, junto con las uniones al alerón. Además, se debe establecer la localización del punto de remanso, es decir, el punto donde la velocidad del flujo es cero, haciendo que este se bifurque y cambie de dirección.

El punto de remanso puede situarse en 3 zonas respecto a la línea central divisoria [20], tal y como se puede apreciar en la figura 2.3, ya sea en la parte superior, inferior, o en la misma línea central divisoria. Según el principio de Bernoulli descrito en el anexo A.4.3, una diferencia de presiones entre las partes superior e inferior al punto de remanso es necesaria para generar fuerza de sustentación (ver anexo A.4.3), por lo que se descarta la opción del punto de remanso en la línea central divisoria, ya que originaría simetría en este aspecto.

Un punto de remanso por encima de la línea divisoria crea más espacio para que el flujo de aire pase por debajo del vehículo y reduce el coeficiente de arrastre (ver anexo A.4.2). Sin embargo, genera menor carga aerodinámica en la superficie superior. Por otro lado, un punto de remanso por debajo de la línea divisoria genera más carga aerodinámica en la superficie superior de la nariz, a costa de un mayor coeficiente de arrastre y un desaprovechamiento del efecto suelo, ya que el volumen de flujo que circula por la superficie inferior de la nariz es menor.

Considerando las ventajas y desventajas que ofrecen estas dos opciones, parece claro elegir un punto de remanso en la parte superior, para aprovechar de forma mejor el efecto suelo y reducir el coeficiente de arrastre. Es por ello, que el punto de remanso se sitúa en un punto intermedio de esta zona en todas las configuraciones analizadas en este trabajo respecto al modelo original, ajustándolo lo máximo posible al punto medio entre la línea central divisoria y el punto más alto de la nariz.

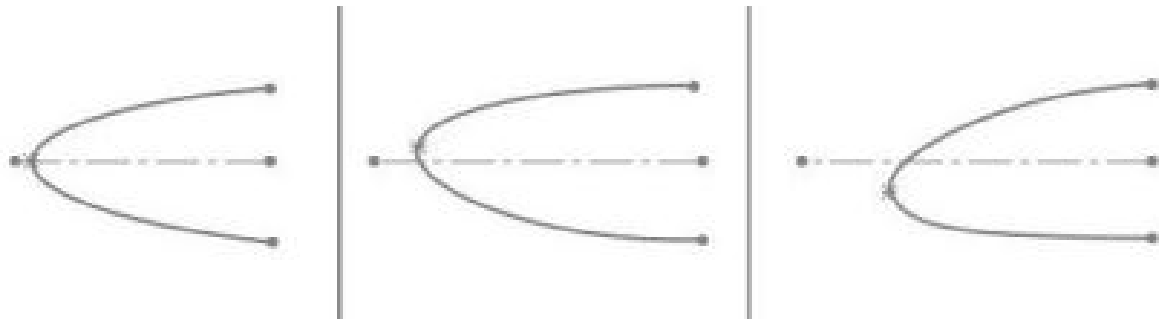


Figura 2.3: Opciones de localización del punto de remanso

2.3.2. Alerón frontal

El alerón delantero, un componente aerodinámico vital de un coche de Fórmula 1, está situado en la parte delantera del vehículo, como su nombre indica. Está formado por una serie de componentes aerodinámicos que incluyen perfiles alares, aletas y superficies destinados a producir carga aerodinámica y controlar el flujo de aire alrededor del vehículo.

La función principal del alerón delantero es maximizar la carga aerodinámica en el eje delantero del coche. Al generar fuerza hacia abajo, el alerón delantero presiona las ruedas delanteras contra el suelo, lo que mejora la adherencia y la estabilidad del automóvil durante las curvas a alta velocidad. Esto permite a los pilotos tomar curvas más rápidas y con mayor confianza.

La geometría del alerón delantero también trata de controlar el flujo de aire alrededor de las ruedas delanteras y por debajo del vehículo. Esto aumenta el agarre y la estabilidad, al producir un efecto suelo que succiona el automóvil hacia él. El alerón delantero contribuye con el alerón trasero y los difusores, entre otros elementos aerodinámicos, para mantener la carga aerodinámica uniformemente distribuida por todo el automóvil.

A lo largo de todas las modificaciones descritas en el anexo C, se varía la geometría del alerón delantero, especialmente su parte central, ya sea eliminándola, manteniéndola, o conectándola con la nariz de distintas formas.

2.3.3. Fondo

El suelo de un Fórmula 1, comúnmente denominado "fondo plano", es un componente aerodinámico esencial situado bajo el chasis. Recorre toda la longitud del vehículo y es crucial para producir carga aerodinámica y controlar el flujo de aire.

El objetivo principal del fondo plano es crear una zona de baja presión debajo del vehículo para aprovechar el efecto suelo y producir carga aerodinámica. El diseño del suelo tiene una superficie plana y lisa con una serie de características aerodinámicas estratégicamente situadas, como trapecios, aletas y ranuras, para gestionar el flujo de aire y mejorar el efecto suelo.

El flujo de aire bajo el automóvil se acelera por el suelo, lo que da lugar a una región de baja presión. Esta zona de baja presión empuja el coche hacia el suelo, lo que mejora su estabilidad y agarre. Además, el suelo ayuda a controlar el flujo de aire alrededor de los neumáticos traseros, reduciendo las turbulencias y mejorando la eficacia aerodinámica general. Además, el suelo es muy importante para guiar el flujo de aire hacia el difusor de la parte trasera del vehículo. El difusor expande el flujo de aire y aumenta la carga aerodinámica, lo que mejora aún más el efecto suelo.

2.3.4. Características de la modificación 4

En esta modificación (ver figura 2.4) se implementa el concepto de nariz alta descrito en la subsección 2.3.1, se elimina la parte central del alerón frontal, se diseñan las conexiones de éste con la nariz y las superficies que unen la nariz y el asiento se eliminan. La nariz se ensacha siguiendo la propuesta de la modificación 2 (figura C.2), y cuenta con la forma de perfil alar incorporado en la modificación 3 (figura C.3)). Además, las conexiones con el alerón son las de la modificación 1 (figura C.2).

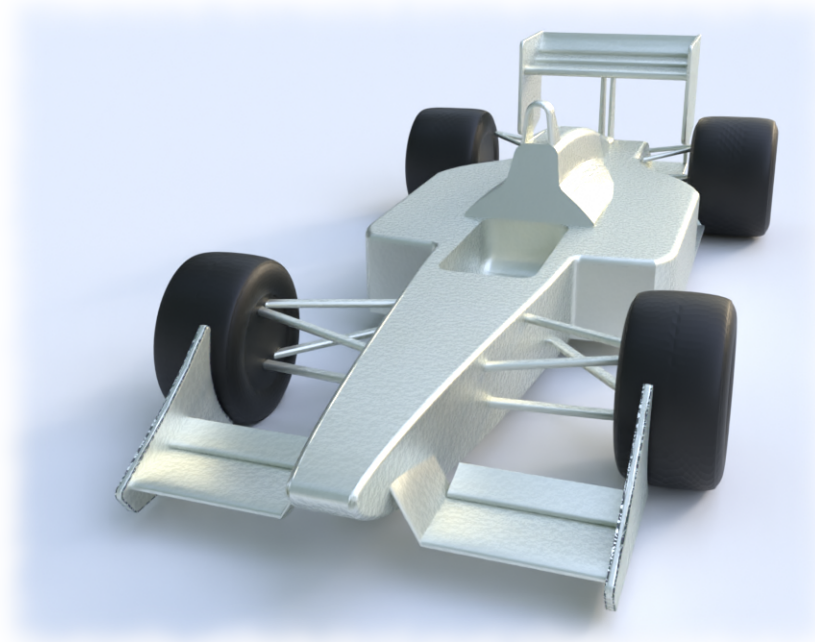


Figura 2.4: Modelo de vehículo propuesto correspondiente a la modificación 4 sobre el modelo original.

2.3.5. Características de la modificación 6

La modificación 6 supone un rediseño total respecto a la modificación 4, continuando el diseño implementado en la modificación 5 descrita en el anexo C. Se extiende el fondo plano y se implementa el bifurcador de flujo en la parte inferior y la nariz cóncava. El objetivo de la extensión del fondo plano, alineado con la nariz y redondeado en su extremo, es generar un gradiente de presiones entre sus superficies superior e inferior, para que el vehículo genere más *downforce*. Asimismo, el bifurcador estrecho se implementa con el fin de dividir el flujo en dos direcciones y evitar que esta zona genere una gran resistencia aerodinámica, reduciendo el choque frontal del flujo con esta pieza. Por último, la nariz cóncava alta se introduce con el fin de incrementar el flujo por debajo de la nariz, para así aumentar la fuerza de sustentación generada por la extensión del fondo plano. Además, se mantiene un solo flap en la zona central del alerón delantero.

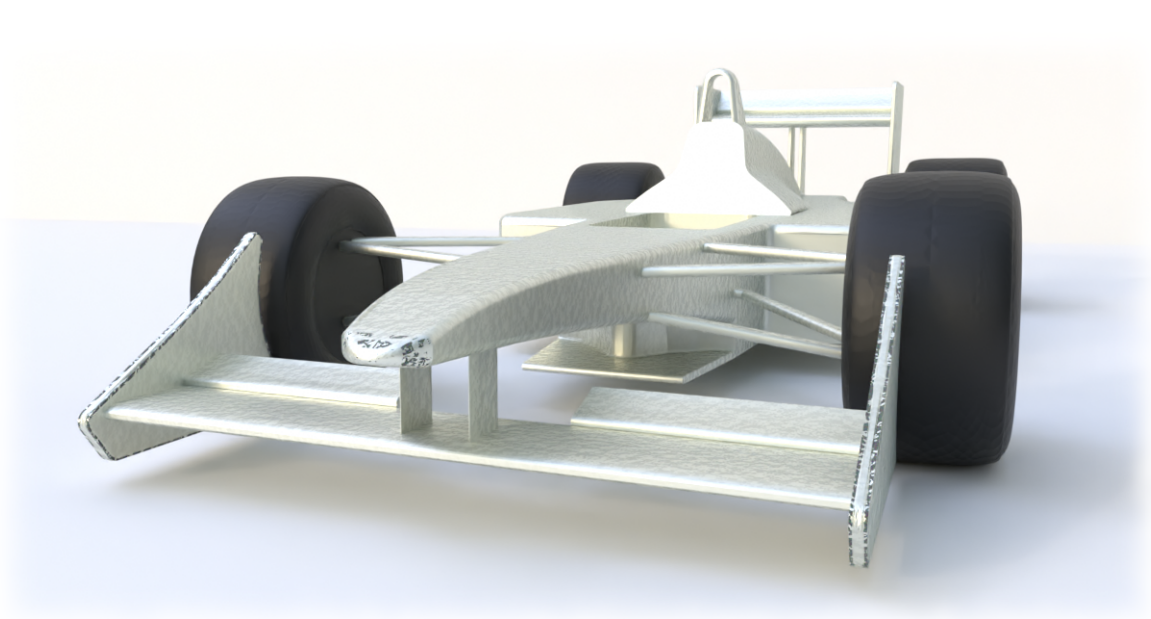


Figura 2.5: Modelo de vehículo propuesto correspondiente a la modificación 6 sobre el modelo original.

2.3.6. Características de la modificación 8

La modificación 8 mantiene la línea de la modificación 6, rediseñando la extensión del fondo plano y el bifurcador. Se estrecha el bifurcador para reducir la resistencia aerodinámica de esta superficie, y el redondeo del extremo de la extensión del fondo plano ahora tiene forma de perfil alar, cuya principal característica es la baja resistencia aerodinámica que genera. Además, la modificación 8 cuenta con todo el alerón delantero (sin eliminar flaps).

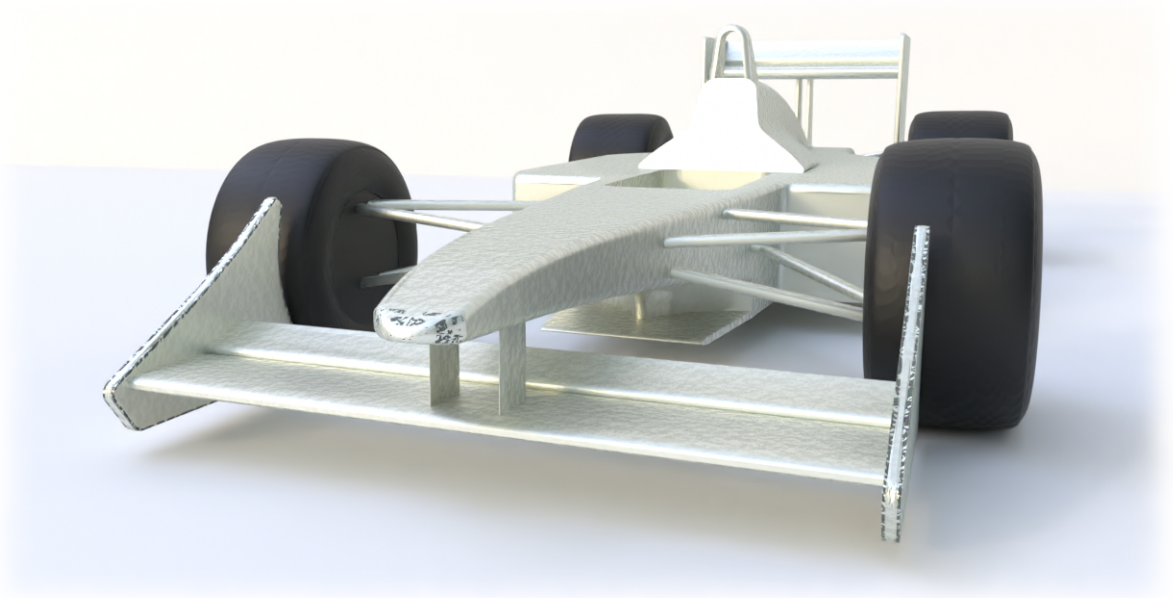


Figura 2.6: Modelo de vehículo propuesto correspondiente a la modificación 8 sobre el modelo original.

3 | Simulación numérica del flujo externo alrededor del vehículo

En este capítulo se describe el procedimiento que se ha seguido a lo largo del trabajo para conseguir una simulación lo más semejante posible a la realidad del flujo externo al que se ve sometido el vehículo elegido de Fórmula 1. Para ello, se ha utilizado el software OpenFOAM, escogiendo el modelo de turbulencia que se considera más adecuado para el caso en cuestión, y definiendo una malla lo más precisa posible, teniendo en cuenta su coste computacional. Se definen también las condiciones de contorno y el resto de parámetros de la simulación utilizados, para finalmente evaluar la convergencia de la simulación. Este mismo proceso es el que se ha seguido para analizar las diferentes configuraciones de la parte frontal del vehículo, objeto de este estudio, y cuyos resultados se presentarán en el capítulo de resultados (capítulo 4).

3.1. Breve introducción a OpenFOAM

OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) es un software libre de simulación numérica basado en la solución de sistemas de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales para resolver problemas en dinámica de fluidos y transferencia de calor [2]. Cuenta con una amplia gama de solvers, preprocesadores y postprocesadores. Los solvers incluyen tanto solvers de flujo laminar como solvers de flujo turbulento, y son capaces de resolver problemas complejos en geometrías 2D y 3D. Los preprocesadores permiten a los usuarios crear mallas para la simulación y definir las condiciones iniciales y de contorno, mientras que los postprocesadores permiten a los usuarios visualizar y analizar los resultados de la simulación.

3.1.1. Ecuaciones de Navier-Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes son las ecuaciones fundamentales de la Mecánica de Fluidos [22, 23, 25], que gobiernan el comportamiento de cualquier fluido, tal y como se ha comentado en la introducción y objetivos (capítulo 1) de este trabajo. Estas ecuaciones describen el movimiento del flujo de fluidos, a través de la distribución de la velocidad, la presión, la temperatura y la densidad del fluido en un dominio específico. Las ecuaciones de Navier-Stokes son una representación matemática de las leyes de conservación de masa, momento y energía en un fluido, y son esenciales para el análisis de sistemas físicos que involucren flujos de fluidos.

La ecuación de conservación de la masa [22, 23, 25] establece que la cantidad de masa dentro de un volumen cerrado que contiene fluido permanece constante y su expresión es:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

Variable	Descripción
ρ	Densidad del fluido
u, v, w	Componentes del vector velocidad
t	Tiempo
x, y, z	Coordenadas espaciales

La ecuación de conservación del momento [23] establece que el cambio en la cantidad de momento de un fluido es igual a la suma de las fuerzas externas que actúan sobre el fluido. A continuación se escribe esta ecuación en cada una de sus componentes:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (3.2a) \\ (3.2b) \\ (3.2c) \end{array}$$

Variable	Descripción
ρ	Densidad del fluido
u, v, w	Componentes del vector velocidad
p	Presión
τ_{ij}	Tensor de esfuerzos viscosos
f_x, f_y, f_z	Componentes de la fuerza másica

En cada ecuación del sistema anterior, el primer sumando representa la tasa de cambio temporal del momento en cada dirección del espacio, el resto de sumandos a la izquierda de la igualdad representa la variación convectiva del momento; mientras que los términos a la derecha de la igualdad representan las fuerzas que actúan sobre el fluido para cambiar su momento: fuerzas de presión, de rozamiento y másicas o de volumen.

3.1.2. SimpleFoam

En CFD, un *solver* es un método numérico programado para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes de forma numérica y obtener soluciones aproximadas [8]. OpenFOAM incluye una amplia variedad de *solvers* y herramientas para modelar diferentes tipos de flujos, desde fluidos incompresibles hasta gases compresibles y turbulencia.

En el trabajo, se utiliza "*SimpleFoam*" [2], un *solver* de flujo laminar o turbulento e incompresible (ver anexo A.1), que utiliza un método de discretización de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes. El método de volumen finito implica discretizar el dominio del fluido en una cuadrícula de celdas y aproximar las propiedades del flujo, como la velocidad y la presión, por valores en el centro y/o paredes de cada celda. Respecto a las ecuaciones de Navier-Stokes (ver sección 3.1.1), las derivadas espaciales de las propiedades del fluido se aproximan utilizando sus valores en las caras de las celdas; y respecto al tiempo, opera en modo estacionario. Además, para resolver las variables, necesita un modelo de turbulencia (ver sección 3.1.3), y utiliza como variables de entrada la presión y la velocidad. Junto a este modelo, utiliza la librería *fvSchemes* descrita en el anexo D.

Aunque este solver es capaz de simular flujos turbulentos, es importante tener en cuenta que su capacidad para modelar turbulencia es limitada, en comparación con otros solvers de OpenFOAM que están específicamente diseñados para modelar flujos turbulentos; sin embargo proporciona resultados bastante correctos en relación con el coste computacional que conlleva.

3.1.3. Modelo de turbulencia

El sistema de ecuaciones compuesto por (3.1) y (3.2) está escrito para los valores medios de las variables; pero el flujo externo alrededor de vehículos tiene asociado un número de Reynolds grande debido a las altas velocidades que se alcanzan, y que hacen que el flujo se comporte como turbulento. En este caso, hay que considerar también las fluctuaciones de las variables que describen el flujo y su modelización mediante los llamados modelos de turbulencia [19, 26]. La turbulencia se refiere al movimiento irregular, caótico y altamente complejo de un fluido, que se caracteriza por fluctuaciones en la velocidad, la presión y otras propiedades físicas. Se manifiesta en una amplia variedad de escalas, con variaciones aleatorias tanto en tiempo como en espacio, por lo que se pueden obtener distintos promedios estadísticos del mismo flujo turbulento. Se produce cuando la velocidad del flujo supera el número de Reynolds crítico (ver anexo A.1). Cuando esto ocurre, las capas de fluido adyacentes se mezclan y se forman pequeños vórtices y remolinos que interactúan entre sí y generan un movimiento caótico y complejo, obteniéndose un flujo turbulento y disipando gran energía. Se puede encontrar una descripción más detallada en el anexo A.1.

En simulaciones CFD, la turbulencia es un desafío, ya que el comportamiento turbulento del fluido es altamente no lineal, impredecible y difícil de modelar. Los modelos de turbulencia utilizan diferentes métodos y ecuaciones matemáticas para describir la turbulencia,

desde modelos simples basados en la longitud de mezcla hasta modelos más complejos. La elección del modelo de turbulencia adecuado es crucial para obtener resultados precisos. En el anexo B se presentan algunos de los modelos de turbulencia más importantes, siendo el modelo RANS (B.3) el elegido para este trabajo; y, en particular, el modelo llamado $k - wSST$ (ver anexo B.3).

Se ha elegido este modelo en este trabajo, ya que se considera uno de los mejores para la simulación de la aerodinámica de un Fórmula 1 debido a su capacidad de capturar las características de flujo de aire altamente turbulentas y complejas que se producen alrededor del vehículo. Además, también predice de manera precisa los puntos críticos de separación del flujo de aire alrededor del vehículo, lo que es fundamental para optimizar el diseño aerodinámico y mejorar el rendimiento del vehículo. Por último, también se adapta a diferentes condiciones de flujo, lo que permite simular una amplia variedad de situaciones que pueden ocurrir durante una carrera de Fórmula 1.

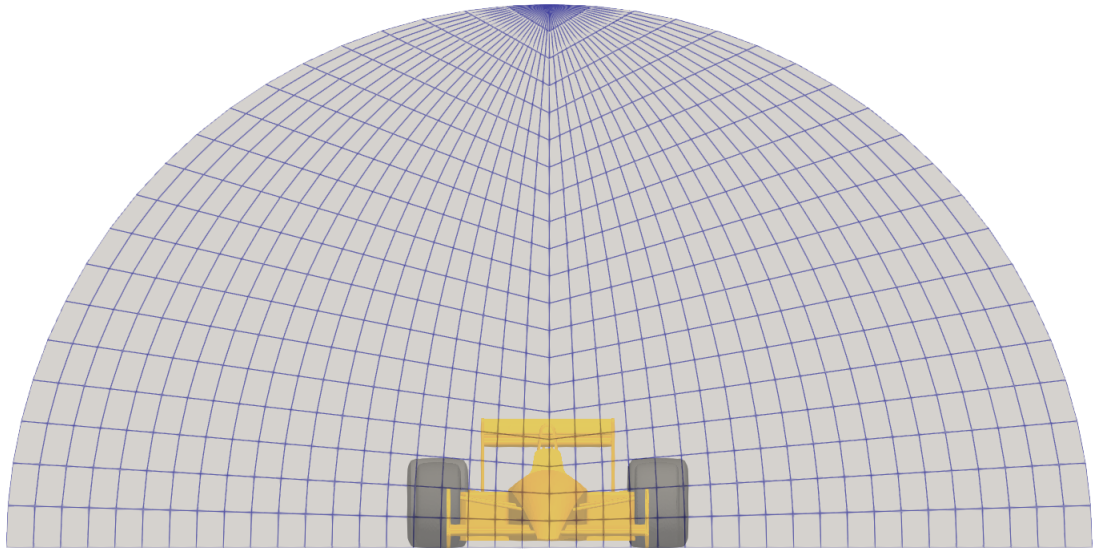
3.2. Malla de cálculo

En una simulación, la malla de cálculo representa la discretización del dominio de la simulación en pequeñas celdas o elementos para permitir que las ecuaciones que rigen el comportamiento del sistema sean resueltas numéricamente en las mismas, y así poder conocer el valor de las variables en ellas. La calidad de la malla puede tener un gran impacto en la precisión y eficiencia de los resultados de la simulación, siendo proporcional al coste computacional que genera, cuanto más fina es la malla, mayor número de celdas se necesitan, lo que conlleva a una mayor precisión en los resultados pero también a un alto coste computacional. En este sentido, en la CFD, uno de los objetivos prioritarios es llegar a un compromiso adecuado entre precisión y coste [8].

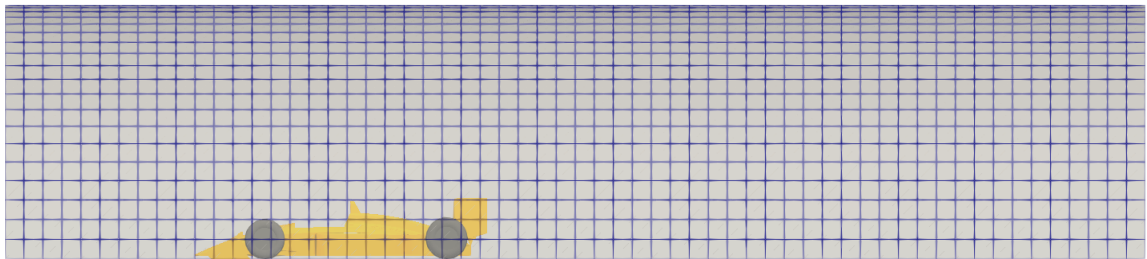
En OpenFOAM, se utilizan dos herramientas para la generación de la malla de cálculo: la primera, "*blockMesh*" (ver anexo D.2), se usa para definir el dominio de la simulación (contorno), mientras que "*snappyHexMesh*" (ver anexo D.3) se usa para definir la malla tridimensional del flujo alrededor del vehículo y también para definir zonas en las que se requiere un refinamiento de mayor precisión.

Los detalles de definición de la malla de cálculo en OpenFOAM se describen en el anexo D. Siguiendo la metodología descrita en el anexo y con las librerías necesarias, se define el dominio de cálculo que se necesita. Se va a simular un espacio físico de 18 metros de largo (2 metros por delante del vehículo y 12 metros por detrás aproximadamente) (ver figura 3.1), para capturar bien el comportamiento del flujo en zonas bastante lejanas al vehículo, debido a la alta velocidad que alcanza, 8 metros de ancho (3 metros a cada lado del vehículo) para obtener información acerca de la redirección lateral del flujo, y 4 metros de alto para obtener los mejores resultados en el flujo trasero del coche, ya que el desprendimiento del flujo en esa zona hace que sea importante analizarlo a una altura mayor que el vehículo, todo ello en forma de cúpula semicilíndrica (ver figura 3.1); y para que las condiciones de contorno que se van a imponer no tengan influencia sobre el comportamiento del flujo.

Se divide el dominio en 60 celdas a lo largo de la dirección longitudinal, y 20 en la transversal y vertical. En cuanto a las regiones, se cuenta con una superficie de entrada, por donde entrará el flujo, denominada "*inlet*", junto con una superficie de salida llamada "*outlet*". Junto a ellas, se define la pared inferior, o suelo, y la superficie superior, que no restringirá el movimiento del flujo.



(a) Vista frontal

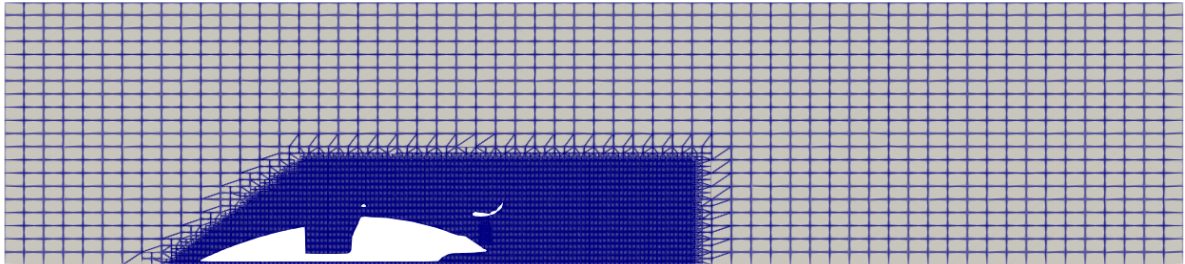


(b) Vista lateral

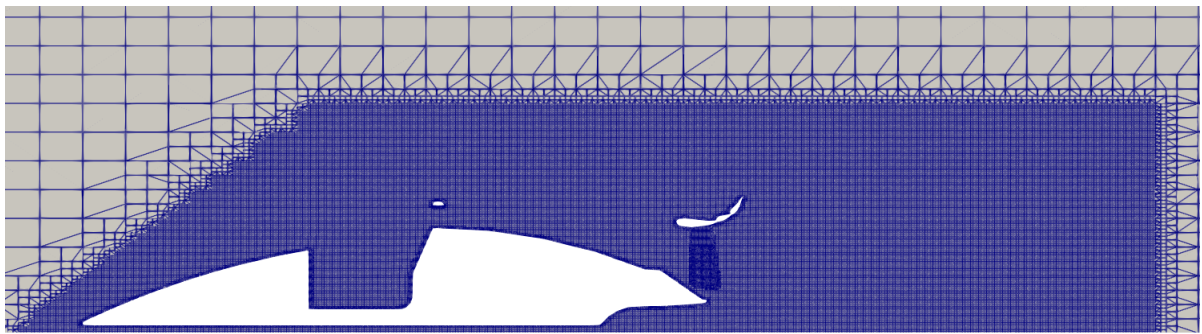
Figura 3.1: Dominio de la simulación en comparación con el tamaño del vehículo

Teniendo en cuenta toda la información descrita sobre la creación de la malla y el refinamiento en el anexo D, se define la malla de simulación para el flujo alrededor del vehículo a estudiar. Para ello, se consideran 5 sólidos, uno para el cuerpo del vehículo, y los 4 restantes conforman las ruedas, siendo un sólido propio cada una de ellas, para así favorecer la imposición de las condiciones de contorno que se verán en la siguiente sección. La malla cuenta aproximadamente con 10^7 celdas, y 2 niveles de refinamiento: uno para la zona cercana al flujo (en forma de cúpula semicilíndrica como el dominio entero, junto con un pequeño recorte al inicio de esta para reducir, en parte, el tiempo de computación), y así capturar lo mejor posible la interacción del flujo con el vehículo, y otro nivel superior para obtener la superficie externa del vehículo completo. De esta forma se espera obtener una

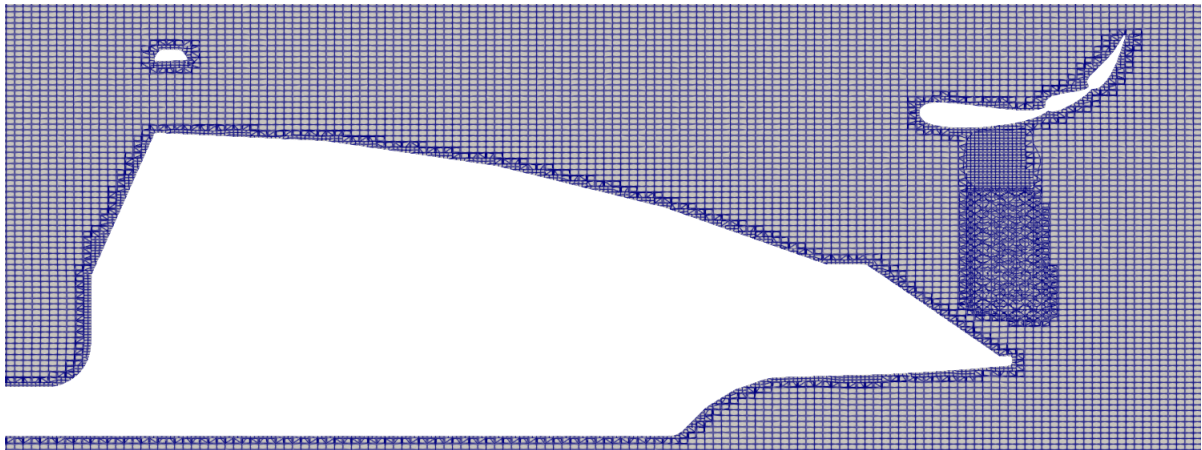
superficie lo más uniforme y precisa posible respecto al modelo CAD del vehículo. El parámetro "*resolveFeatureAngle*" descrito en el anexo D.3 está fijado a 30. En las siguientes ilustraciones se puede apreciar la malla entera y sus distintas zonas:



(a) Diferentes zonas de mallado sobre perfil longitudinal del dominio.

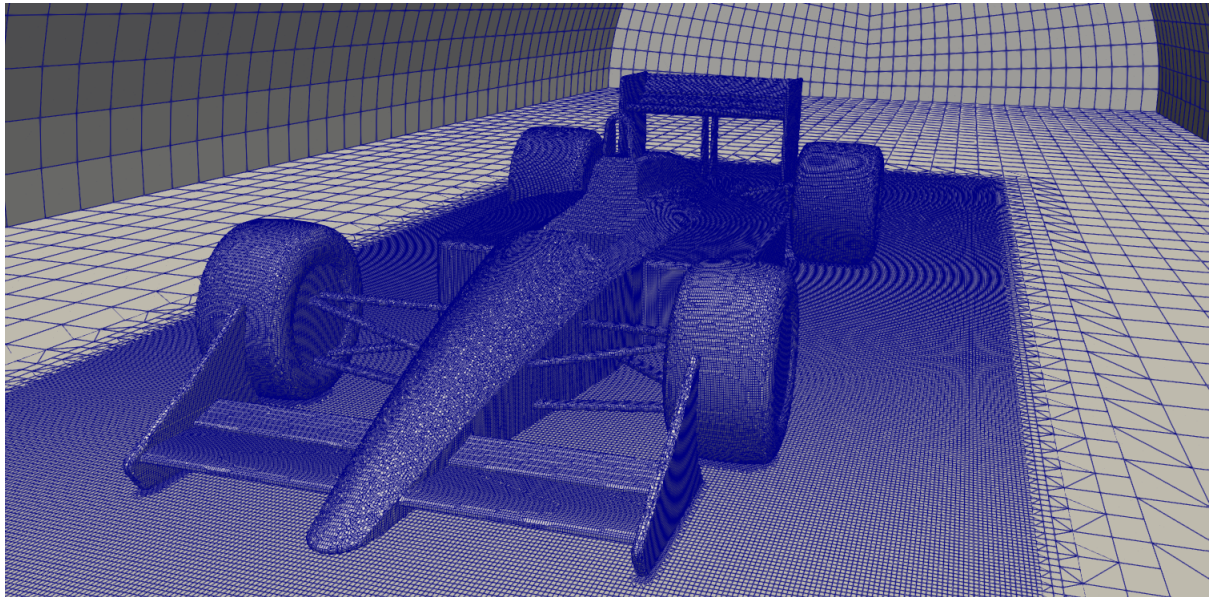


(b) Detalle del refinamiento de la malla en una zona cercana al vehículo.

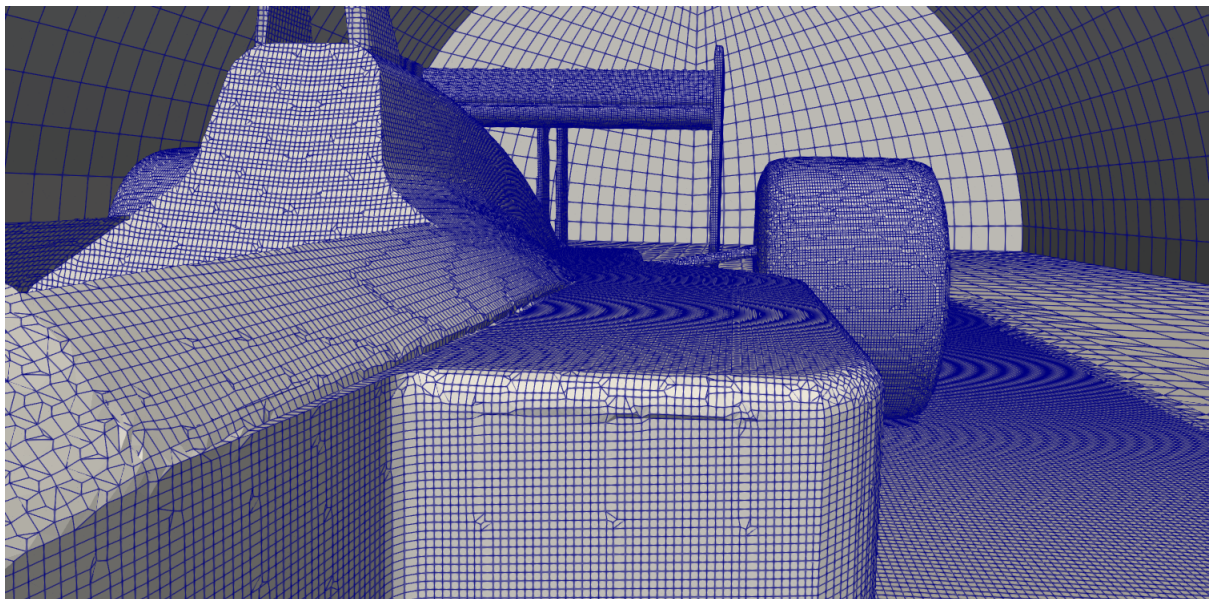


(c) Detalle del refinamiento más fino sobre la superficie del vehículo.

Figura 3.2: Perfil longitudinal de la malla.



(a) Vista general de la malla sobre el vehículo en 3D.



(b) Detalle de la malla sobre el vehículo en 3D.

Figura 3.3: Malla 3D sobre el vehículo.

3.3. Condiciones de contorno, condiciones iniciales y parámetros de la simulación

En las simulaciones, es crucial establecer adecuadamente las condiciones de contorno y las condiciones iniciales junto con otros parámetros de simulación para obtener resultados lo más precisos y útiles.

Las condiciones de contorno son especificaciones que se aplican a los bordes de un dominio y explican cómo interactúa el flujo en las diversas regiones del dominio. Estas condiciones pueden ser de velocidad, presión o temperatura. Las condiciones de contorno pueden ser de varios tipos, incluidas las de superficies de entrada, salida o simetría, entre otras.

Por otro lado, las condiciones iniciales se refieren a las especificaciones del flujo en el momento en que se inicia la simulación. Estas condiciones pueden incluir velocidad o presión inicial o temperatura. Estas son importantes para lograr un estado lo más realista posible y obtener así resultados fiables.

3.3.1. Condiciones de contorno

El trabajo cuenta con 5 sólidos, como se ha indicado en la sección 3.2, uno para el cuerpo o " *body* " del coche, y uno para cada rueda, para así facilitar la imposición de las condiciones de contorno que son las que se recogen en la tabla 3.1. Como regiones, y tal y como se aprecia en la malla de la figura 3.1, se cuenta con una superficie de entrada o " *inlet* " y una de salida o " *outlet* ". Además, entre ellas se sitúan el suelo " *ground* ", y la cara superior con forma de cúpula semicilíndrica " *upperWall* ".

Sólido/Región	Presión	Velocidad	Turbulencia
Body	zeroGradient	noSlip	wallFunction
Ruedas	zeroGradient	rotatingWallVelocity	wallFunction
Inlet	zeroGradient	fixedValue	fixedValue
Outlet	fixedValue	inletOutlet	inletOutlet
Ground	zeroGradient	fixedValue	wallFunction
UpperWall	slip	slip	slip

Tabla 3.1: Condiciones de contorno en las superficies del dominio a simular.

Tal y como se aprecia en la tabla 3.1, cada sólido o región tiene sus propias condiciones de contorno. La condición " *zeroGradient* " implica que el valor del parámetro en el borde de cada sólido es igual al valor en la celda adyacente más cercana, es decir, que no hay flujo de masa o energía a través de esta. Esto supone que el gradiente de la variable en la dirección normal al borde es nulo. Esto delimita una superficie impermeable, la cual el

flujo no puede atravesar.

También se incluyen las condiciones "*slip*" y "*noSlip*", las cuales determinan si la velocidad del flujo en dirección normal a la superficie del sólido o región es nula. De esta forma, la región "*upperWall*" cuenta con una condición "*slip*", ya que únicamente delimita el dominio superior, pero en la realidad se considera un espacio abierto (circuito al aire libre), ya que si no, se comportaría como una pared (similar a un túnel). Por otro lado, el cuerpo cuenta con la condición opuesta, ya que es un sólido que el flujo no puede atravesar.

La condición "*inletOutlet*" combina las condiciones de "*inlet*" y "*outlet*" en una sola condición, especificando una presión constante en la salida del flujo y una velocidad de flujo a la entrada. Esta condición es útil cuando se desea simular un dominio en el que la presión de entrada y salida es conocida, como es este caso (circuito al aire libre), y se desea simular el comportamiento en el interior de éste. Esta condición es más flexible que ambas condiciones por separado, ya que se adapta automáticamente a los cambios de dirección del flujo en el contorno. De esta forma, se imponen valores específicos para la velocidad de entrada y la presión de salida con la condición "*fixedValue*". Además, esta condición también se utiliza para la velocidad del suelo y así obtener una mejor aproximación a la situación real del vehículo, donde la velocidad tanto de la superficie de entrada como la del suelo tiene la misma magnitud pero sentido opuesto a la del vehículo.

Junto a las condiciones de contorno ya descritas, está la condición "*wallFunction*", la cual se refiere al modelado de la capa límite en modelos de turbulencia. Esta permite que los cálculos se realicen sin necesidad de una malla extremadamente refinada en las proximidades de la pared, estableciendo una relación entre la velocidad del flujo y el gradiente de velocidad en la capa límite.

Por último, para obtener una situación más realista, se ha incorporado la condición de contorno "*rotatingWallVelocity*", la cual impone una velocidad de rotación en cada rueda respecto a su eje central [10]. De esta forma, se puede analizar en mejor medida el flujo en torno a ellas.

3.3.2. Condiciones iniciales

En cuanto a las condiciones iniciales, se ha impuesto una velocidad de flujo de 80 m/s , que son casi 290 km/h , que corresponde aproximadamente a la máxima velocidad en recta que un Fórmula 1 podía alcanzar en 1990, en dirección opuesta al vehículo. Esta velocidad también se ha impuesto en el suelo, tal y como se ha descrito en la subsección 3.3.1, con la misma magnitud que en la superficie de entrada. Además, la presión en la salida se ha fijado a 101325 Pa , que es la presión atmosférica. La viscosidad cinemática es la del aire a 18°C , es decir, $1,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Por último, se definen los parámetros de energía cinética turbulenta y el coeficiente de disipación de la energía turbulenta, que están relacionados con el modelo de turbulencia k-w SST explicado en el anexo B.3. La energía cinética turbulenta k puede estimarse como:

$$k = \frac{3}{2}(I|u_{ref}|)^2 \quad (3.3)$$

donde I es la intensidad turbulenta y u_{ref} es la velocidad de referencia, que en nuestro trabajo es 80 m/s , como se ha especificado previamente. La intensidad turbulenta depende del nivel de turbulencia de la simulación. En este trabajo, se supone un nivel de turbulencia bajo, inferior al 1 %. Como resultado, se obtiene $k = 0,015 \text{ J/kg}$. Por otro lado, el coeficiente de disipación de la energía turbulenta w se define como:

$$w = \frac{\sqrt{k}}{C_\mu L} \quad (3.4)$$

donde k es la energía cinética turbulenta definida previamente, C_μ es una constante cuyo valor es 0.09, y L es la longitud de referencia del vehículo que es 5 metros. Como resultado se obtiene $w = 0,2722 \text{ J} \cdot \text{s}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$.

3.4. Convergencia de la simulación

La convergencia es un concepto fundamental en la simulación CFD. Se refiere al estado en el que los resultados de la simulación se estabilizan y no cambian significativamente con un aumento en la resolución o el número de iteraciones. Es decir, una simulación CFD se considera convergente cuando los resultados numéricos alcanzan un equilibrio y las fluctuaciones en los valores de las variables físicas son pequeñas y no afectan significativamente a los resultados finales. La convergencia es esencial, ya que garantiza que los resultados sean precisos y confiables. Si la simulación no es convergente, los resultados pueden ser inexactos o incluso incorrectos, pudiendo ser totalmente distintos a los que se obtendrían en la realidad.

Para ello, inicialmente se realizan las simulaciones imponiendo un número alto de iteraciones, para observar cuándo se alcanza la convergencia de las variables a estudiar, como por ejemplo, el coeficiente de sustentación C_d . En este caso, se comenzó imponiendo 2000 iteraciones (ver figura 3.4). Durante las primeras iteraciones se observa como el valor de este coeficiente oscila con una amplitud muy grande hasta que, en torno a las 500 iteraciones y hasta las 1000, la amplitud decrece y entre las 1000 y las 2000 la amplitud de las oscilaciones es tan pequeña que se puede decir que ya ha alcanzado la convergencia en los resultados en torno a un valor medio que será el que se tome como valor real para esa variable.

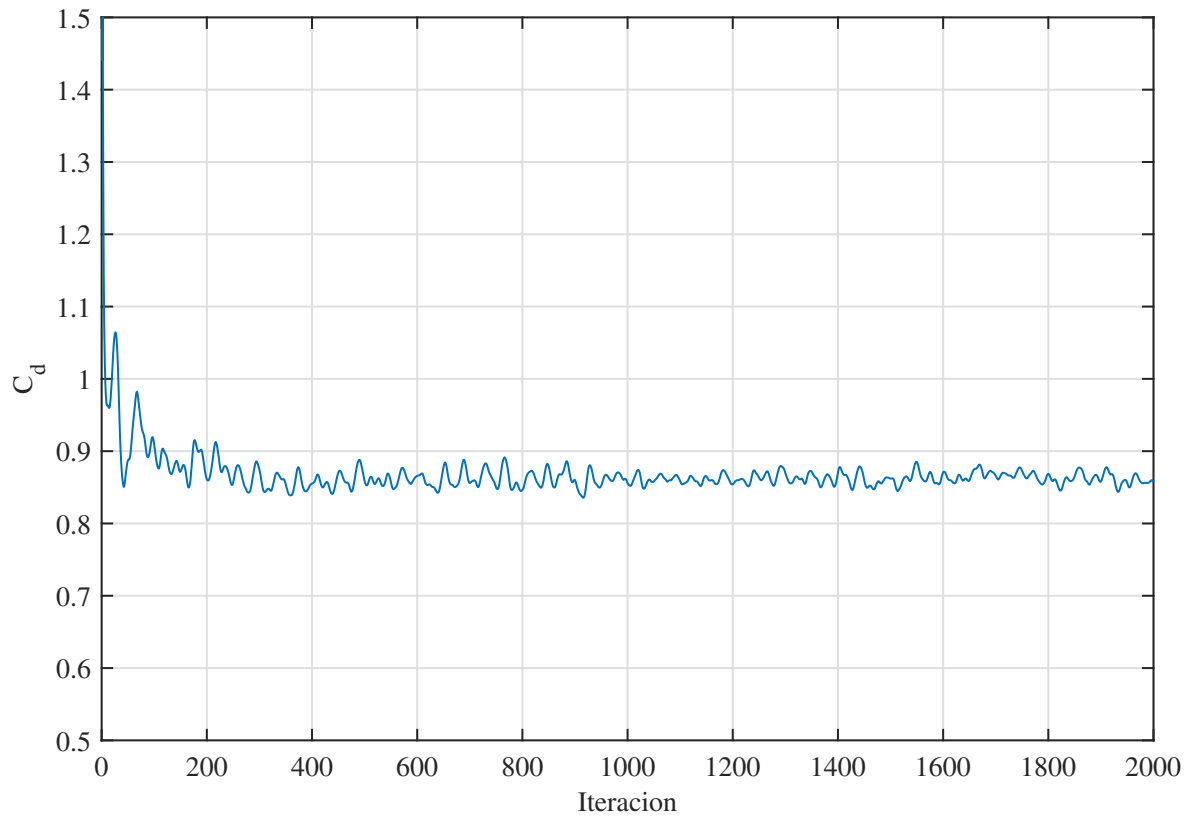


Figura 3.4: Valores del coeficiente de sustentación frente al número de iteraciones durante una simulación para mostrar la convergencia de la solución.

Por este motivo, y con el fin de acortar el tiempo de cálculo, se procederán a simular todos los casos analizados en este trabajo con 1000 iteraciones.

4 | Resultados numéricos

En este capítulo se presentan los resultados numéricos obtenidos de la simulación del modelo original de vehículo y de las modificaciones propuestas 4, 6 y 8, por ser las que presentan mayores diferencias.

4.1. Análisis del modelo original del McLaren MP4/4

En esta subsección se van a analizar los resultados numéricos obtenidos tras la simulación del modelo original del McLaren MP4/4 con la malla descrita en 3.3, las condiciones iniciales especificadas en la subsección 3.3.2 y las condiciones de contorno detalladas en la tabla 3.1. Una vez se alcanza la convergencia en el estado estacionario, los valores de coeficientes y fuerzas aerodinámicas se recogen en la tabla 4.1.

Coeficiente	Valor	Fuerza	Valor
C_d	0,884	F_d	3465 N
C_l	-2,504	F_l	-12760 N

Tabla 4.1: Valores de coeficientes y fuerzas aerodinámicas obtenidas en la simulación del modelo original de McLaren MP4/4.

Para poder analizar estos valores, se indica que, un automóvil actual alcanza un coeficiente de arrastre entre 0,25 y 0,4, todoterrenos entre 0,35 y 0,45, Fórmula 1 entre 0,7 y 1,1; mientras que el coeficiente de sustentación no se considera un factor tan relevante en este tipo de vehículos.

Tal y como se puede observar, en este caso, el coeficiente de arrastre se encuentra dentro de los límites que nos indica la bibliografía, y el coeficiente de sustentación C_l (ver anexo A.4.4) tiene signo negativo, ya que el vehículo genera *downforce* gracias al principio de Bernoulli que se explica en el anexo A.4.3.

Además, se introduce el concepto de eficiencia aerodinámica (E), que consiste en la división entre el coeficiente de sustentación (C_l) y el coeficiente de arrastre (C_d), o también

llamado polar del perfil, que expresa la efectividad aerodinámica total del vehículo, siendo un coeficiente útil para comparar la eficacia entre dos vehículos.

En el modelo original, se obtiene una eficiencia aerodinámica $E = 2,833$. En la figura 4.1, se puede observar la distribución de ambos coeficientes de forma acumulativa a lo largo del coche, donde el color azul se refiere al coeficiente de arrastre (C_d), y el color rojo al coeficiente de sustentación (C_l).

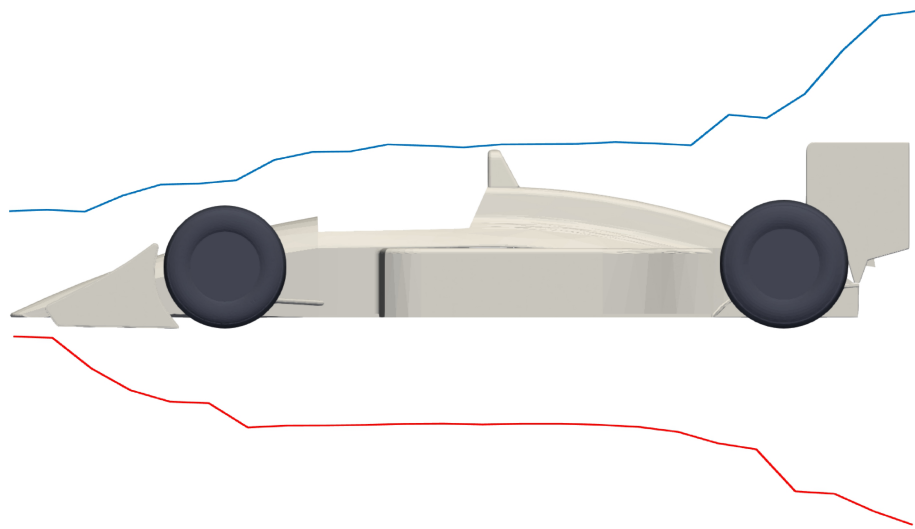
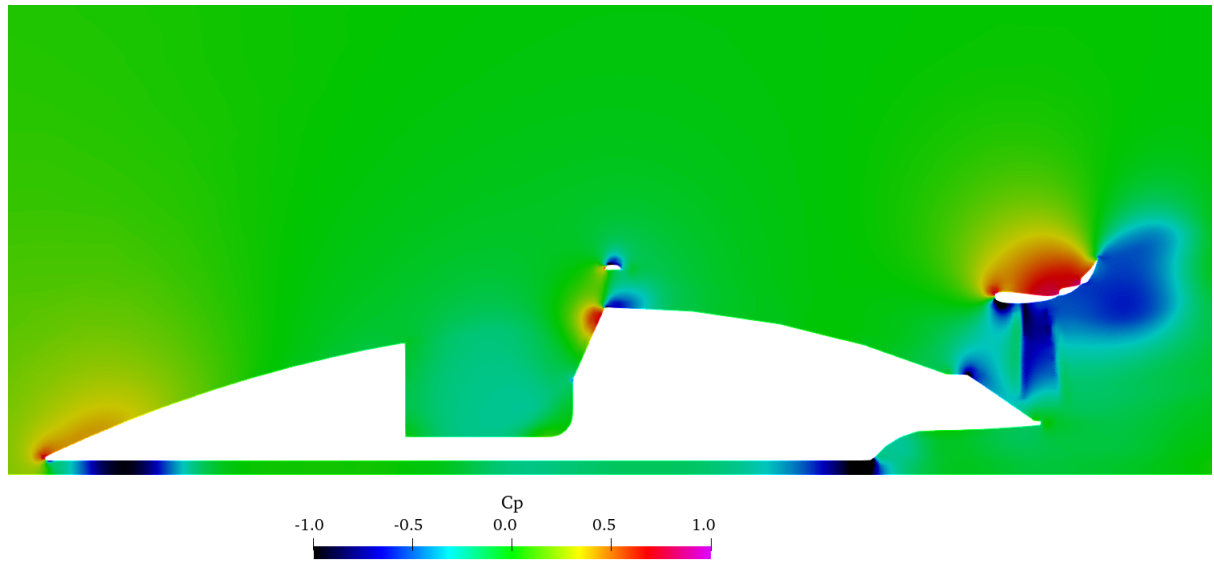


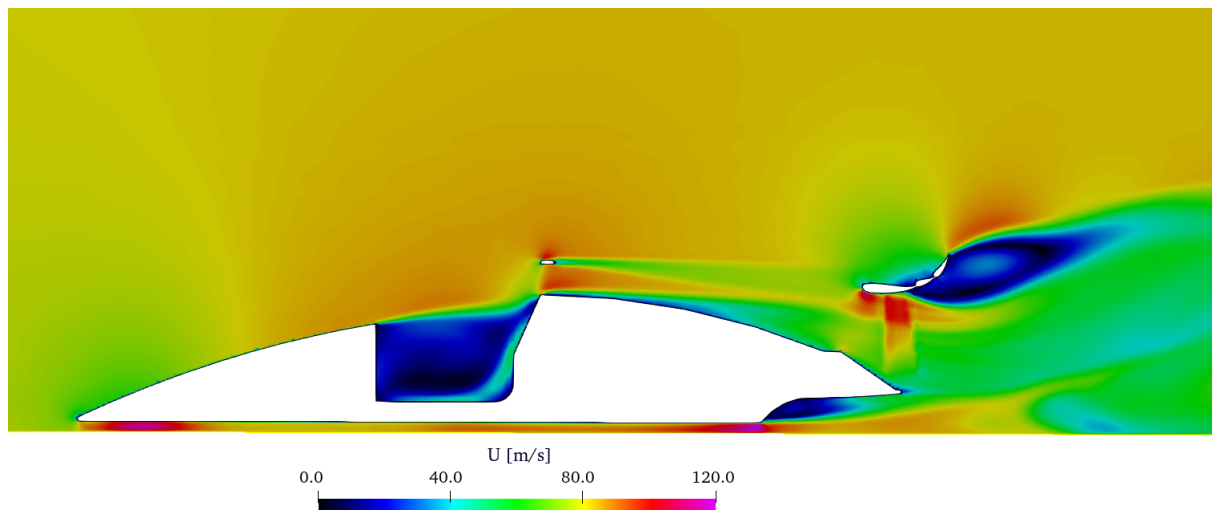
Figura 4.1: Valores de los coeficientes de arrastre (azul) y sustentación (rojo) acumulativos a lo largo del perfil del vehículo.

Tal y como se observa en esta figura, los alerones son los que más carga aerodinámica generan, y consecuentemente más resistencia aerodinámica. La nariz genera en su parte final una ligera resistencia aerodinámica, mientras que la parte central del vehículo apenas contribuye a ambos coeficientes.

Para obtener una información más precisa de la interacción del flujo con el vehículo, en la figura 4.2b se analiza la sección central del perfil longitudinal del modelo, en términos de velocidades y presiones, ya que es la sección más relevante para el estudio de la nariz del modelo propuesto. En esta figura, el campo de presiones se representa de forma adimensionalizada.



(a) Perfil longitudinal del campo de presiones.



(b) Perfil longitudinal del campo de velocidades.

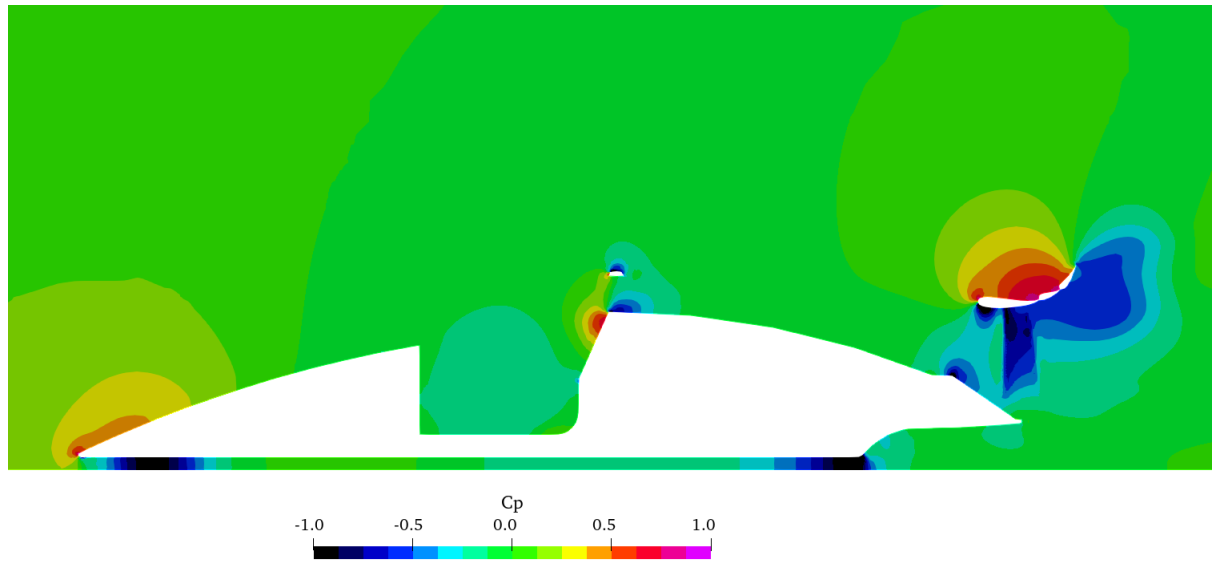
Figura 4.2: Campo de presiones (a) y velocidades (b) en una sección longitudinal del flujo de aire alrededor del modelo original del vehículo.

En la figura 4.2 se observa el gradiente de presiones entre zonas que genera una fuerza de sustentación en la zona de altas presiones a la de bajas presiones, con la consecuente aceleración del flujo y *downforce*. En la imagen a), las zonas de bajas presiones corresponden a la superficie inferior del alerón trasero, parte inferior del comienzo de la nariz, y en el final del fondo plano, que son las que generan mayor carga aerodinámica. Este efecto también se refleja en el campo de velocidades, donde la velocidad del flujo en estas zonas es superior a la de flujo libre. Resalta también la aceleración del flujo a través de la

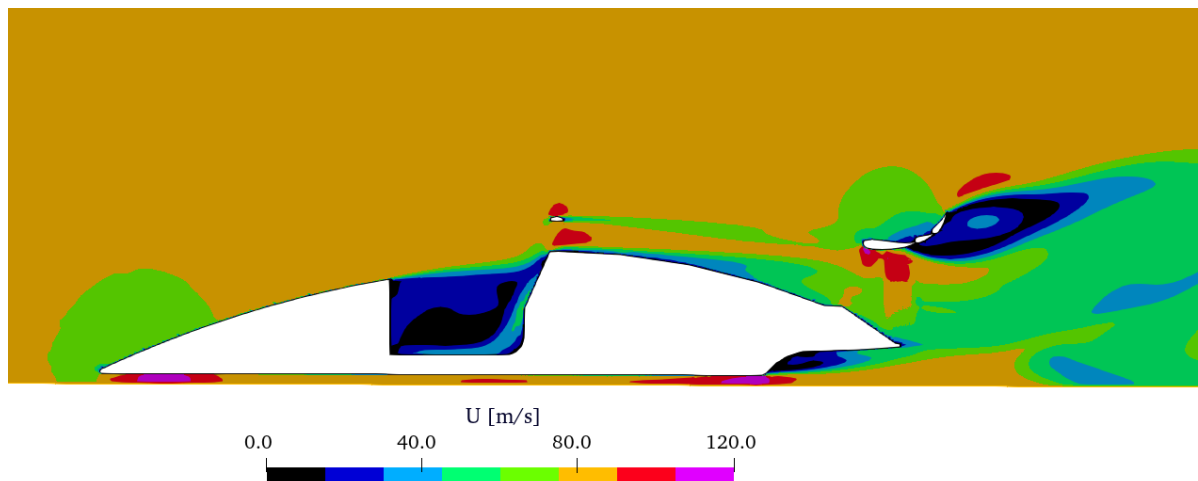
protuberancia justo por encima del asiento, que evita que el desprendimiento de la capa límite del flujo (ver anexo A.5) sea excesivo.

Además, cabe destacar también la región turbulenta que genera el *cockpit* o asiento, debido al desprendimiento de la capa límite, generando una zona de baja presión y un efecto de succión, al igual que ocurre por detrás del vehículo. Junto a ellas, las zonas con las que el flujo tiene mayor choque frontal son el inicio de la nariz y la parte superior del asiento, ya que la presión es superior a la inicial. Todas estas zonas generan una mayor fuerza de resistencia y por ende tienen una mayor contribución al coeficiente de arrastre (C_d).

En la figura 4.3, se presentan los mismos resultados pero estableciendo 8 intervalos constantes de variación de las magnitudes a analizar: presión y velocidad; para ver de forma más clara las zonas donde existen cambios importantes en ambas variables respecto a sus valores iniciales.



(a) Perfil longitudinal del campo de presiones.



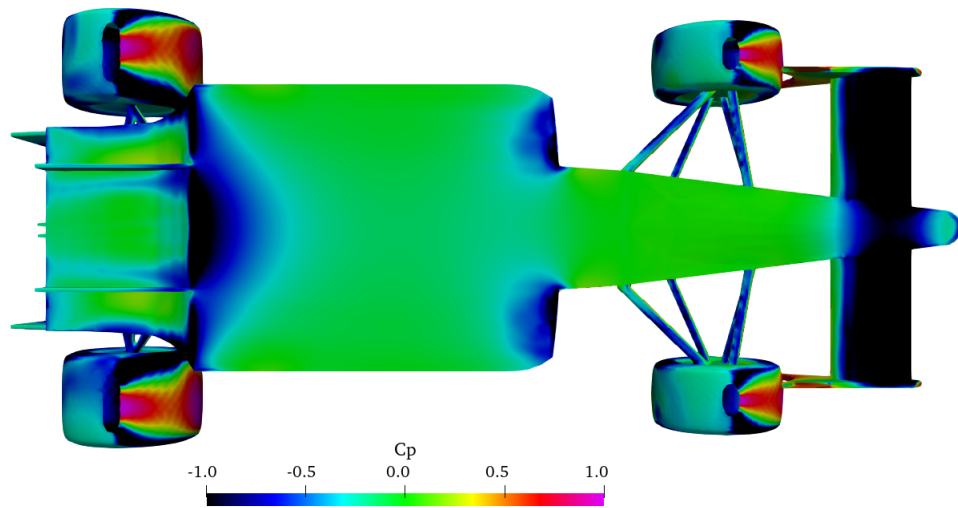
(b) Perfil longitudinal del campo de velocidades.

Figura 4.3: Campo de presiones a) y velocidades b) en una sección longitudinal del flujo de aire alrededor del modelo original de vehículo dividido el rango de variación de cada variable en 8 intervalos iguales.

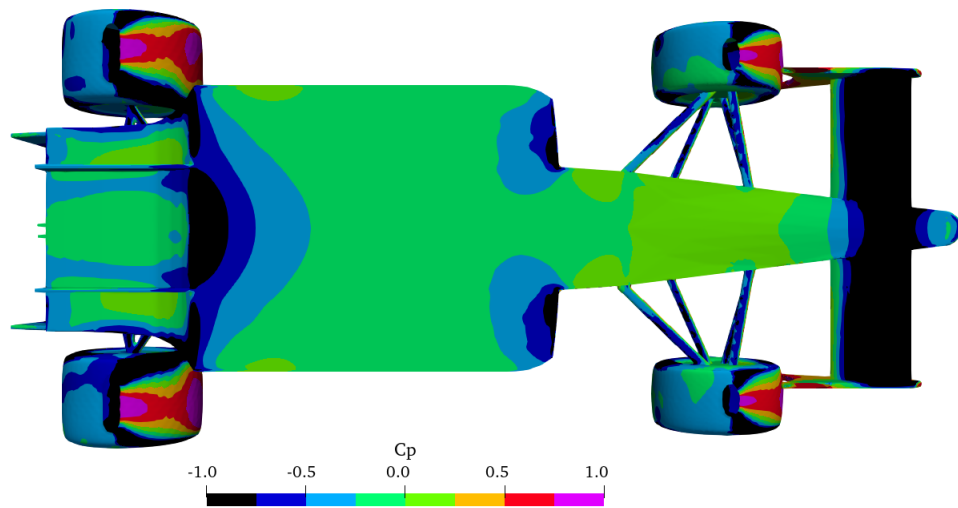
Una vez presentado el análisis de resultados a lo largo de una sección longitudinal del vehículo, se presta atención a los valores que toma la presión en el fondo del mismo; ya que desempeña un papel crucial en la generación de *downforce* (ver anexo A.4.3), y que, junto a los alerones, es el encargado de generar la zona de bajas presiones en la superficie inferior del vehículo.

Para analizar el comportamiento del flujo a través de esta superficie, se ilustra el campo

de presiones adimensionalizado en la parte inferior del vehículo en la figura 4.4, siendo la subfigura 4.4a la representación con una amplia escala de colores y la subfigura 4.4b una representación dividiendo el rango total de variación de la presión en el fondo en 8 intervalos iguales, al igual que se ha realizado con anterioridad.



(a) Campo de presiones en el fondo del modelo original de vehículo.

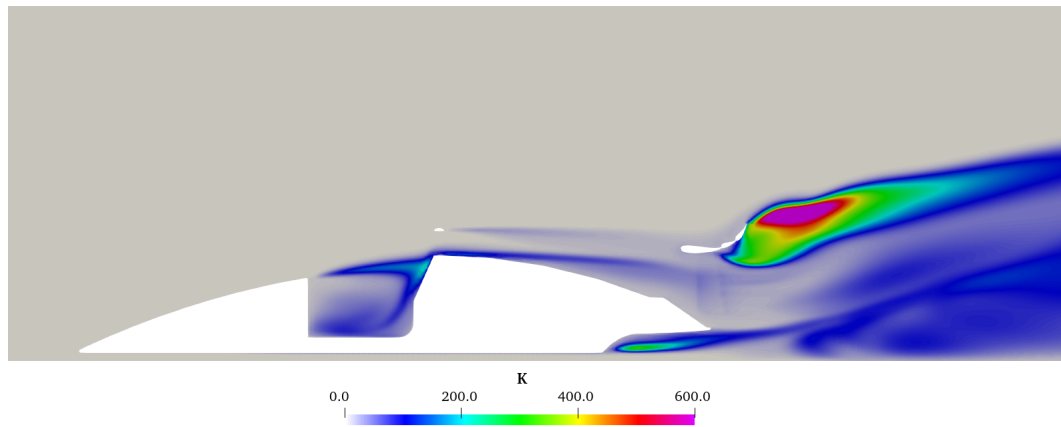


(b) Campo de presiones en el fondo del modelo original de vehículo dividiendo el rango total en 8 intervalos iguales.

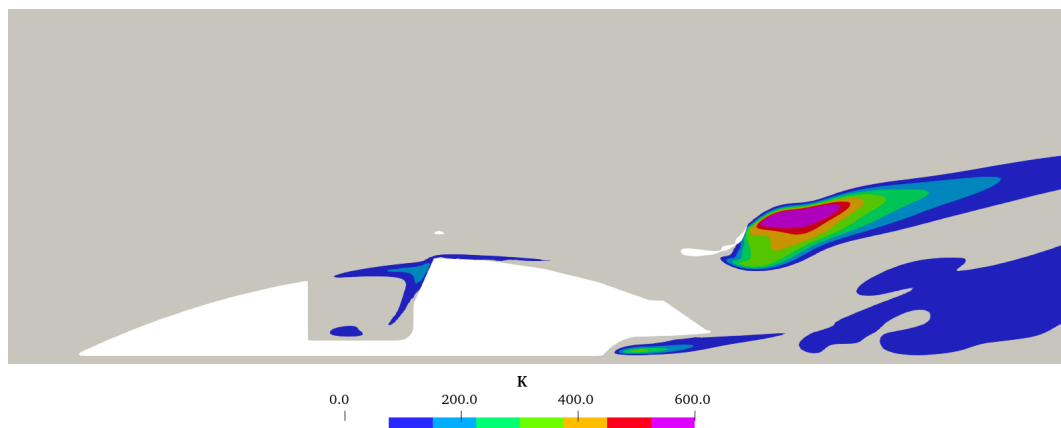
Figura 4.4: Campo de presiones simulado en el fondo plano del vehículo con diferentes representaciones gráficas: escala amplia de colores a) y 8 intervalos iguales de variación b).

En esta figura, se observa como el alerón delantero, el difusor final, y la superficie del final de la nariz, contribuyen en mayor parte a la generación de *downforce*, justificando la aceleración en las zonas coincidentes del flujo de las subfiguras 4.2b y 4.3b. Además, se aprecia una presión ligeramente superior en el centro de la nariz, lo que hace que la aceleración del flujo que proviene del principio (zona negra) disminuya en cierta medida, y por ende provoque una pérdida de carga aerodinámica en esta zona.

De la misma manera, se analiza la energía cinética turbulenta de este perfil longitudinal, tanto en escala amplia de colores como en 8 intervalos iguales, al igual que las imágenes anteriores.



(a) Energía cinética turbulenta del modelo original de vehículo.



(b) Energía cinética turbulenta del modelo original de vehículo dividiendo el rango total en 8 intervalos iguales.

Figura 4.5: Energía cinética turbulenta del vehículo con diferentes representaciones gráficas: escala amplia de colores a) y 8 intervalos iguales de variación b).

La mayor parte de la energía cinética turbulenta se genera en el alerón trasero, debido a

la alta velocidad y a la presión del aire que fluye alrededor de él. Además, las zonas donde se produce una separación de la capa límite (ver anexo A.5) son las que tienen mayor energía cinética turbulenta, donde el flujo se acelera y la capa límite se vuelve turbulenta. Junto a estas, las zonas donde se producen vórtices, como en el asiento, donde existen recirculaciones, también pueden tener una alta energía cinética turbulenta debido a la turbulencia generada por los vórtices.

Por último, la figura 4.6 muestra las líneas de corriente (ver anexo A.3) procedentes de una sección longitudinal del alerón delantero. Se puede apreciar la aceleración y deceleración del flujo en las superficies superior e inferior respectivamente del perfil alar del alerón delantero. Además, se ve como se desvían en los brazos de la suspensión, y como luego, parte del flujo se dirige al fondo plano y otra se desvía por el lateral y por encima del vehículo. El flujo desviado por el lateral se ve afectado por la rotación de las ruedas traseras, mientras que el flujo desviado por encima del vehículo es reconducido al alerón trasero, a partir del cual se forma un régimen turbulento debido a los vórtices generados.

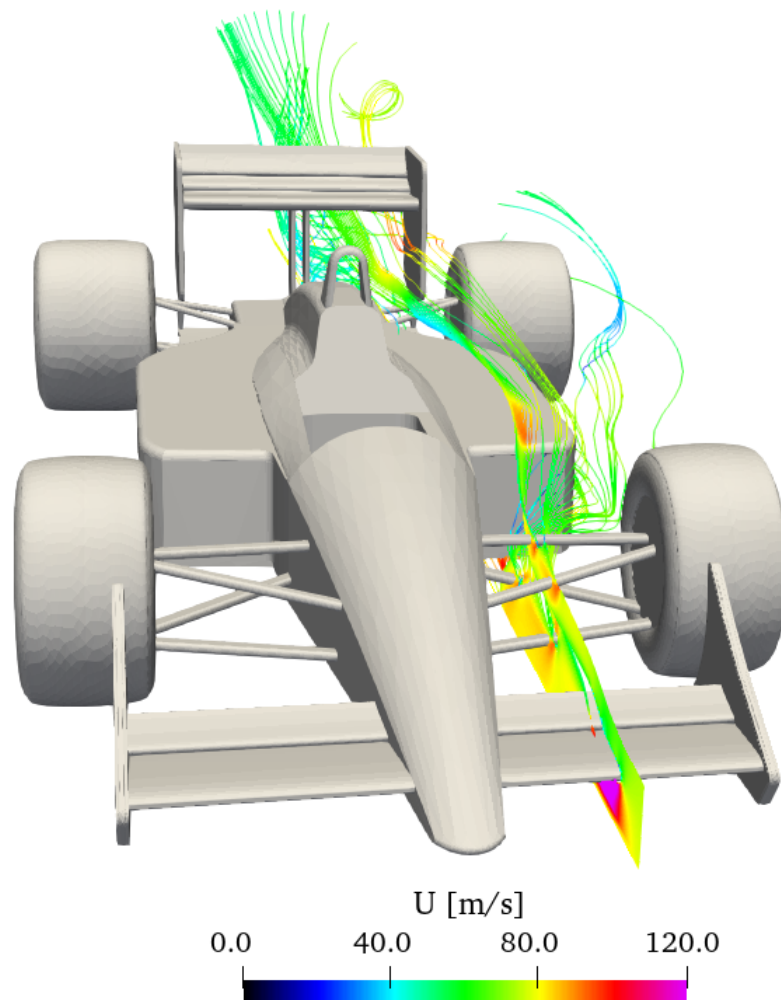


Figura 4.6: Detalle de las líneas de corriente del alerón delantero en el modelo original de vehículo.

Una vez analizados los valores de las variables simulados con la configuración original del McLaren MP4/4, se ha procedido a modificar ciertos componentes de la parte delantera del vehículo, con especial interés en la nariz del mismo, para buscar la optimización del rendimiento aerodinámico y conseguir un modelo de vehículo que proporcione mayor rendimiento en la competición, objetivo del trabajo. Además de actuar sobre la nariz, se deciden proponer mejoras también en la parte inferior del vehículo.

Los detalles de los resultados numéricos de simulación obtenidos para todas las modificaciones se pueden encontrar en el anexo C, y en la memoria principal. A continuación, se plasman los resultados numéricos de las configuraciones que marcan una diferencia sustancial respecto al modelo original: configuraciones 4, 6 y 8.

4.2. Análisis de resultados tras la modificación 4

La modificación 4, cuyas características se muestran en la tabla 2.1, y definida en detalle en el anexo C, cuenta con una nariz en forma de perfil alar [1], similar al utilizado habitualmente en los alerones, y se caracteriza por ser capaz de generar gran cantidad de *downforce*. Además, la anchura de la parte más estrecha de la nariz, se amplía, y se diseña la conexión de esta con el alerón delantero en forma del mismo perfil alar que el alerón. Además, las superficies de unión entre la nariz y el asiento se eliminan.

Tras la simulación numérica, usando el mismo tipo de malla descrita en la sección 3.2 y las mismas condiciones iniciales y de contorno que el vehículo original, definidas en la subsección 3.3, se alcanza la convergencia a un estado estacionario recogido en la figura 4.7 y arroja los valores de coeficientes y fuerzas aerodinámicas recogidos en la tabla 4.2, obteniéndose una eficiencia aerodinámica $E = 2,601$.

Coeficiente	Valor	Fuerza	Valor
C_d	0,860	F_d	3371 N
C_l	-2,237	F_l	-11400 N

Tabla 4.2: Valores de coeficientes y fuerzas aerodinámicas obtenidas en la simulación tras la modificación 4.

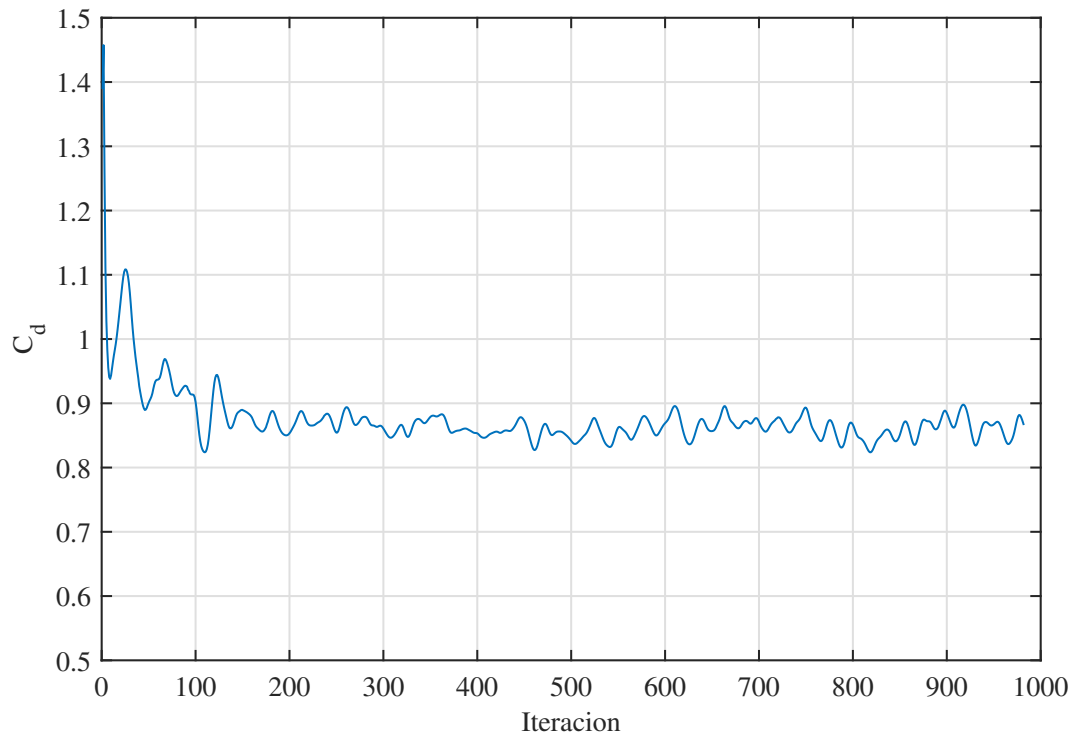


Figura 4.7: Valores del coeficiente de sustentación frente al número de iteraciones durante una simulación para mostrar la convergencia de la solución.

En la siguiente figura, 4.8, se puede observar la distribución de los coeficientes de arrastre (parte superior) y sustentación (parte inferior) de la tabla 4.2 de forma acumulativa a lo largo del vehículo original (superior) y tras la modificación 4 (inferior).

Si se observa la distribución del coeficiente de arrastre (C_d) a lo largo del vehículo, al inicio, es prácticamente idéntica. Sin embargo, ambas difieren en el final de la nariz, justo al comenzar el *cockpit*, donde la modificación 4 muestra menos resistencia al aire. Esta mejora se ve contrarrestada al llegar a la zona del asiento, donde tal y como se ve posteriormente, en la figura 4.9, existe un mayor choque frontal del flujo con el vehículo, incrementando el C_d . En el final del fondo plano (difusor), la modificación 4 muestra mejores resultados, al incrementar en menor medida el coeficiente de arrastre, en comparación con el modelo original, llegando al mismo valor y compensando la zona previamente descrita del asiento. En la parte final, el coeficiente aumenta en la misma medida. No obstante, la modificación 4 arroja mejores resultados justo en el final del vehículo, obteniendo un valor menor para el coeficiente de arrastre (tabla 4.2), y por tanto mejor respecto al modelo original (4.1).

En cuanto al coeficiente de sustentación (C_l), el comportamiento es bastante distinto entre ambos modelos. La modificación 4 muestra un aumento más uniforme de la *downforce* generada, ya que la forma del perfil alar de la nariz induce a este fenómeno. Sin embargo, la mayor *downforce* se genera al principio, gracias al alerón y a la zona de baja presión originada por la nariz (ver figura 4.2a). Estos coeficientes prácticamente se igualan al llegar al difusor, ya que al contrario que en el modelo original, el fondo plano de la configuración

va generando *downforce* progresivamente. El difusor y el alerón trasero tienen un mejor resultado en el modelo original, generando más fuerza de sustentación.

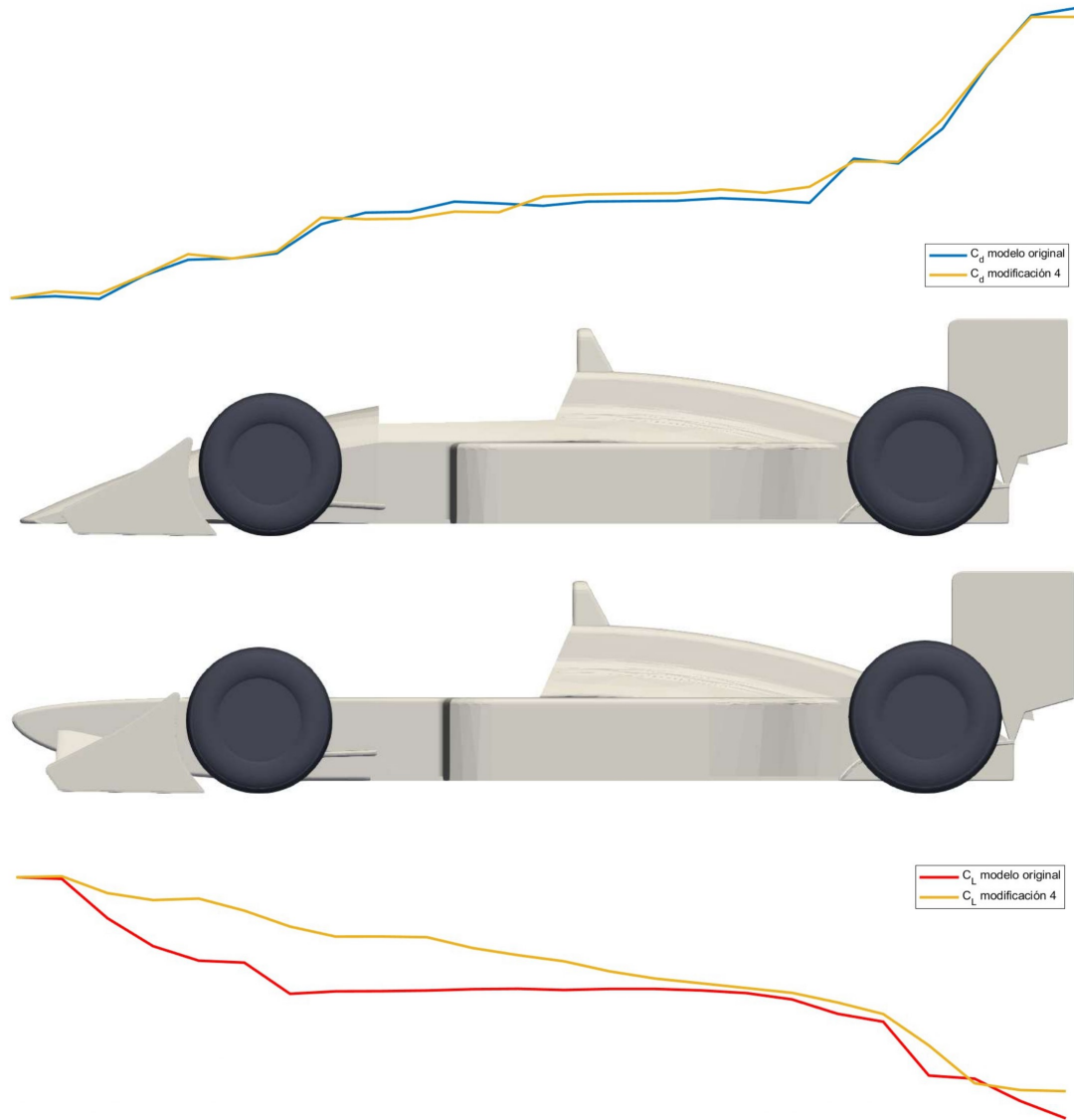
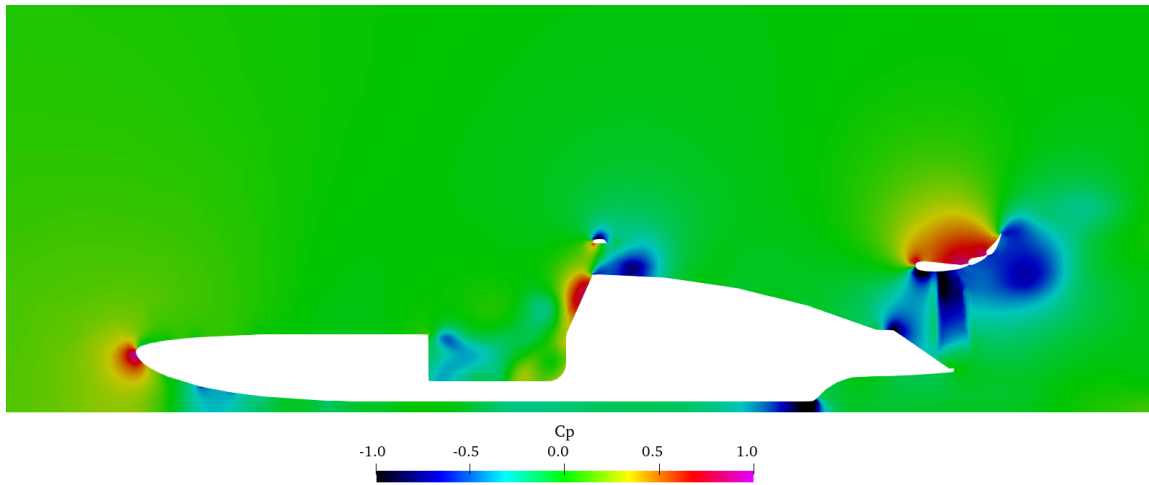
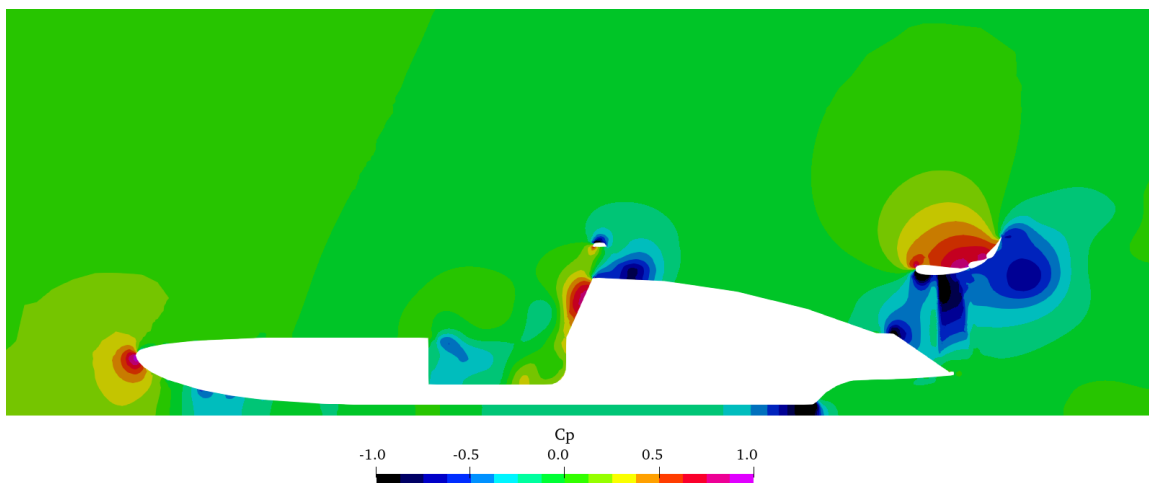


Figura 4.8: Comparación de los coeficientes de arrastre (parte superior) y sustentación (parte inferior) acumulativos a lo largo de los dos modelos.

Para saber más acerca de las diferencias de la modificación 4 respecto al vehículo original, se presenta la figura 4.9, que representa el campo de presiones en escala amplia y reducida de colores, y la imagen 4.10, que representa el campo de velocidades siguiendo el mismo método que en el análisis original 4.1, en el perfil longitudinal de la sección central del vehículo.



(a) Perfil longitudinal del campo de presiones.



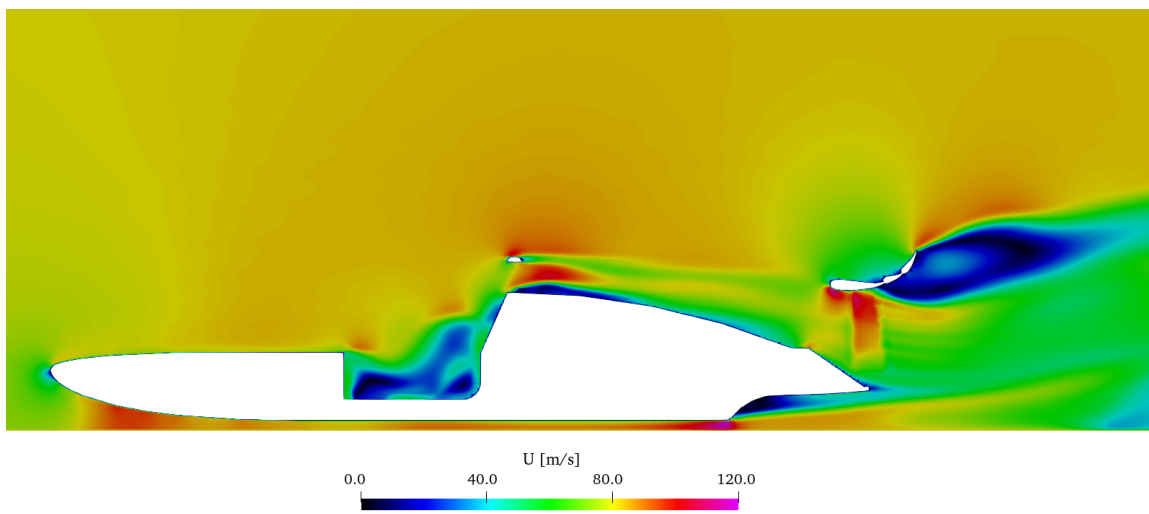
(b) Perfil longitudinal del campo de presiones en escala reducida de colores.

Figura 4.9: Campo de presiones en escala amplia a) y escala reducida b) en una sección longitudinal del flujo de aire alrededor de la configuración 4.

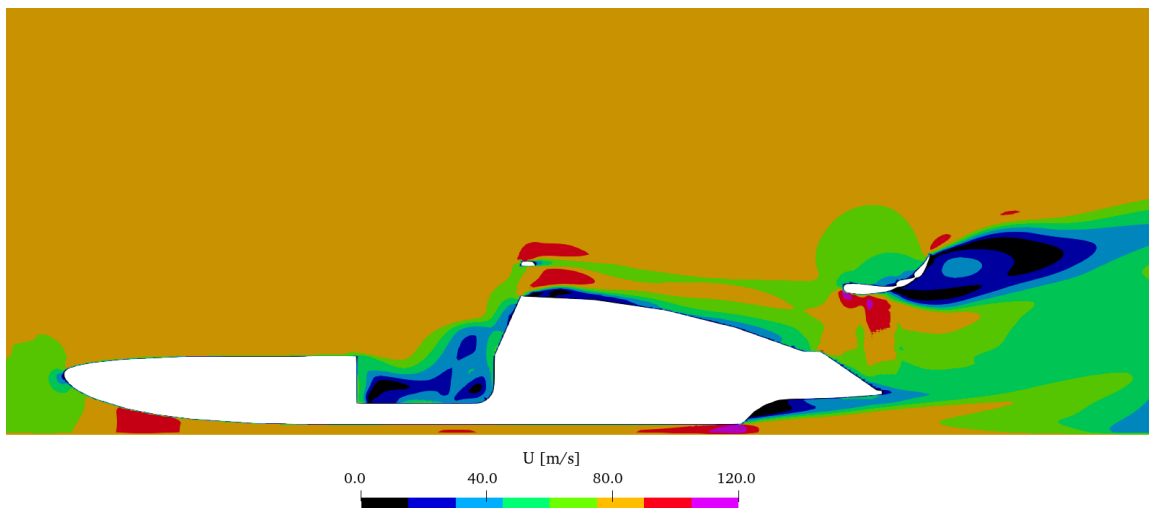
En la figura 4.9, se pueden apreciar varias diferencias respecto a las figuras 4.2a y 4.3a. En primer lugar, la presión al principio de la nariz es distinta debido al cambio del punto de remanso (ver sección 2.3.1), provocando también que la zona de bajas presiones de la nariz original disminuya bastante, por lo que la *downforce* generada en esta zona será inferior, de ahí una de las razones por las que el C_l de la tabla 4.2 sea inferior al del vehículo original de la tabla 4.1. Además, la presión en la parte superior del asiento es mayor tras la modificación 4, ya que es donde el flujo de aire tiene la mayor parte del choque frontal debido a la planitud del final de la nariz, en vez de ser progresivo como en el modelo original. Esta forma también repercute en la presión en el interior del *cockpit*, siendo menos uniforme y provocando mayor turbulencia, como se ve posteriormente en la

figura 4.12. La parte trasera se comporta de forma similar al vehículo original, ya que no ha cambiado su geometría (ver anexo C).

Todo ello también se ve reflejado en la figura 4.10. Al tener un menor gradiente de presiones en el principio de la nariz, la aceleración del flujo en esta zona es inferior, y por ende genera menos *downforce*. Asimismo, la zona turbulenta en el *cockpit* es mayor, ya que la zona de bajas velocidades es menos uniforme. Cabe destacar también una mayor aceleración del flujo en la protuberancia de la parte superior del asiento, logrando un re-enganche del flujo al vehículo. Al igual que en el campo de presiones, el comportamiento en la parte trasera del vehículo es prácticamente idéntico al modelo original.



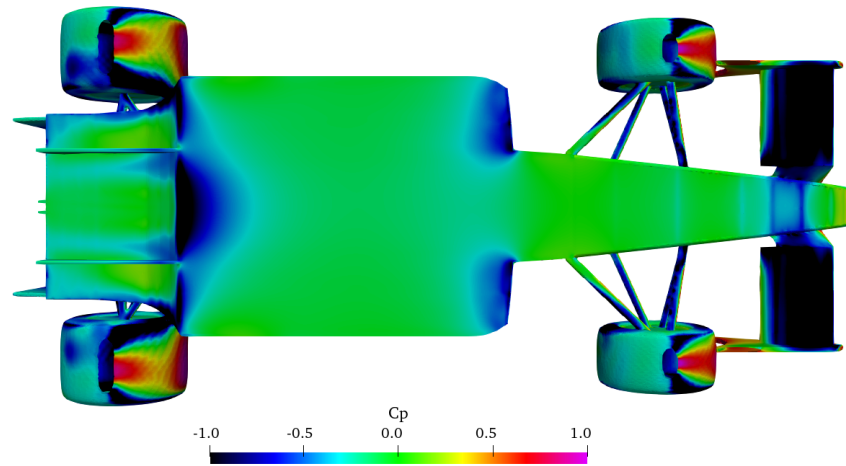
(a) Perfil longitudinal del campo de velocidades.



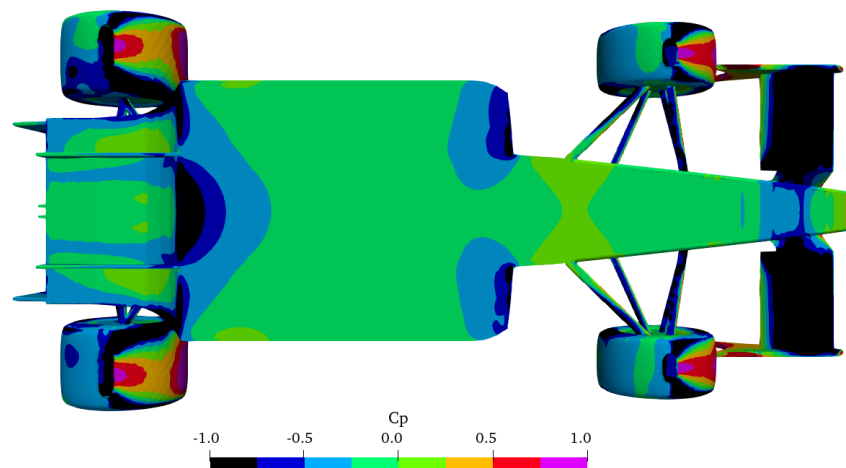
(b) Perfil longitudinal del campo de velocidades en escala reducida de colores.

Figura 4.10: Campo de velocidades en escala amplia a) y escala reducida b) en una sección longitudinal del flujo de aire tras la modificación 4.

Asimismo, en la figura 4.11 se puede apreciar el campo de presiones adimensionalizado en la zona del fondo plano tras la modificación 4. Se puede observar que la parte trasera se comporta de manera similar al modelo original de la figura 4.4. Sin embargo, la presión al comienzo de la nariz y al inicio del fondo plano es bastante superior en la modificación 4, generando menos *downforce*, como se ha explicado anteriormente.



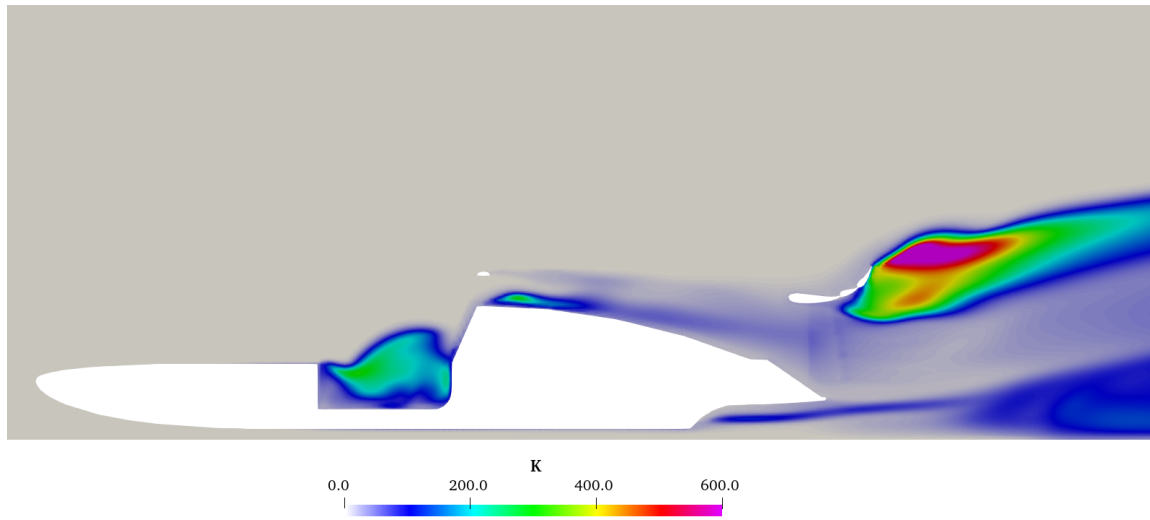
(a) Campo de presiones en el fondo tras la modificación 4.



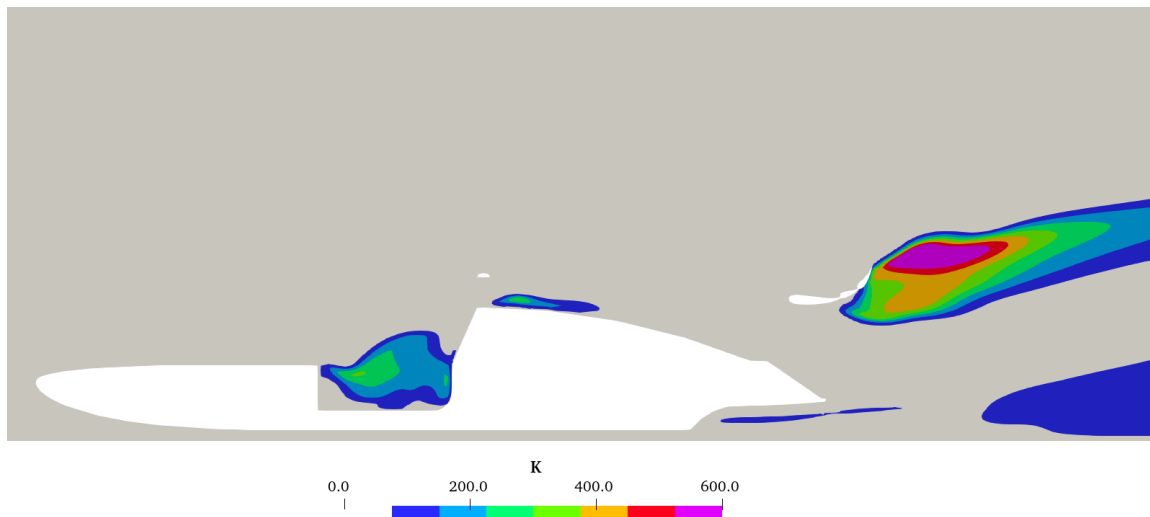
(b) Campo de presiones en el fondo tras la modificación 4, dividiendo el rango total en 8 intervalos iguales.

Figura 4.11: Campo de presiones simulado en el fondo plano tras la modificación 4 con diferentes representaciones gráficas: escala amplia de colores a) y 8 intervalos iguales de variación b).

De la misma manera, si se analiza la energía cinética turbulenta en el perfil longitudinal del vehículo tras la modificación 4, y se compara con el modelo original, se observa que la diferencia en la k del alerón trasero es prácticamente nula. Sin embargo, en la zona del asiento tras la modificación 4, se tiene mayor energía cinética turbulenta que en el modelo original, y se distribuye de forma distinta. Por otro lado, la energía cinética tras el difusor se reduce bastante con respecto al modelo original, siendo una de las causas por las que el C_d varía entre ambos vehículos.



(a) Energía cinética turbulenta de la configuración 4.



(b) Energía cinética turbulenta de la configuración 4 dividiendo el rango total en 8 intervalos iguales.

Figura 4.12: Energía cinética turbulenta de la configuración 4 con diferentes representaciones gráficas: escala amplia de colores a) y 8 intervalos iguales de variación b).

Por último, la figura 4.13 muestra las líneas de corriente procedentes del mismo punto que la figura 4.6, para observar cómo varían las líneas de corriente en las distintas modificaciones. Al igual que la figura 4.6, el alerón acelera el flujo en su superficie inferior y lo decelera en su superficie superior generando *downforce*. Sin embargo, a la hora de desviarse el flujo en los brazos de suspensión, se aprecia como un menor porcentaje de líneas de corriente se redirigen hacia el fondo plano, explicando la disminución de *downforce* generada y explicando la diferencia del campo de presiones del fondo plano de la modificación 4 de la figura 4.11 en comparación con el modelo original de la figura 4.4. Además, la cantidad de flujo desviado hacia el lateral es menor, donde en vez de ladear la rueda trasera, se redirige por encima de esta. Asimismo, la cantidad de flujo que se dirige al alerón trasero es mayor, al haber mayor cantidad de líneas de corriente.

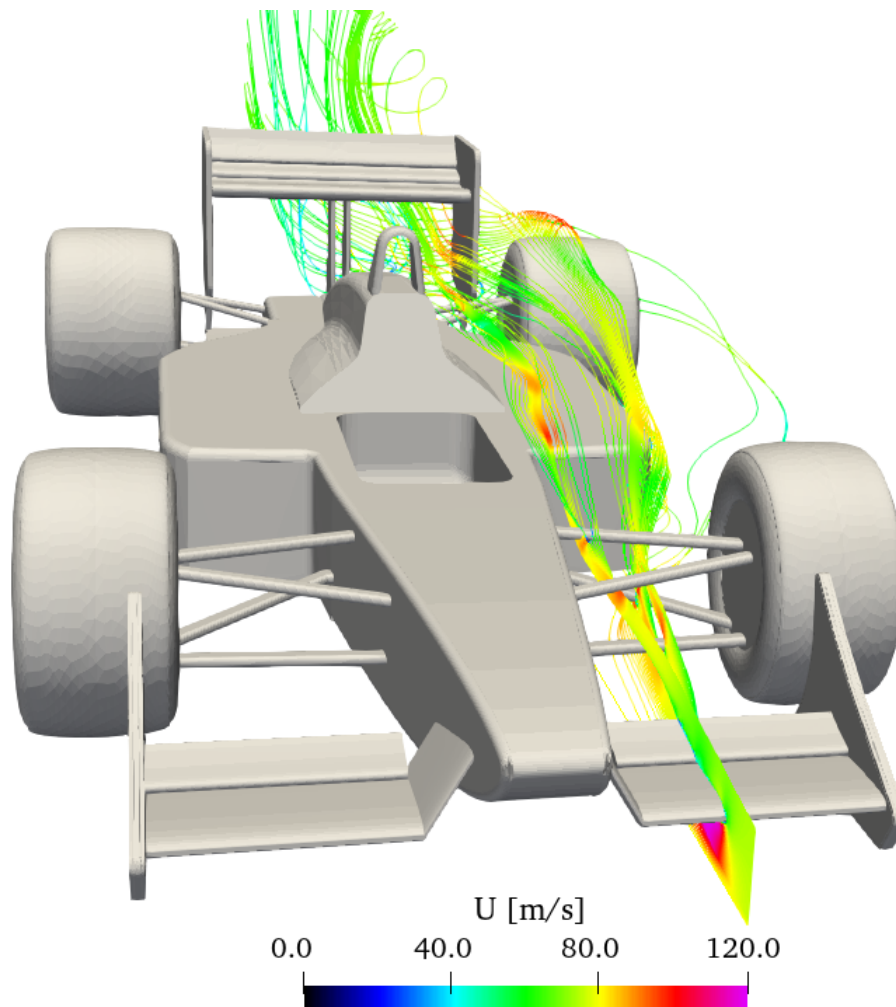


Figura 4.13: Detalle de las líneas de corriente del alerón delantero en la modificación 4 propuesta sobre el vehículo original.

4.3. Análisis de resultados tras la modificación 6

La modificación 6, recogida en la tabla 2.1, y definida en detalle en el anexo C supone un avance y mejora respecto a la modificación 4. Cuenta con el re-diseño del fondo plano del vehículo, mejorándolo respecto a la modificación 5, ajustando el alargamiento del fondo plano con la forma de la nariz en vista en planta. Además, cuenta con el bifurcador encargado de dividir el flujo en 2 direcciones para evitar que el coeficiente de arrastre (C_d) aumente en exceso. Por contra, la nariz pasa a una forma cóncava, en contraposición al diseño convexo de la modificación 4. Por último, se elimina únicamente un flap de la sección central del alerón, para que se genere más cantidad de *downforce*.

Una vez simulada esta configuración, con todas las modificaciones señaladas, usando la misma malla (ver sección 3.2), y las mismas condiciones iniciales y de contorno que en el caso del vehículo original (subsección 3.3), se alcanza la convergencia al estado estacionario que se representa en la figura 4.14 y los valores de coeficientes y fuerzas aerodinámicas que se muestran en la tabla 4.3, obteniéndose una eficiencia aerodinámica $E = 2,766$.

Coeficiente	Valor	Fuerza	Valor
C_d	0,859	F_d	3367 N
C_l	-2,376	F_l	-12109 N

Tabla 4.3: Valores de coeficientes y fuerzas aerodinámicas obtenidas en la simulación tras la modificación 6.

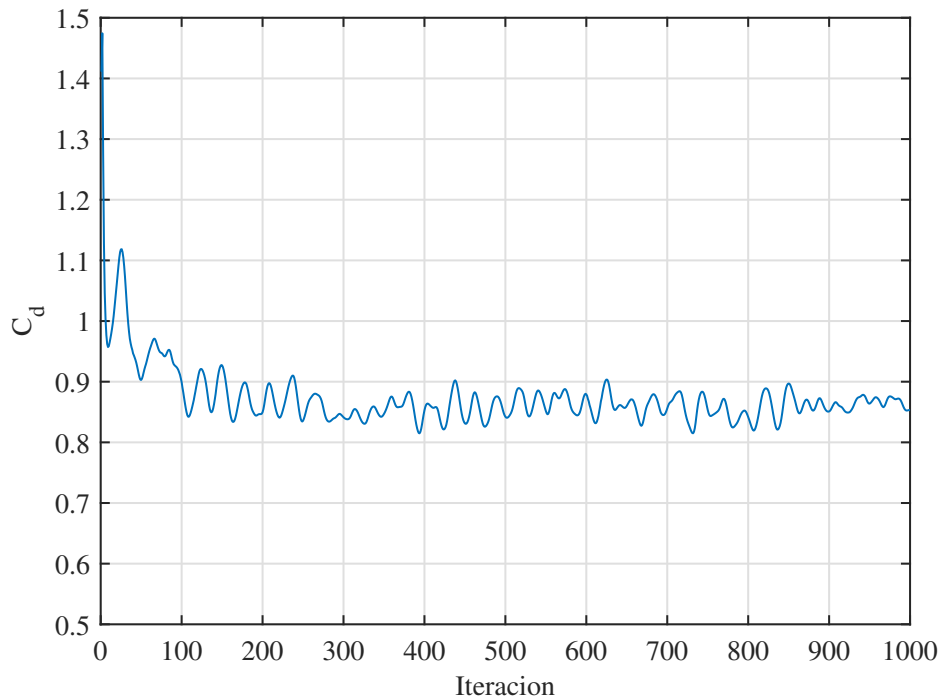


Figura 4.14: Valores del coeficiente de sustentación frente al número de iteraciones durante una simulación para mostrar la convergencia de la solución.

En la figura 4.15, se puede observar la distribución de los valores de los coeficientes de arrastre (parte superior) y sustentación (parte inferior) recogidos en la tabla 4.3 de forma acumulativa a lo largo del vehículo, sobre los modelos: original (superior) y tras la modificación 6 (inferior). Los valores de los coeficientes del modelo original se encuentran en la tabla 4.1.

En este caso, la distribución del coeficiente de arrastre (C_d) es similar hasta el bifurcador, donde a cambio de generar *downforce*, se genera más resistencia al aire. Además, al igual que en la modificación 4, la zona del asiento repercute en gran medida en el valor de este coeficiente, incrementándolo e incluso superando al del modelo original. Esto podría ser debido al aumento de presión en esta zona (ver figura 4.17). Sin embargo, al llegar al difusor, estos coeficientes se igualan prácticamente, incrementando ambos en la misma medida en la parte final. Finalmente, al igual que en la modificación 4, se obtiene una mejora; ya que la energía cinética turbulenta que desprende el vehículo es menor tras la modificación 6, tal y como se observa posteriormente en la figura 4.19.

En el caso del coeficiente de sustentación (C_l), el comportamiento es bastante distinto entre ambos modelos, y similar al de la modificación 4. La modificación 6 muestra un aumento más uniforme del coeficiente de sustentación, incrementándose en mayor medida al llegar al fondo plano. Este aumento progresivo se prolonga hasta la salida del difusor, donde prácticamente ambos modelos igualan los coeficientes. Sin embargo, el modelo original obtiene un mejor comportamiento a la salida del difusor, tal y como se observa comparando el fondo plano entre ambos modelos (figura 4.18 y figura 4.4).

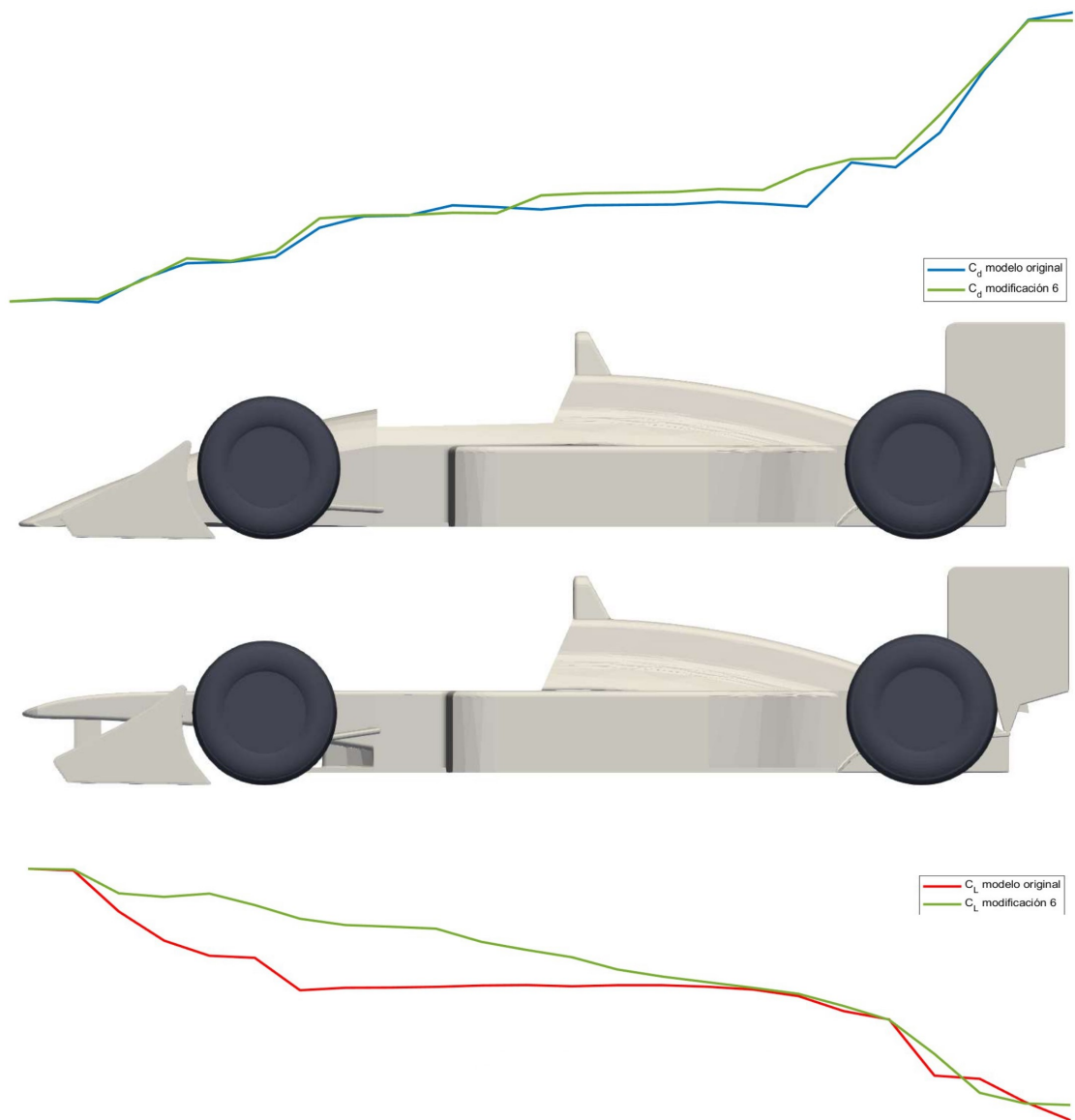
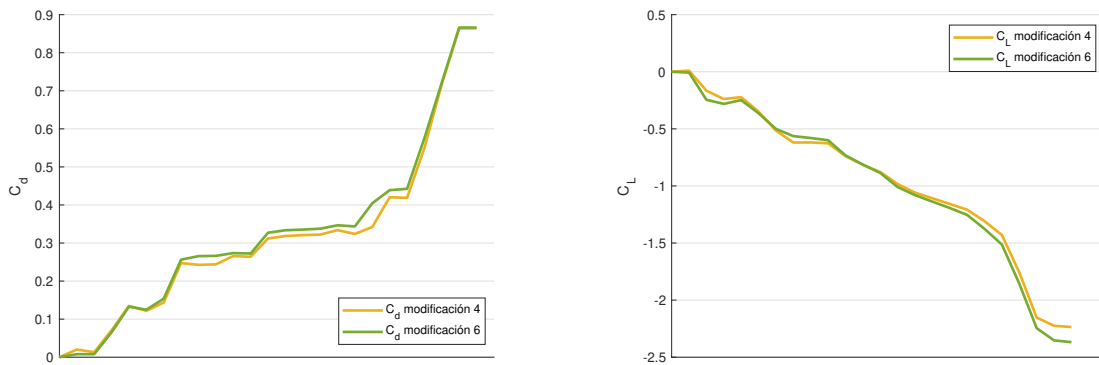


Figura 4.15: Comparación de los coeficientes acumulativos a lo largo de los dos modelos.

La figura 4.16 muestra la comparación de la distribución de los coeficientes de arrastre y sustentación entre las modificaciones 4 y 6 sobre el vehículo original, para analizar qué diseño sería el más acertado. El coeficiente de arrastre en ambas modificaciones evoluciona prácticamente igual, siendo un poco mejor siempre la modificación 4, pese a igualarse al final. Este comportamiento se debe a que el bifurcador genera bastante resistencia al aire, lo cual repercute negativamente en este coeficiente. En cuanto al coeficiente de sustentación, ambas configuraciones evolucionan de la misma forma. Pese a ello, en la parte final del fondo plano, y a la salida del difusor, la modificación 6 muestra mejores resultados, mejorando la *downforce* generada.

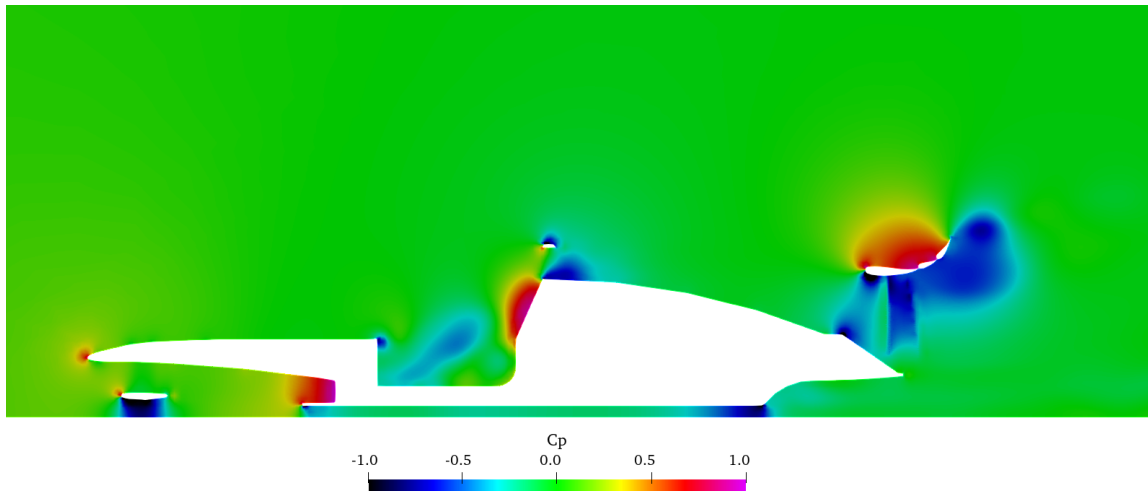


(a) Valores acumulativos del coeficiente de arrastre para la modificación 4 (amarillo) y modificación 6 (verde).

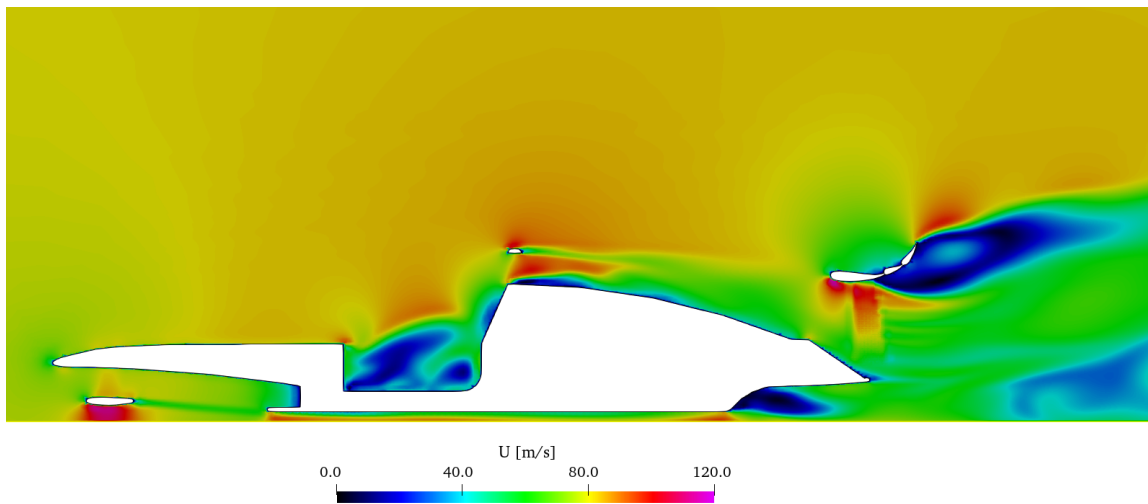
(b) Valores acumulativos del coeficiente de sustentación para la modificación 4 (amarillo) y modificación 6 (verde).

Figura 4.16: Valores de los coeficientes acumulativos de resistencia y sustentación para las modificaciones 4 y 6.

Al igual que en los análisis anteriores, se analiza la distribución de presión y velocidad en la sección central del vehículo, y a continuación se muestran los resultados.



(a) Perfil longitudinal del campo de presiones.



(b) Perfil longitudinal del campo de velocidades.

Figura 4.17: Distribución de presión y velocidad del aire alrededor del vehículo en una sección longitudinal del mismo tras la modificación 6.

En la parte superior de la figura 4.17 se representa el campo de presiones en el perfil longitudinal de la modificación 6 del vehículo original. A diferencia de los modelos previamente analizados, la sección central de esta modificación cuenta con un flap en el alerón delantero, que tal y como se puede apreciar es responsable de generar una gran cantidad de *downforce*, gracias a la zona de bajas presiones que crea en su superficie inferior. Además, gracias a la extensión del fondo plano y la forma cóncava de la nariz, se crea un gradiente de presiones entre las superficies superior e inferior del fondo plano, que a su vez genera también cierta *downforce*. Igualmente, la presión del *cockpit* es inferior a la de la modificación 4 propuesta, y superior en la zona con mayor choque frontal del flujo en el asiento, por lo que la turbulencia en esta zona aumenta, tal y como se ve posteriormente

en la figura 4.19. De la misma forma que en la modificación 4, la parte trasera del vehículo se comporta de forma similar al modelo original.

En la parte inferior de la figura 4.17 se muestra el campo de velocidades. El alerón, al generar el gradiente de presiones, acelera el flujo en su superficie inferior, al igual que el inicio del fondo plano. La velocidad en el *cockpit* es inferior a la de la modificación 4 de la figura 4.10, provocando un aumento de la energía cinética turbulenta como se menciona previamente y se observa en la figura 4.19. De igual manera que en el caso de la presión, la parte trasera tiene un comportamiento similar.

Observando el fondo plano en la figura 4.18, la mayor parte de la *downforce* se genera en el alerón delantero, obteniendo un comportamiento similar al modelo original (ver figura 4.4), donde la mayor parte se genera al principio del vehículo, gracias a la nariz. Sin embargo, la extensión del fondo plano origina otra zona de baja presión (zona negra), por lo que se obtiene más *downforce* que en las otras configuraciones. Además, la zona de bajas presiones a cada lado al inicio del fondo plano es mayor que en la modificación 4 (ver figura 4.11), obteniendo un mejor resultado.

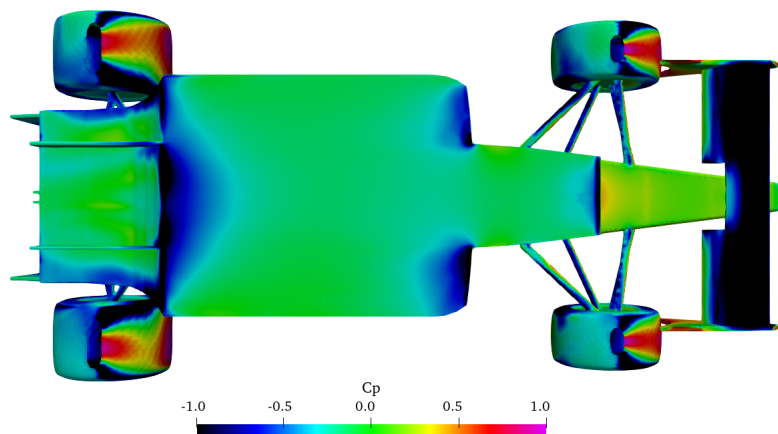


Figura 4.18: Campo de presiones simulado en el fondo plano de la modificación 6.

En cuanto a la energía cinética turbulenta, se puede observar una mayor k en el *cockpit*, tal y como se ha descrito previamente. Esto supone una desventaja de la modificación 6 respecto a los modelos anteriores, ya que indica una mayor resistencia aerodinámica en esta zona. En contraposición, la energía cinética turbulenta se concentra en el difusor, y no a su salida, como en el modelo original, lo cual implica una mejora. Comparándola con la modificación 4, la energía cinética turbulenta pasa de concentrarse a la salida del difusor a justo en este. Por otro lado, la k procedente del alerón trasero permanece intacta.

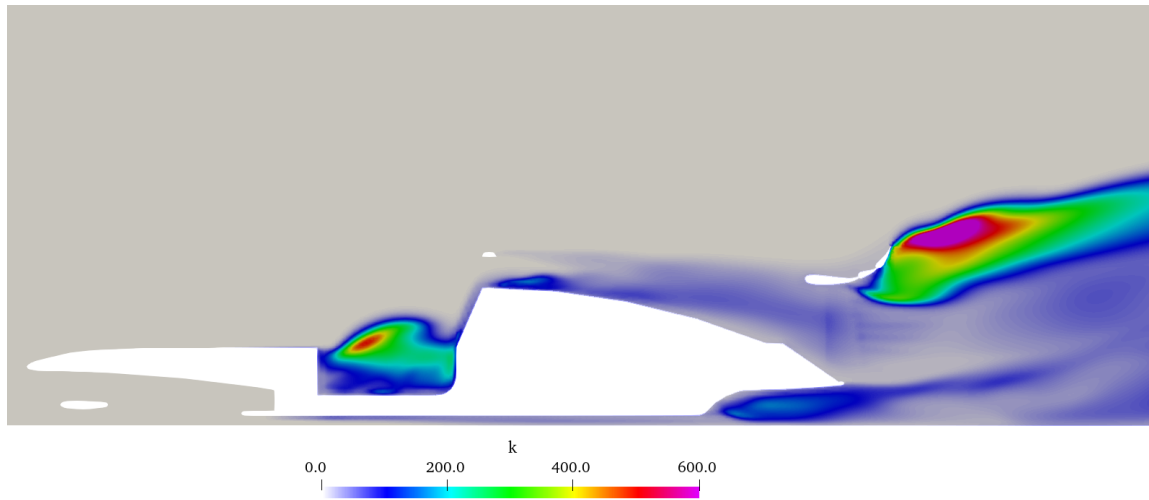


Figura 4.19: Valores de energía cinética turbulenta a lo largo del perfil de la propuesta de modificación 6 sobre el modelo de vehículo original.

Por último, la figura 4.20 muestra las líneas de corriente sobre el alerón delantero de la misma forma que en los análisis anteriores. Se puede observar un comportamiento similar a la modificación 4 (ver figura 4.13), donde decrece el C_l , ya que menos flujo se redirige al fondo plano. Además, el flujo desviado al lateral, sobrepasa por encima de la rueda trasera en vez de hacerlo por la parte lateral. Sin embargo, las líneas de corriente a la salida del difusor, en la modificación 6, muestran una velocidad menor que en la modificación 4, explicando el aumento de energía cinética turbulenta en esta zona de la figura 4.19.

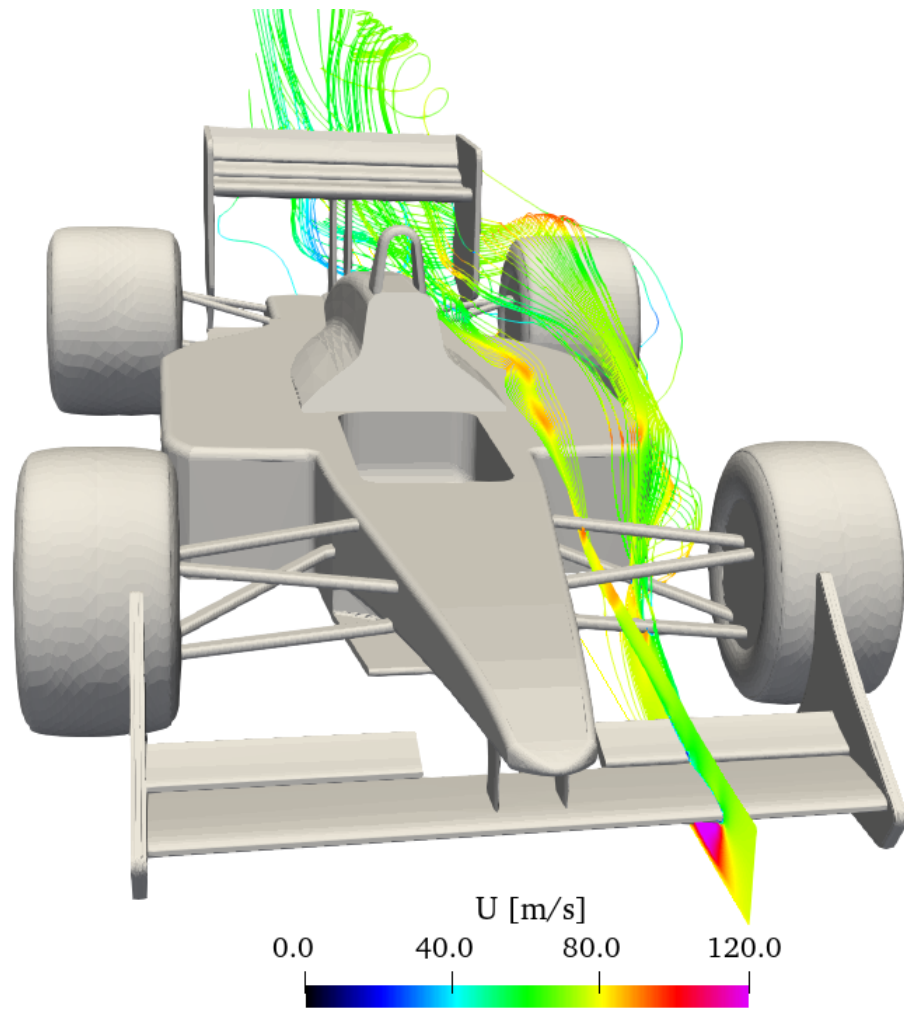


Figura 4.20: Detalle de las líneas de corriente del alerón delantero en la modificación 6 propuesta sobre el vehículo original.

4.4. Análisis de resultados tras la modificación 8

La propuesta de modificación 8 sobre el diseño original es la misma que la realizada en la modificación 6, añadiendo dos mejoras. La primera consiste en mantener completo el alerón delantero en la sección central, es decir, manteniendo los dos flaps en vez de uno. Además, se re-diseña el bifurcador y la extensión del fondo plano, manteniendo la forma de la modificación 7 (ver anexo C), la cual introduce la forma del perfil alar para el extremo del fondo plano y estrecha el bifurcador, evitando una resistencia aerodinámica alta, y que el coeficiente de arrastre en esta zona se incremente en exceso. Al permanecer constante el resto de la geometría del vehículo, este proceso evolutivo permite ir refinando en cada iteración los aspectos negativos de la configuración anterior.

Una vez simulada la configuración con la misma malla (ver sección 3.2), y las mismas condiciones iniciales y de contorno que el vehículo original (3.3), se alcanza la convergencia al estado estacionario (4.21) y se recogen los valores de coeficientes y fuerzas aerodinámicas en la tabla 4.4, obteniéndose una eficiencia aerodinámica $E = 2,848$.

Coeficiente	Valor	Fuerza	Valor
C_d	0,855	F_d	3336 N
C_l	-2,432	F_l	-12394 N

Tabla 4.4: Valores de coeficientes y fuerzas aerodinámicas obtenidas en la simulación de la modificación 8.

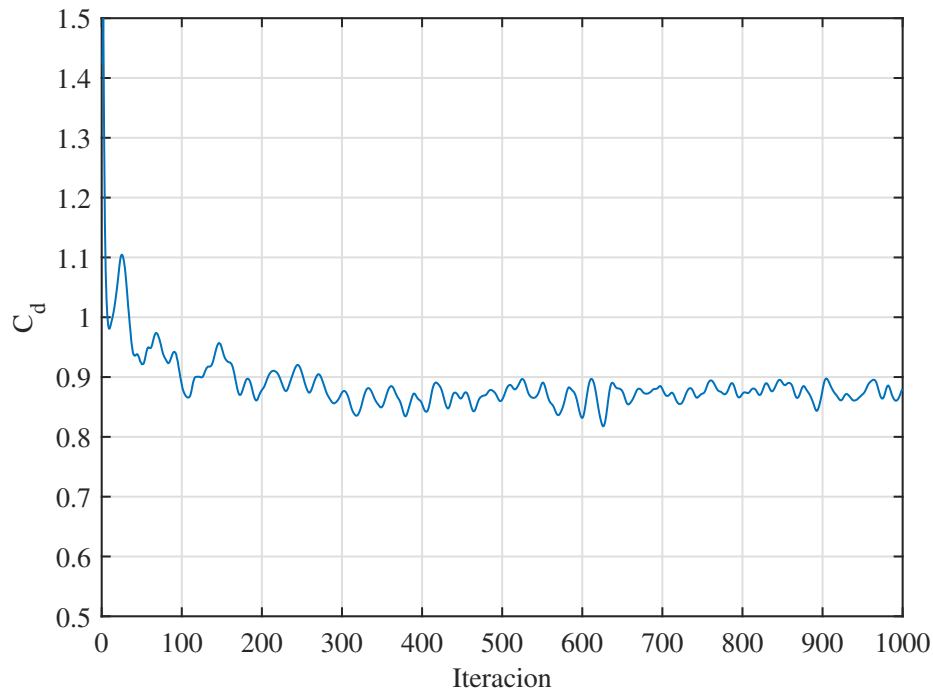


Figura 4.21: Valores del coeficiente de sustentación frente al número de iteraciones durante una simulación para mostrar la convergencia de la solución.

En la figura 4.22 se muestra la distribución de los coeficientes de arrastre (parte superior) y sustentación (parte inferior) de la tabla 4.4 de forma acumulativa a lo largo del perfil del vehículo (original arriba y modificación 8 abajo), pudiéndolos comparar con los coeficientes del modelo original de la tabla 4.1.

Se observa que la distribución es bastante similar a la de la modificación 6 (ver figura 4.15). Ambas distribuciones empiezan de la misma manera para el coeficiente de arrastre, hasta llegar al punto del bifurcador, donde la modificación 8 alcanza mejores resultados. Sin embargo, esta diferencia positiva se vuelve negativa al llegar al asiento, al igual que en las modificaciones anteriores. Finalmente, en la parte trasera, ambos coeficientes se igualan, siendo la modificación 8 la que obtiene un coeficiente de arrastre inferior.

En cuanto al coeficiente de sustentación (C_l), la modificación 8 continúa con la tendencia progresiva uniforme de las modificaciones 4 y 6, llegando a igualarse en el difusor. A la salida del difusor, la modificación 8 tiene un incremento mayor del coeficiente de sustentación que el modelo original. No obstante, el alerón trasero tiene una mayor contribución en el modelo original, superando el C_l de la modificación 8 justo al final.

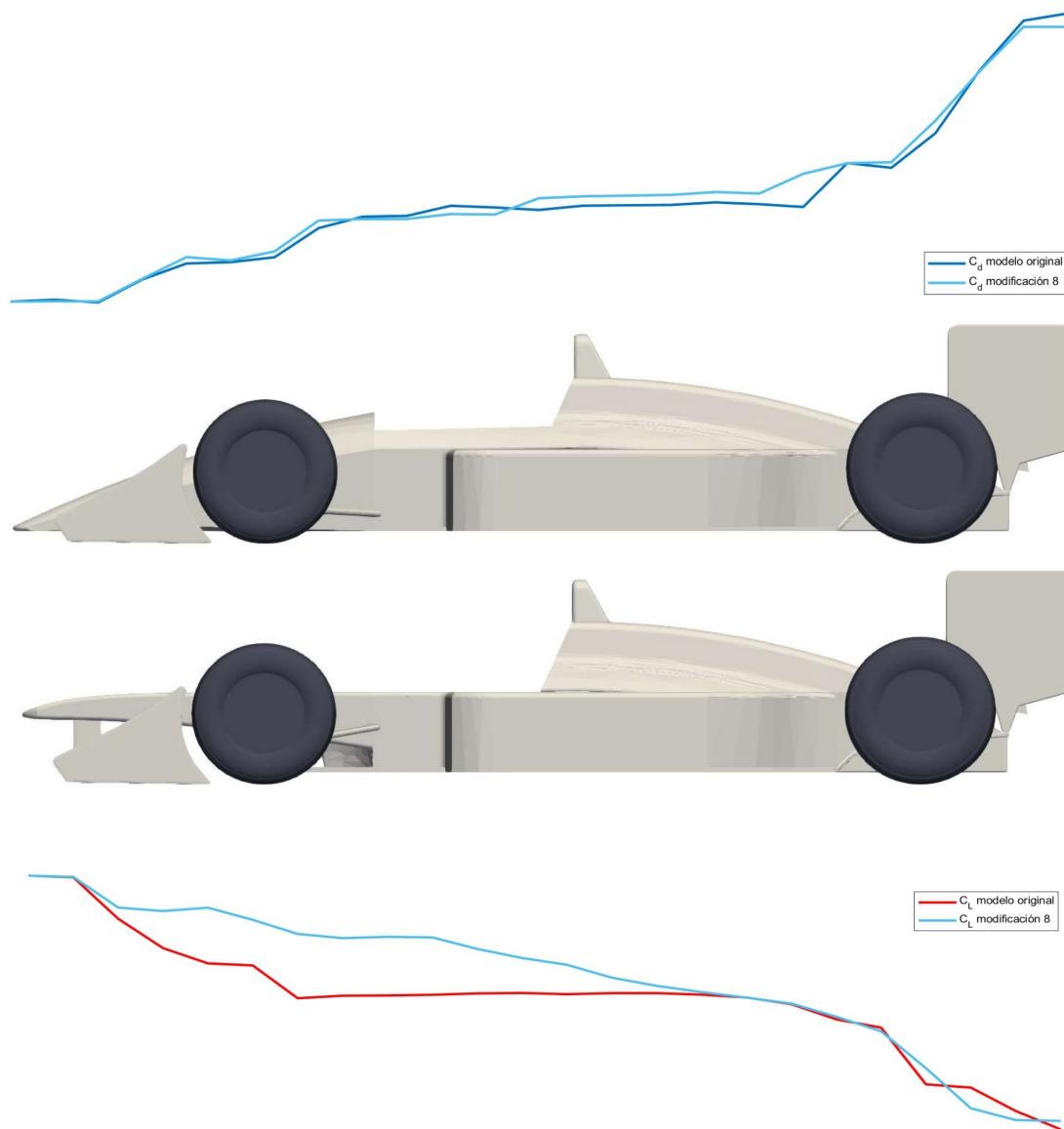
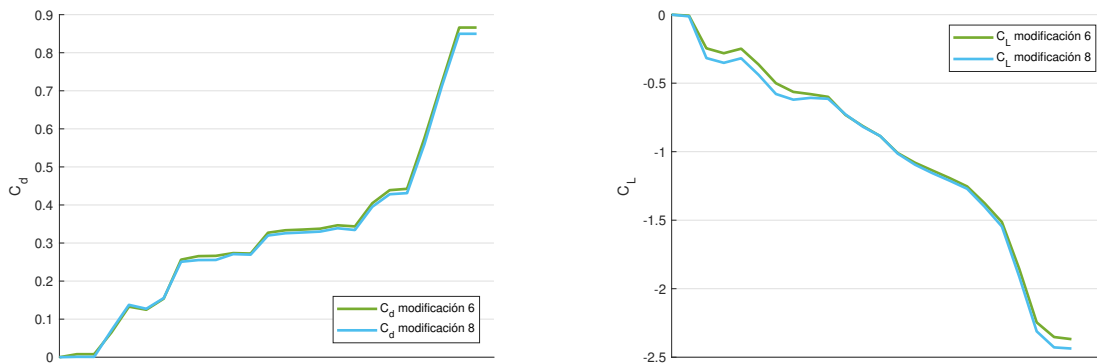


Figura 4.22: Comparación de los coeficientes de arrastre (superior) y sustentación (inferior) acumulativos a lo largo de los dos modelos (original en la parte superior y modificación 8 en la parte inferior).

Para verificar la mejora de la modificación 8, respecto a la modificación 6, se adjunta la figura 4.23, la cual compara ambas distribuciones de coeficientes de arrastre y sustentación, permitiendo analizar mejor los resultados tras las diferentes modificaciones, y estudiar en qué aspectos se podría mejorar en una futura configuración.



(a) Valores acumulativos del coeficiente de arrastre para la modificación 6 (verde) y modificación 8 (azul).

(b) Valores acumulativos del coeficiente de sustentación para la modificación 6 (verde) y modificación 8 (azul).

Figura 4.23: Valores acumulativos de los coeficientes de arrastre y sustentación a lo largo del vehículo tras las modificaciones 6 y 8 del vehículo original.

En la figura 4.23a, la distribución de ambos coeficientes es similar hasta el bifurcador, donde gracias al nuevo diseño, el coeficiente de arrastre se reduce ligeramente a costa de generar menos *downforce*. Esta diferencia permanece constante hasta el final, obteniendo una mejora general de la distribución y del coeficiente de arrastre final, tal y como se puede observar comparando la tabla 4.4 y la tabla 4.3.

Si además se considera la figura 4.23b, el alerón delantero completo mejora la *downforce* total generada, tal y como se observa al inicio de la gráfica. No obstante, esta diferencia se elimina al llegar a la zona del bifurcador, donde se pierde carga aerodinámica. Pese a ello, la modificación 8 muestra mejores resultados a la salida del difusor, obteniendo un mejor C_l total.

A continuación, se muestra la distribución de presiones y velocidades de igual manera que en los análisis anteriores. La figura 4.24 muestra el campo de presiones de la propuesta de modificación 8 sobre el vehículo original. En ella se puede observar cómo ahora el alerón delantero es también responsable de generar gran cantidad de *downforce*, de ahí la diferencia inicial entre las distribuciones de los coeficientes aerodinámicos de las modificaciones 6 y 8 de la figura 4.23. No obstante, el bifurcador genera menos *downforce*, ya que el gradiente de presiones entre las superficies superior e inferior es menor que en la modificación 6 (ver figura 4.17), razón por la que en la distribución de coeficientes de la figura 4.23 la modificación 6 alcanza el valor de la correspondiente en la modificación 8 justo al llegar a esta zona, tal y como se ha descrito. El resto del vehículo se comporta de forma similar a la modificación 6, donde destaca la resistencia aerodinámica del asiento debido al choque frontal con el flujo.

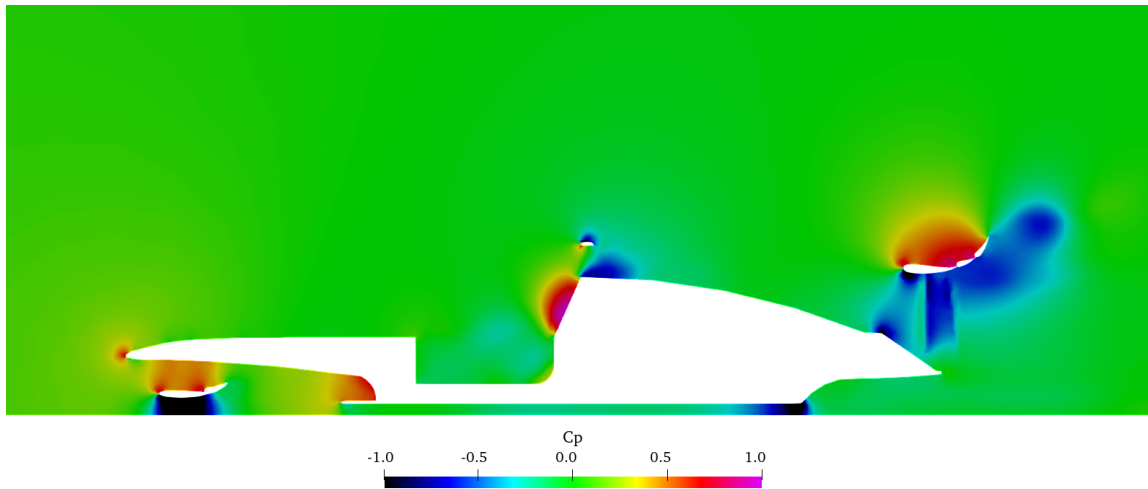


Figura 4.24: Distribución de presiones del flujo de aire en una sección longitudinal del vehículo tras la modificación 8.

En la figura 4.25, el campo de velocidades muestra que el alerón acelera el flujo en su superficie inferior gracias al gradiente de presiones. Cabe destacar también la velocidad en la zona del *cockpit*, donde se aproxima a cero, lo cual repercute en la energía cinética turbulenta como se ve posteriormente en la figura 4.27.

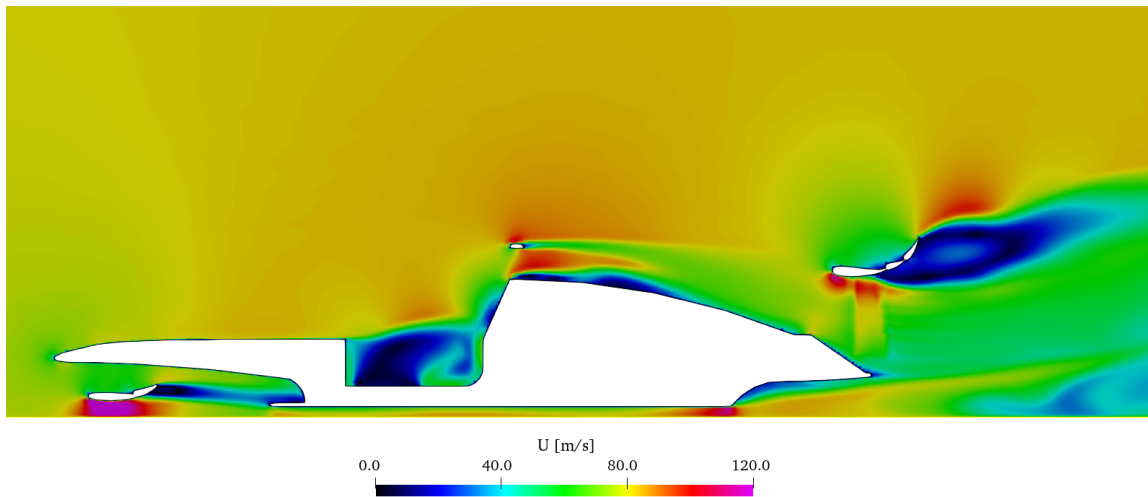


Figura 4.25: Distribución de velocidad del flujo de aire en una sección longitudinal del vehículo tras la modificación 8.

La figura 4.26 muestra la presión adimensionalizada en el fondo plano, y refleja lo mismo que el campo de presiones de la figura 4.24, donde el alerón delantero es el componente del vehículo que más influye en la generación de *downforce*. Además, la zona de bajas

presiones al inicio del fondo plano es inferior, a costa de un mejor resultado en la salida del difusor (mayor zona de bajas presiones), explicando la figura comparativa de distribución de coeficientes entre ambas configuraciones (ver figura 4.23).

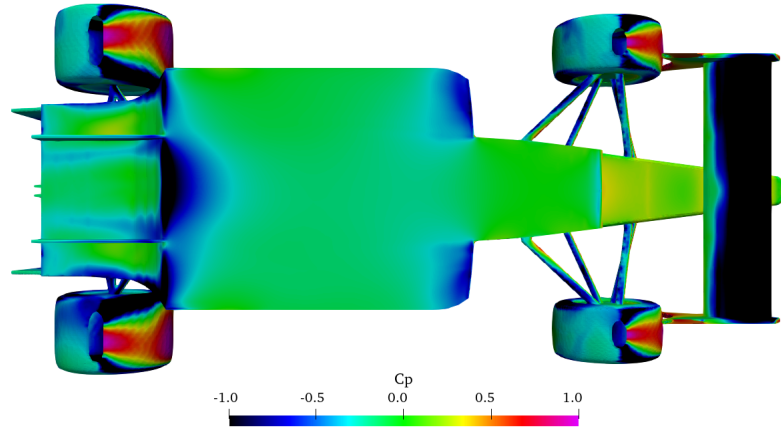


Figura 4.26: Campo de presiones simulado en el fondo plano de la modificación 8.

En lo referente a la energía cinética turbulenta, se puede observar la generación de esta en el alerón delantero, a causa del gradiente de presiones que origina. Sin embargo, en el interior del *cockpit*, la cantidad de k es menor en la modificación 8 respecto a la modificación 6, al igual que en el difusor, de ahí la mejora en el coeficiente de arrastre C_d en la parte final de la gráfica comparativa 4.23.

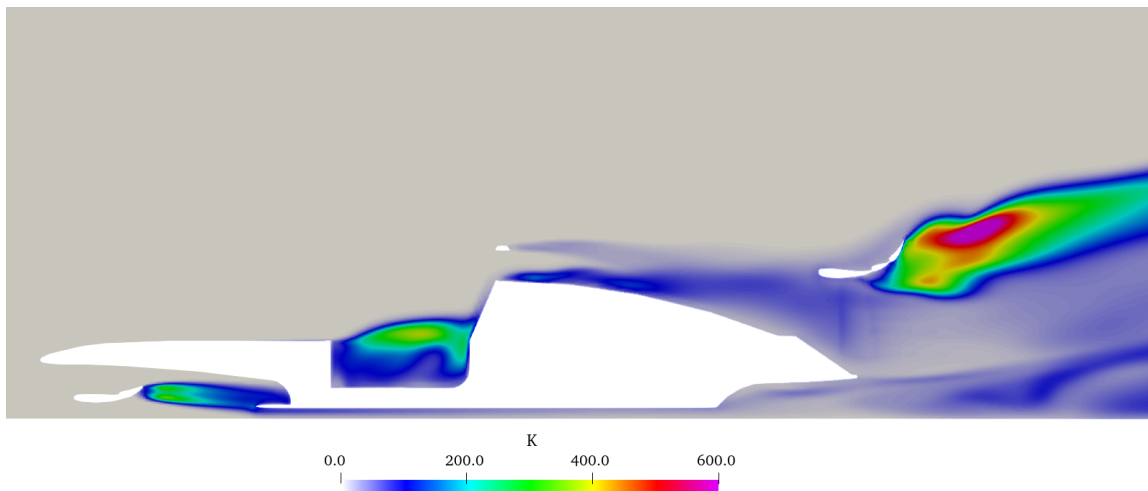


Figura 4.27: Valores de energía cinética turbulenta sobre el perfil longitudinal de la modificación 8 propuesta.

Por último, la figura 4.28 muestra las líneas de corriente de la misma forma que en los análisis anteriores para la modificación 8. Se pueden apreciar las mismas diferencias descritas previamente (ver sección 4.2) que las modificaciones 4 (figura 4.13) y 6 (figura 4.20) respecto al modelo original (figura 4.6). Sin embargo, a diferencia de las modificaciones 4 y 6, la modificación 8 desvía prácticamente todo el flujo al lateral, para posteriormente atravesar la parte superior de la rueda trasera, y redirigirse al alerón trasero y al difusor.

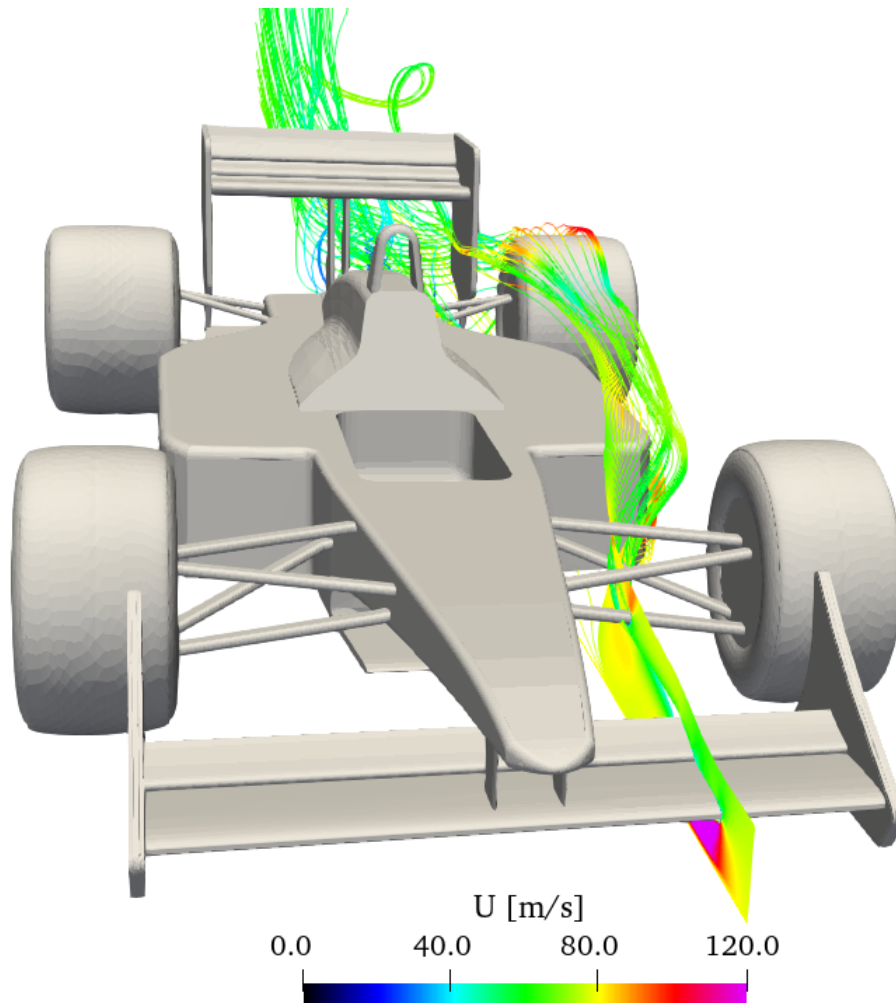
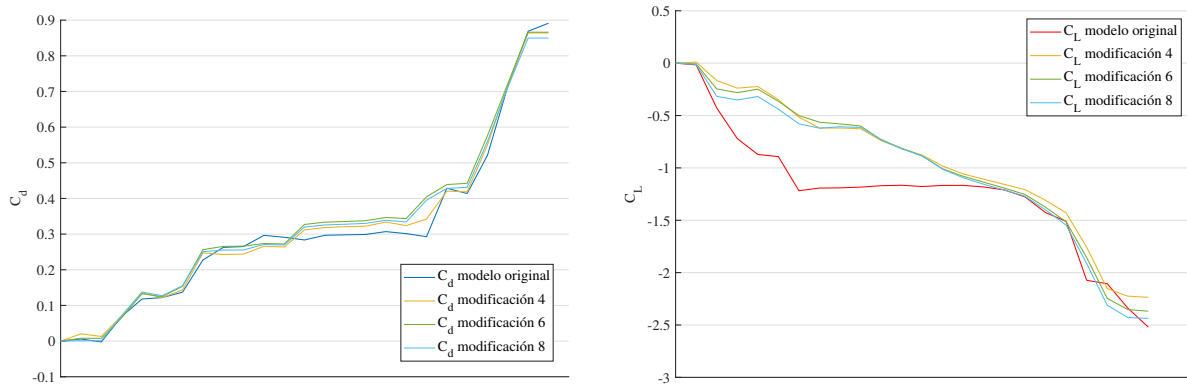


Figura 4.28: Detalle de las líneas de corriente del alerón delantero en la modificación 8 propuesta sobre el vehículo original.

4.5. Comparación de las tres modificaciones propuestas y el modelo original

Una vez analizadas las tres modificaciones propuestas y el modelo original, se comparan todos los resultados numéricos obtenidos con las simulaciones en términos de distribución de coeficientes, campo de presiones y velocidades, y energía cinética turbulenta.



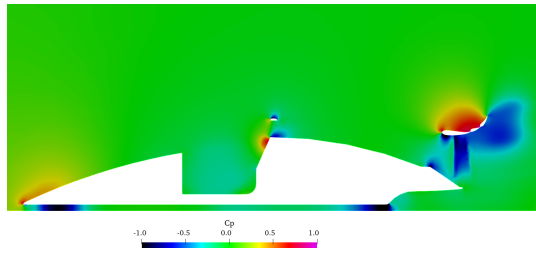
(a) Valores acumulativos del coeficiente de arrastre para el modelo original y las modificaciones 4, 6, 8 propuestas.

(b) Valores acumulativos del coeficiente de sustentación para el modelo original y las modificaciones 4, 6, 8 propuestas.

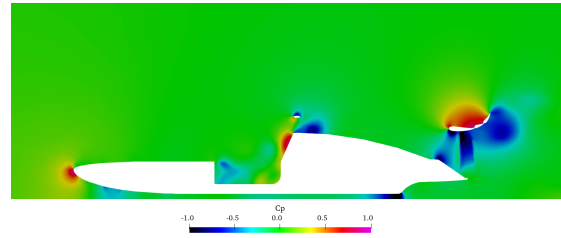
Figura 4.29: Valores acumulativos de los coeficientes aerodinámicos a lo largo del perfil del modelo original y modificaciones 4, 6 y 8 propuestas.

La figura 4.29 muestra la distribución de ambos coeficientes (C_d y C_l) del modelo original y de las modificaciones 4, 6 y 8. En cuanto al coeficiente de arrastre, las 3 modificaciones muestran un comportamiento similar al del modelo original. Las 3 modificaciones mejoran el C_d hasta el asiento, donde éste penaliza demasiado en el coeficiente. En la parte trasera, la modificación 4 muestra mejores resultados que las otras dos modificaciones, pero no mejora el modelo original. Sin embargo, al final, en la salida del difusor, el modelo original genera más resistencia al aire en comparación con las modificaciones propuestas, a cambio de generar *downforce*. Finalmente, la modificación 8 es la que muestra un coeficiente de arrastre inferior.

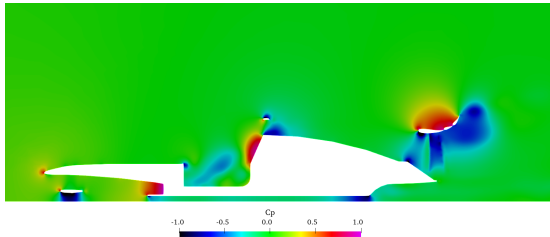
Si se observa el C_l , las 3 modificaciones muestran distribuciones similares entre sí; siendo la modificación 8 la que arroja mejores resultados al principio, gracias al alerón (ver análisis de la sección 4.4). Se observa que las 3 modificaciones se igualan al llegar al fondo plano, y alcanzan los resultados obtenidos en el modelo original a la salida de este. Sin embargo, en el difusor y en su salida, el modelo original genera más *downforce*, obteniendo un coeficiente de sustentación superior a las modificaciones propuestas. Entre ellas, la modificación 8 es la que termina con un C_l superior a las demás. Considerando ambos coeficientes, se concluye que la modificación 8 es la mejor de entre las 3.



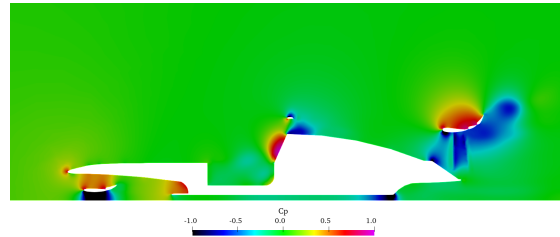
(a) Perfil longitudinal del campo de presiones en el modelo original.



(b) Perfil longitudinal del campo de presiones en la modificación 4.



(c) Perfil longitudinal del campo de presiones en la modificación 6.



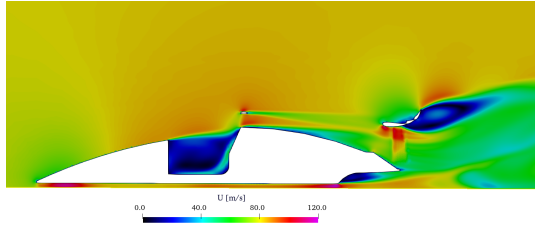
(d) Perfil longitudinal del campo de presiones en la modificación 8.

Figura 4.30: Comparación del perfil longitudinal del campo de presiones entre el modelo original y las modificaciones 4, 6 y 8.

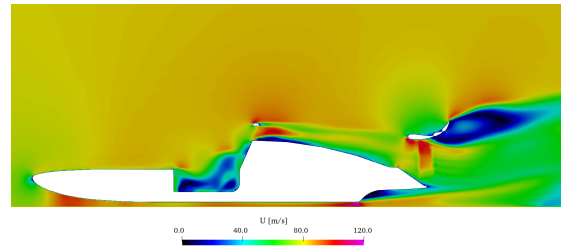
La figura 4.30 muestra un perfil longitudinal de la distribución del campo de presiones del modelo original y de las 3 modificaciones. En todas ellas, la parte trasera del vehículo se comporta de forma similar. Sin embargo, en la parte delantera es donde se encuentran las principales diferencias. El gradiente de presiones generado por el diseño de la nariz en el modelo original, el cual genera una gran cantidad de *downforce*, se elimina en el diseño propuesto en las modificaciones 4, 6 y 8. Pese a ello, y a diferencia de la modificación 4, los flaps de las modificaciones 6 y 8 generan también fuerza de sustentación, siendo la modificación 8 la que más cantidad genera (más gradiente de presiones). Además, en las 3 modificaciones, el asiento genera una zona de presiones muy alta, repercutiendo negativamente en el coeficiente de arrastre, tal y como se muestra en la figura 4.29a. Asimismo, la distribución de presiones en el *cockpit* son diferentes para cada simulación, generando distinta energía cinética turbulenta en cada una de ellas, tal y como se ve posteriormente en la figura 4.32.

Esta información del campo de presiones se traduce en el campo de velocidades en la figura 4.31, donde los gradientes de presión aceleran el flujo en la zona de bajas presiones y lo deceleran en la zona de altas presiones. Todas las simulaciones se comportan de forma similar en la parte trasera, con pequeñas diferencias en el difusor y a su salida, generando diversas zonas de energía cinética turbulenta (ver figura 4.32). Esta k también es distinta en el *cockpit*. Teniendo en cuenta el campo de presiones descrito previamente, y el de velocidades, la modificación 8 es la que mejores resultados arroja, ya que la fuerza de sustentación generada por el alerón en la zona central marca la diferencia entre las

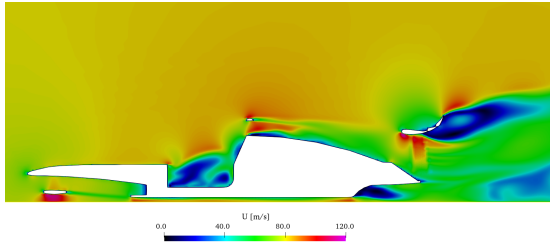
modificaciones, aumentando así el C_l respecto a las demás. Asimismo, la velocidad del flujo a la salida del difusor es más constante y uniforme, generando menos energía cinética turbulenta y por ende mejorando el coeficiente de sustentación (ver también figura 4.32).



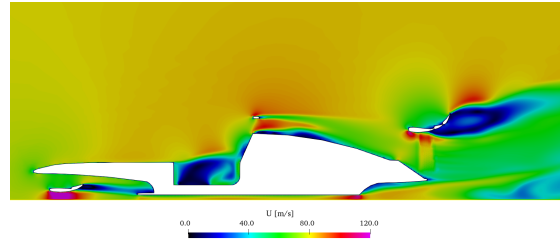
(a) Perfil longitudinal del campo de velocidades en el modelo original.



(b) Perfil longitudinal del campo de velocidades en la modificación 4.



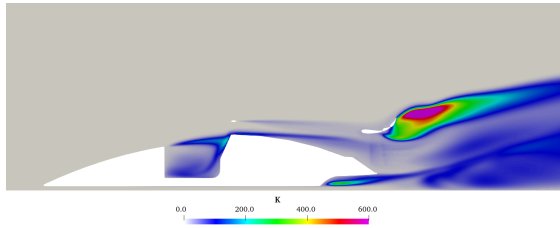
(c) Perfil longitudinal del campo de velocidades en la modificación 6.



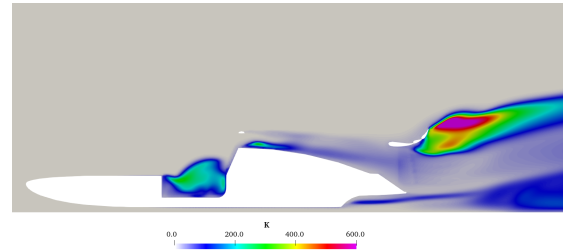
(d) Perfil longitudinal del campo de velocidades en la modificación 8.

Figura 4.31: Comparación del perfil longitudinal de la distribución del campo de velocidades entre el modelo original y las modificaciones 4, 6 y 8.

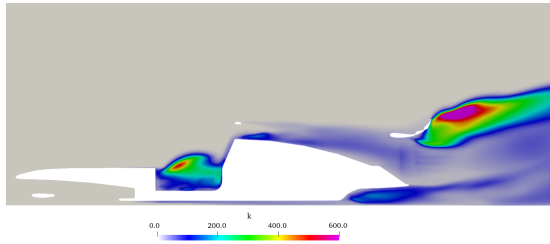
Por último, se compara la energía cinética turbulenta generada por cada una de las simulaciones en la figura 4.32. En la zona del *cockpit*, es el modelo original el que menos k genera, en contraposición a las modificaciones propuestas, las cuales tienen un comportamiento similar, siendo la modificación 6 la que más energía cinética turbulenta genera en esta zona. Sin embargo, las 3 modificaciones muestran mejores resultados en la k generada en el difusor y a la salida de este, generando un menor nivel de energía cinética turbulenta. Entre ellas, es la modificación 8 la que arroja mejores resultados, ya que la modificación 4 tiene peor comportamiento en el flujo trasero, y la modificación 6 en el difusor. Es por ello que se elige la modificación 8 como el diseño más óptimo.



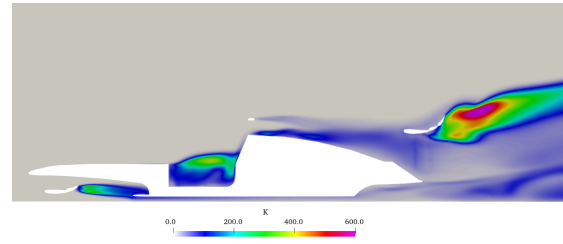
(a) Perfil longitudinal de la energía cinética turbulenta en el modelo original.



(b) Perfil longitudinal de la energía cinética turbulenta en la modificación 4.



(c) Perfil longitudinal de la energía cinética turbulenta en la modificación 6.



(d) Perfil longitudinal de la energía cinética turbulenta en la modificación 8.

Figura 4.32: Comparación del perfil longitudinal de la distribución de energía cinética turbulenta entre el modelo original y las modificaciones 4, 6 y 8.

5 | Conclusiones

En este trabajo se hace uso de la simulación numérica mediante un código abierto de CFD, OpenFOAM, para analizar el flujo de aire alrededor de un vehículo de alta competición, McLaren MP4/4, buscando la mejora de los coeficientes aerodinámicos que puedan proporcionar una ventaja competitiva en la Fórmula 1.

Para ello, se representa el vehículo mediante AutoCAD y se proponen 9 modificaciones al diseño original, enfocadas a mejorar la parte delantera del vehículo. En particular, se actúa sobre la nariz, el fondo del vehículo y el alerón frontal. Aunque en principio, el trabajo se había orientado al análisis de cambios en la parte frontal del vehículo (nariz), posteriormente se vio necesario ampliar el diseño a otras partes del vehículo que influyen en la zona delantera del flujo, como son el alerón delantero y el fondo del vehículo. En cada una de estas configuraciones se genera una malla adaptada al problema, buscando el compromiso entre precisión en los resultados numéricos y bajo coste computacional; ya que la calidad de la malla puede tener un gran impacto en la precisión y eficiencia de los resultados de la simulación. La malla contiene 10^7 celdas con diferentes zonas de refinamiento y tiene forma de cúpula semicilíndrica, con los contornos lo suficientemente alejados para que no afecten a la solución numérica. Se han impuesto unas condiciones iniciales y de contorno adecuadas al problema: velocidad del flujo cercana a 290 km/h en la entrada al dominio de cálculo, que corresponde aproximadamente a la máxima velocidad en recta que un Fórmula 1 podía alcanzar en 1990, para simular la velocidad del vehículo, imponiendo también esta condición en el suelo; y se incluye una velocidad de rotación para cada rueda respecto a su eje central. La presión en la superficie de salida del dominio de simulación se ha fijado a 101325 Pa , que es la presión atmosférica.

Con todos estos datos, se ha procedido a realizar las simulaciones con el código de CFD OpenFOAM, imponiendo 1000 iteraciones de cálculo para asegurar la convergencia; y se ha procedido a realizar posteriormente el análisis detallado de los resultados numéricos obtenidos tanto en el modelo original como en las 9 modificaciones propuestas. En todos los casos se analizan los coeficientes aerodinámicos, las distribuciones de presión, velocidad y energía turbulenta, y un detalle del perfil longitudinal de las líneas de corriente desde el alerón delantero. Las modificaciones propuestas se han llevado a cabo siguiendo un procedimiento de mejora respecto a la configuración anterior simulada. En las primeras modificaciones (de la 1 a la 4) se ha actuado sobre la nariz del vehículo, incorporando diferentes geometrías; el siguiente grupo de modificaciones (de la 5 a la 7) corresponde a modificaciones sobre el fondo del vehículo. Finalmente, con la mejor de las modificaciones anteriores sobre nariz y fondo, se analiza el alerón delantero (modificación 8) y sobre este último se re-diseña el fondo (modificación 9).

Se realizan comparaciones de todas las variables de interés entre cada modificación y el diseño original, y entre las propias modificaciones, analizando las mejoras o similitudes de cada una de ellas. La conclusión general del trabajo es que la modificación 8, que corresponde a un diseño de nariz cóncavo, alerón delantero entero y fondo prolongado, ajustado a la zona superior del vehículo y con un bifurcador de flujo afilado, es la que mejores resultados aerodinámicos obtiene, y por tanto, la más eficiente desde este punto de vista, reduciendo el coeficiente de arrastre, disminuyendo la *downforce* y consiguiendo que la salida del flujo de aire del difusor sea más constante y uniforme, generando así menos energía cinética turbulenta.

Bibliografía

- [1] Airfoil database.
- [2] User guide. URL <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide>.
- [3] Wolf dynamics - customer-driven flow solutions. URL <http://www.wolfdynamics.com/>.
- [4] 1990s f1 high and low noses | simscale, 6 2018. URL https://www.simscale.com/projects/yosukegb4/f92at_-_double_floor/.
- [5] J. Anderson. *Fundamentals of Aerodynamics*. 2017.
- [6] Autodesk. Autodesk autocad 2024. URL <https://www.autodesk.com/products/autocad/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>.
- [7] Autosport. Why do modern f1 cars have raised noses? - youtube, 11 2020. URL https://www.youtube.com/watch?v=BKI3A0kk8Pg&ab_channel=Autosport.
- [8] D. R. Durran. *Numerical Methods for Fluid Dynamics*. Springer New York, 2010. ISBN 978-1-4419-6411-3. doi: 10.1007/978-1-4419-6412-0. URL <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4419-6412-0>.
- [9] I. Emparan. McLaren mp4/4: El mejor f1 de la historia | fórmula f1, 12 2009. URL <https://www.formulaf1.es/4570/mclaren-mp44-el-mejor-f1-de-la-historia/>.
- [10] E. Josefsson, E. Harvey, S. Sebben, and S. Salehi. Cfd with opensource software methods for wheel rotation modelling, 2020. URL https://www.tfd.chalmers.se/~hani/kurser/OS_CFD_2020/ErikJosefsson/Report_Erik_Josefsson.pdf.
- [11] P. K. Kundu, I. M. Cohen, and D. R. Dowling. *Fluid Mechanics*. Academic Press, 5th edition, 2011.
- [12] R. E. Maani, B. Radi, and A. E. Hami. *CFD Analysis and Shape Optimization of NACA0012 Airfoil for Different Mach Numbers*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 4 2019. ISBN 9781728114828. doi: 10.1109/ICOA.2019.8727653.
- [13] A. Marchante. Autocad: ¿cuáles son las características del software? - 3dnatives, 6 . URL <https://www.3dnatives.com/es/autocad-cuales-caracteristicas-del-software-020420202/>.
- [14] K. Moore. McLaren mp4/4 | 3d cad model library | grabcad, 2019. URL <https://grabcad.com/library/mclaren-mp4-4-3>.

- [15] M. F. Osma. Teoría de la aerodinámica de un fórmula 1, 2019. URL <https://www.aerodinamicaf1.com/teoria/>.
- [16] N. Petrucci. Research and development to support formula one vehicle design. 11 2022.
- [17] G. Piola and M. Somerfield. La fascinante historia del mejor coche de fórmula 1, 4 2023. URL <https://es.motorsport.com/f1/news/historia-mp4-4-mclaren-mejor-coche-1988/4776588/>.
- [18] A. Pope. *Basic wing and airfoil theory*. Dover Publications, 2009. ISBN 0486471888.
- [19] S. Rodriguez. *Applied Computational Fluid Dynamics and Turbulence Modeling: Practical Tools, Tips and Techniques*. Springer International Publishing, 1 2019. ISBN 9783030286910. doi: 10.1007/978-3-030-28691-0/COVER.
- [20] H. Savliya. Nose design for formula student vehicle with aerodynamic components. ISSN 2319-7064. URL www.ijsr.net.
- [21] H. Schlichting and K. Gersten. *Boundary-layer theory*. Springer, 3 2000.
- [22] J. Spurk. *Fluid Mechanics*. Springer, 2008.
- [23] V. L. Streeter and E. B. Wylie. *Fluid Mechanics*. 1 1975.
- [24] B. Wainfan. *Airfoil selection : understanding and choosing airfoils for light aircraft*. B. Wainfan, 2005. ISBN 7770045258.
- [25] F. M. White. *Fluid Mechanics*. 2011.
- [26] D. C. Wilcox. *Turbulence Modeling for CFD, Volume 1*. DCW industries La Canada, 2006. ISBN 1928729088. URL https://books.google.com/books/about/Turbulence_Modeling_for_CFD.html?id=tFNNPgAACAAJ.

A | Conceptos Básicos de Aerodinámica

En este anexo se resumen algunos tipos de flujo que se pueden encontrar en la realidad, así como las fuerzas y coeficientes que pueden aparecer en el tema concreto de aerodinámica, junto con las ecuaciones que describen el movimiento del flujo.

A.1. Tipos de flujo

La mecánica de fluidos es una rama fundamental de la física que se encarga de estudiar el comportamiento de los fluidos en movimiento. Uno de los conceptos más importantes en este área es el flujo, que se refiere al movimiento de un fluido a través de un espacio determinado. En la mecánica de fluidos, existen diferentes tipos de flujo que se caracterizan por sus propiedades y comportamientos específicos. Los tipos de flujo se pueden clasificar de diferentes maneras, pero una de las más comunes es según la velocidad y la dirección del flujo. A continuación, se presentan los tipos de flujo más relevantes.

Flujo según su viscosidad

Esta categoría se puede dividir en flujo laminar y flujo turbulento [11, 22, 23, 25]. En el flujo laminar, las partículas del fluido se mueven en capas paralelas y ordenadas, sin mezclarse entre sí, con un movimiento suave y constante, y una baja energía cinética. Sin embargo, en el flujo turbulento, las partículas del fluido se mueven en direcciones aleatorias y caóticas, mezclándose entre sí, con un movimiento irregular y una alta energía cinética. En nuestro caso se verá como habrá zonas con flujo turbulento y otras con flujo laminar

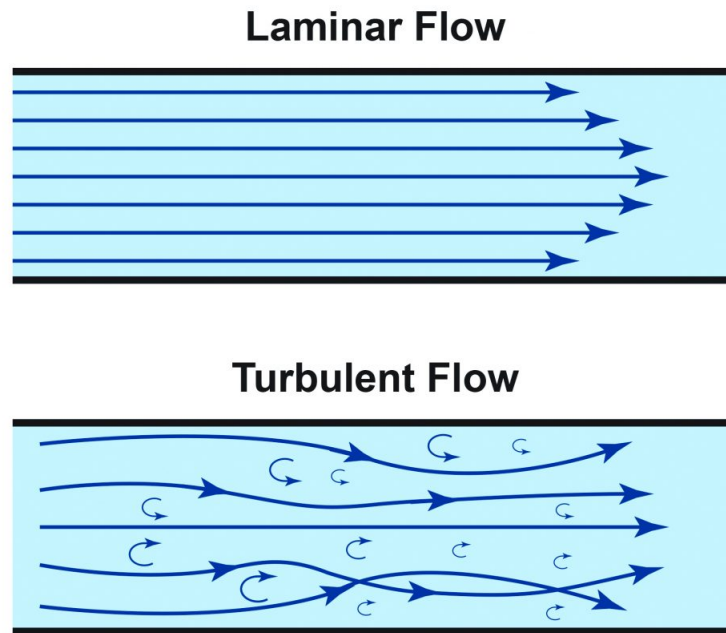


Figura A.1: Flujo laminar vs Flujo Turbulento.

Flujo según la variación de propiedades con el tiempo

El flujo de un fluido se puede dividir en flujo estacionario o no estacionario [11, 22, 23]. Esto depende de la variación de las características del fluido en el tiempo, es decir, si la velocidad, la presión y la densidad permanecen constantes en el tiempo o no. En caso de que permanezcan constantes, se considerará un flujo estacionario; y en caso contrario, no estacionario. El estado desde que una situación no estacionaria llega a convertirse en una estacionaria se denomina transitorio. En este proyecto, el flujo está en movimiento, pero no se va a estudiar el estado transitorio debido a su complejidad; sino que se considerará un flujo que ya ha alcanzado un estado estacionario.

Además, si la variación de densidad del fluido respecto al tiempo cambia, se considera un flujo compresible, ya que esta varía con la presión y temperatura. Este tipo de flujo se suele presentar en los gases, ya que son compresibles, en condiciones de altas presiones o temperaturas. Por otro lado, si la densidad permanece constante se considerará incompresible. Este tipo de flujo se presenta en los líquidos, ya que son prácticamente incompresibles; y en algunos gases como el aire. En nuestro caso, el flujo de aire alrededor del vehículo se considera incompresible.

Flujo según su velocidad

Junto con las clasificaciones anteriores, también se puede dividir el flujo según la velocidad que lleve respecto a la velocidad del sonido [11, 22, 25]. De esta forma, aquel flujo cuya velocidad sea menor que la velocidad del sonido, se clasificará como flujo subsónico. Se presenta en la mayoría de las aplicaciones prácticas, y nuestro proyecto contará con este tipo de flujo. En caso de que el flujo viaje a una velocidad mayor que la del sonido, se clasificará como flujo supersónico, cuyas aplicaciones son meramente especiales, como la aeronáutica. Por último, si la velocidad del fluido es igual a la del sonido, se considera un flujo crítico, como en los motores de los aviones a reacción. Este comportamiento viene descrito por un parámetro adimensional que es el número de Mach, y que tiene un límite de 0,3, por debajo del cual los gases como el aire se consideran incompresibles. Se verá más adelante.

A.2. Números adimensionales

En mecánica de fluidos, existen muchos números adimensionales importantes [11, 22, 23] que se utilizan para caracterizar el comportamiento de los fluidos en distintas situaciones. Sin embargo, en este proyecto, se utilizan principalmente los siguientes:

Número de Reynolds (Re): Este número describe el régimen de flujo de un fluido, es decir, si es laminar o turbulento, como se ha descrito anteriormente. Se define como el cociente entre la fuerza inercial y la fuerza viscosa del fluido y se expresa de la siguiente forma:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (\text{A.1})$$

donde ρ es la densidad del fluido, V es su velocidad característica, L es la longitud característica del problema y μ es la viscosidad dinámica del fluido. En los casos a estudiar, un número de Reynolds inferior a 2300 corresponderá a un flujo laminar, y superior a 4000 será un flujo turbulento. Si se encuentra entre los dos valores se encuentra en estado de transición.

Número de Mach (Ma): Este número es utilizado para describir la velocidad de un flujo en relación con la velocidad del sonido en ese medio. Se define como la velocidad del flujo dividida por la velocidad del sonido y se expresa como:

$$Ma = \frac{V}{a} \quad (\text{A.2})$$

donde V es la velocidad del flujo y a es la velocidad del sonido en el medio (340 m/s generalmente). Si $Ma < 0,3$, el flujo se considera prácticamente incompresible, como es en nuestro caso que se ve posteriormente. En caso de que $0,3 < Ma < 1$, es un flujo subsónico, $Ma = 1$ es flujo crítico y $Ma > 1$ supersónico.

A.3. Líneas de corriente

Una línea de corriente se define como la curva geométrica tangente al vector velocidad para cada partícula fluida que compone el flujo. Se trata de una representación matemática muy útil para estudiar el movimiento del flujo de aire alrededor de un cuerpo. La visualización del movimiento del flujo a través de las líneas de corriente sobre un objeto, se puede obtener en un túnel de viento inyectando humo o un trazador; y en los resultados del postprocesamiento de las simulaciones numéricas CFD. Las líneas de corriente se utilizan para ver si las partículas del flujo siguen la forma del objeto cerca de su superficie, por lo que se pueden distinguir dos zonas: flujo pegado al cuerpo y flujo separado. El flujo se considera pegado al cuerpo cuando las líneas de corriente siguen suavemente el contorno de la superficie de un cuerpo en movimiento; y se considera que el flujo está separado o desprendido del cuerpo, cuando las líneas de corriente no siguen la forma de la superficie del cuerpo en movimiento. Desde un punto de vista aerodinámico, los flujos pegados al cuerpo son preferibles al flujo separado; ya que benefician la reducción de la resistencia; mientras que la separación del flujo provoca que la turbulencia sea mayor y genera una estela detrás del cuerpo en el que el movimiento turbulento complica la aerodinámica.

A.4. Fuerzas aerodinámicas

La aerodinámica se encarga del estudio de las fuerzas que actúan sobre los objetos que se mueven a través del aire. En el caso de los vehículos, las fuerzas aerodinámicas [5] son especialmente importantes, ya que pueden afectar significativamente el rendimiento, la eficiencia y la seguridad de los mismos. A lo largo de esta sección, se introducen las fuerzas aerodinámicas más importantes que se producen debidas a la interacción del flujo de aire con el vehículo.

A.4.1. Fuerza de arrastre

La fuerza de arrastre [15], también conocida como resistencia aerodinámica, es una fuerza que se opone al movimiento del vehículo y actúa en la dirección opuesta al mismo. Esta fuerza se debe a la fricción del aire con la superficie del vehículo, así como a la formación de turbulencias en el flujo de aire alrededor del objeto. Cuanto mayor sea la fuerza de arrastre, mayor es la resistencia que se opone al movimiento del vehículo, lo que puede provocar un aumento en el consumo de combustible, una reducción en la velocidad máxima y una menor estabilidad a altas velocidades.

A.4.2. Coeficiente de arrastre (C_d)

El coeficiente de arrastre (C_d), también llamado en inglés *drag coefficient* es una medida de la resistencia aerodinámica que presenta un objeto en movimiento, y está relacionado directamente con la fuerza de arrastre que genera el sólido. Este se define según la siguiente expresión:

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2}\rho A_f V^2} \quad (\text{A.3})$$

Variable	Descripción
F_d	Fuerza de arrastre
ρ	Densidad del fluido
A_f	Área frontal
V	Velocidad

El coeficiente de arrastre depende mayormente de la forma del cuerpo, tal y como se ve en la siguiente imagen (figura A.2). Es por esto, que los vehículos de competición tienden a asemejarse en cierta forma a la cuarta forma de la imagen, que corresponde al menor valor del coeficiente de resistencia, con el objetivo de reducir su resistencia al aire y así lograr mayor velocidad punta y menos gasto de combustible. Por este motivo, en los resultados numéricos se buscan los coeficientes de resistencia menores como los más adecuados, que se traduce en una menor fuerza de arrastre, para así lograr mejorar la eficiencia aerodinámica del vehículo y reducir el tiempo de vuelta.






Shape		Drag Coefficient
Sphere		0.47
Half-sphere		0.42
Cube		1.05
Streamlined Body		0.04
Streamlined Half-body		0.09

Figura A.2: Valores del coeficiente de arrastre C_d para distintas formas geométricas de sólido.

A.4.3. Fuerza de sustentación

La fuerza de sustentación [15] es una fuerza que actúa perpendicularmente a la dirección del movimiento del vehículo. Se genera cuando existe un gradiente de presiones entre la parte superior y la inferior del vehículo, y produce una fuerza neta que empuja al coche desde la zona de altas presiones a bajas presiones. Esto se debe al principio de Bernoulli.

Principio de Bernoulli

El principio de Bernoulli [11, 15, 23] es una ley fundamental en la mecánica de fluidos que establece que en un flujo de fluido constante, la suma de las energías cinética, potencial y de presión, que también puede enunciarse en dimensiones de presión como la suma de presión estática, presión dinámica y energía potencial por unidad de volumen es constante a lo largo de una línea de corriente. Se puede expresar de la siguiente forma:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{constante} \quad (\text{A.4})$$

Donde P es la presión (estática) del fluido, ρ es su densidad, v es su velocidad, g es la gravedad y h es su altura. Teóricamente, solo se puede aplicar a fluidos ideales, es decir, sin viscosidad. Sin embargo, en la práctica, se puede aplicar a flujos incompresibles (de densidad constante) con caudal constante, que presenten una viscosidad pequeña, como el aire que interacciona con un Fórmula 1 en movimiento.

Cuando se aplica este principio a la aerodinámica de un vehículo, la energía potencial se puede despreciar, obteniendo la ecuación simplificada:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{constante} \quad (\text{A.5})$$

Tal y como se puede observar, si la velocidad del fluido aumenta, la presión estática de este se reduce y viceversa. De esta forma, existen zonas de altas y bajas presiones, que generan la fuerza de sustentación. En el caso de un vehículo de competición, interesa que esta apunte al suelo, para que el vehículo se adhiera más al asfalto y lograr una mayor adherencia en curva.

Como se ha mencionado previamente, esto se consigue generando altas presiones en la parte superior del vehículo y bajas presiones debajo de este (es decir, acelerando el flujo en la parte inferior del vehículo para reducir la presión estática en esta zona), logrando que la fuerza apunte hacia el suelo. Es por esto que esta fuerza se llama generalmente "*downforce*".

Además de la fuerza de arrastre y la fuerza de sustentación, también existen otras fuerzas aerodinámicas que pueden actuar sobre el vehículo, como la fuerza de momento o torque que puede generar una tendencia a girar el objeto. Estas fuerzas pueden ser importantes en situaciones específicas, como cuando se conduce en condiciones de viento fuerte o cuando se realizan maniobras a alta velocidad.

A.4.4. Coeficiente de sustentación (C_l)

El coeficiente de sustentación (C_l) [5] mide la cantidad de *downforce* generada por el vehículo, y al igual que el coeficiente de arrastre con su fuerza correspondiente, este está relacionado con la fuerza de sustentación. Su expresión es la siguiente:

$$C_l = \frac{F_l}{\frac{1}{2}\rho A_f V^2} \quad (\text{A.6})$$

Variable	Descripción
F_l	Fuerza de sustentación
ρ	Densidad del fluido
A_f	Área frontal
V	Velocidad

El coeficiente de sustentación es generado principalmente por aquellos elementos del vehículo diseñados para ello, principalmente el alerón trasero y el delantero. Sin embargo, existen otras partes que tienen una ligera contribución a este coeficiente, como es el caso de nuestra *nariz*, el cual es el principal objeto a modificar y evaluar en el proyecto.

El coeficiente de sustentación en vehículos de competición es negativo, ya que la fuerza va dirigida al suelo, ya que si no el vehículo se elevaría del suelo generando esa fuerza en sentido contrario. En las simulaciones, se busca siempre una reducción de este coeficiente, es decir, más negativo, que se traduce en una mayor *downforce* generada por el propio vehículo, logrando un mejor agarre en curva y reducir el tiempo de vuelta.

A.5. Capa límite

La capa límite [21] es la región del fluido donde la velocidad se reduce desde 0 hasta la velocidad libre del fluido (V_∞) en el mismo medio. Es en esta zona de fluido donde se produce la mayor parte de la fuerza de resistencia del vehículo. Esta región se origina por las fuerzas de rozamiento que ocasiona la viscosidad del aire al interaccionar con el vehículo, y de esta forma se crea un perfil de velocidades con el comportamiento descrito previamente.

La capa límite puede ser laminar o turbulenta. Al igual que se ha explicado anteriormente en los tipos de flujo, una capa límite laminar presentará un movimiento ordenado, mientras que si es turbulenta tendrá un orden caótico, con la aparición de vórtices. Entre ambos tipos de capa límite aparecerá una etapa de transición, donde se mezclan ambos comportamientos.

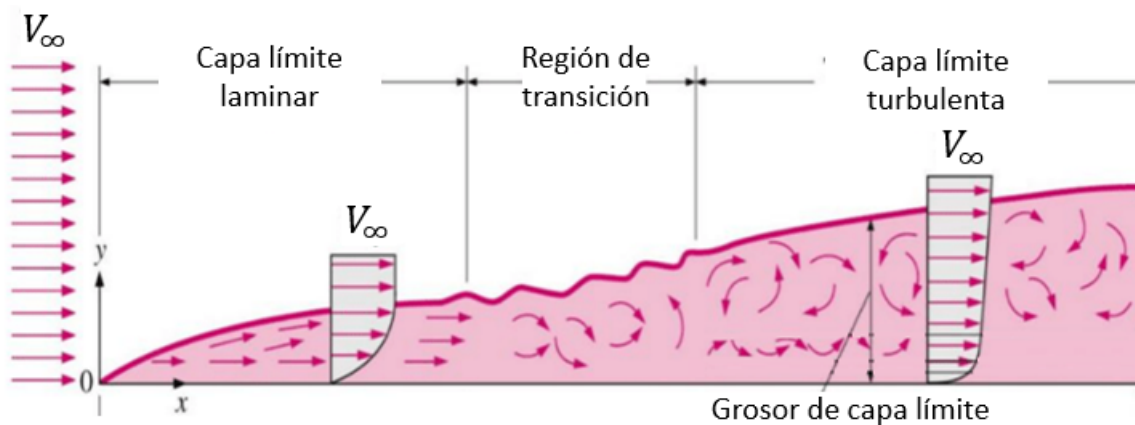


Figura A.3: Descripción de la generación de la capa límite en un fluido sobre una superficie.

B | Modelos de turbulencia

En este anexo se resumen algunos de los modelos de turbulencia [19, 26] que se pueden usar en el flujo fluido dando más detalle de las ecuaciones que rigen el modelo de turbulencia usado en este trabajo. En particular, se comienza con una clasificación general de los modelos que existen.

B.1. DNS

El modelo de turbulencia DNS (*Direct Numerical Simulation*) discretiza el dominio espacial y temporal en pequeñas celdas y resuelve numéricamente las ecuaciones que describen el comportamiento del fluido en cada una de ellas, proporcionando una solución precisa y detallada. Sin embargo, requiere un gran coste computacional, incluso en flujos simples, aumentando rápidamente el coste computacional con el tamaño del dominio y el número de Reynolds. Es por ello que se utiliza principalmente en estudios académicos y de investigación para analizar detalladamente la turbulencia en sistemas específicos en dominios pequeños.

B.2. LES

El modelo de turbulencia LES (*Large Eddy Simulation*) resuelve de manera explícita la parte más grande de las escalas de la turbulencia, mientras que la parte más pequeña se modela de manera implícita. Requiere un alto coste computacional, por lo que su uso se ha limitado a casos específicos en los que se necesita una alta precisión en la simulación de la turbulencia. La idea principal es que los vórtices grandes son más sensibles a las condiciones de contorno, ya que contienen más información y por ello deben ser resueltos directamente. Por otro lado, la turbulencia de pequeña escala es menos crítica, ya que su intensidad es menor y su información es limitada, por lo que se puede modelar. Asimismo, esta turbulencia es más uniforme y con características universales, lo que la hace ideal para la simulación de flujos turbulentos en estado de transición.

B.3. RANS

El modelo de turbulencia RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) [11, 22, 23] resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en el tiempo, para evitar resolver las fluc-

tuaciones, y, por lo tanto, en el cálculo se obtienen los valores medios de las variables de flujo. Es el modelo que se utiliza en las simulaciones de este trabajo, ya que el coste computacional requerido es bastante inferior a los modelos anteriores.

El modelo RANS se basa en que las variables turbulentas pueden ser descompuestas en una componente media y una componente fluctuante. Se asume que la componente media del flujo es dominante y que las fluctuaciones turbulentas tienen una magnitud mucho menor, y por tanto, despreciables. De esta forma, se promedian las ecuaciones de Navier-Stokes en el tiempo, obteniendo una ecuación media para la velocidad y una ecuación media para la presión.

Modelo $k - \epsilon$

Para modelar la componente fluctuante del flujo, se utiliza una ecuación de transporte para la energía cinética turbulenta (k) y otra ecuación de transporte para la disipación turbulenta (ϵ). Estas dos ecuaciones son combinadas para obtener una expresión para la viscosidad turbulenta, que es la variable que representa la influencia de la turbulencia en el flujo medio.

$$\frac{D}{Dt}(\rho k) = \nabla \cdot (\rho D_k \nabla k) + P - \rho \epsilon \quad (\text{B.1})$$

Variable	Descripción
ρ	Densidad del fluido
k	Energía cinética turbulenta
D_k	Difusividad efectiva para k
P	Tasa de producción de energía cinética turbulenta debido a la deformación del flujo
ϵ	Tasa de disipación de energía cinética turbulenta debido a la viscosidad molecular

$$\frac{D}{Dt}(\rho \epsilon) = \nabla \cdot (\rho D_\epsilon \nabla \epsilon) + \frac{C_1 \epsilon}{k} (P + C_3 \frac{2}{3} k \nabla \cdot \mathbf{u}) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (\text{B.2})$$

Variable	Descripción
ρ	Densidad del fluido
ϵ	Tasa de disipación de energía cinética turbulenta
k	Energía cinética turbulenta
\mathbf{u}	velocidad del flujo
D_ϵ	Difusividad efectiva para ϵ
P	Tasa de producción de energía cinética turbulenta debido a la deformación del flujo
C_1	Coeficiente
C_2	Coeficiente
C_3	Coeficiente

Una vez que se tienen estas ecuaciones para k y ϵ , se necesita también utilizar una ecuación de cierre, pues el sistema está indeterminado con más incógnitas que ecuaciones. Proporcionando una relación matemática entre la viscosidad turbulenta y las variables del flujo se consigue la ecuación que falta para poder resolver el sistema. Existen varios modelos que representan la relación entre la viscosidad turbulenta y las variables del flujo:

Para el modelo k- ϵ : Como se ha dicho, este modelo utiliza dos ecuaciones de transporte (una para la energía cinética turbulenta k , y otra para la tasa de disipación de energía cinética turbulenta, ϵ), y necesita relacionar la velocidad de disipación de la energía turbulenta con la escala de longitud turbulenta o tamaño de los vórtices, como modelo de cierre [19, 26]. Se presentan dichas ecuaciones a continuación:

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (\text{B.3})$$

Variable	Descripción
ν_t	Viscosidad turbulenta
C_μ	Coficiente para la viscosidad turbulenta
k	Energía cinética turbulenta
ϵ	Tasa de disipación de energía cinética turbulenta

Modelo k- w : En este modelo se considera la misma energía cinética turbulenta que en el caso anterior, pero ahora la tasa de disipación de turbulencia ϵ se reemplaza por la tasa específica de disipación de turbulencia, w .

$$\frac{D}{Dt}(\rho k) + \frac{D}{D_{xi}}(\rho k u_i) = P - \rho \beta k w + \frac{D}{D_{xi}} \left[(\mu + \mu_t \sigma_k^*) \frac{D_k}{D_{xi}} \right] \quad (\text{B.4})$$

Variable	Descripción
ρ	Densidad del fluido
k	Energía cinética turbulenta
w	Tasa específica de disipación turbulenta
u_i	Componentes de la velocidad del flujo en la dirección i
P	Tasa de producción de energía cinética turbulenta debido a la deformación del flujo
ϵ	Tasa de disipación de energía cinética turbulenta debido a la viscosidad molecular
μ	Viscosidad molecular
μ_t	Viscosidad turbulenta
σ_k	Coficiente de difusión turbulenta para la energía cinética
β	Coficiente

Modelo $k - w$ SST : El modelo de $k - w$ SST (Shear Stress Transport) es una combinación de los dos modelos de turbulencia descritos previamente: el modelo $k-w$ y el modelo $k-\epsilon$. Utiliza dos ecuaciones para la energía cinética de la turbulencia, k , y la tasa de disipación específica de la turbulencia w . Su objetivo es superar las deficiencias del modelo $k - w$ estándar en cuanto a la dependencia de los valores de k y w en el flujo libre. Además, es capaz de captar la separación de flujos.

C | Propuestas de diseño de las diferentes modificaciones sobre el modelo CAD del vehículo original

En el marco de este trabajo, se han llevado a cabo una serie de modificaciones del diseño CAD del modelo original de vehículo mostrado en la sección 2.2 con el objetivo de simular y posteriormente analizar sus rendimientos y eficiencias aerodinámicas. Este anexo recoge de manera detallada las nueve modificaciones CAD realizadas y recogidas de forma resumida en la tabla 2.1, describiendo los cambios realizados en cada una de ellas, y permitiendo tener una visión general del proceso de mejora en el diseño del vehículo.

C.1. Modificación 1

La modificación 1 (ver figura C.1) es la que más cambios tiene respecto al modelo original (figura 2.1a), y supone la primera iteración del proceso evolutivo de mejora. La parte central del alerón se elimina, conectándolo con la nariz manteniendo el primer flap del perfil alar en diagonal, estableciendo el punto de remanso según lo especificado en la subsección 2.3.1. La superficie superior se aplana, eliminando las superficies que conectan la nariz con el asiento, mientras que la superficie inferior tiene forma convexa, con el fin de generar *downforce* en esta zona. El resto del vehículo permanece igual que en el diseño del modelo original.

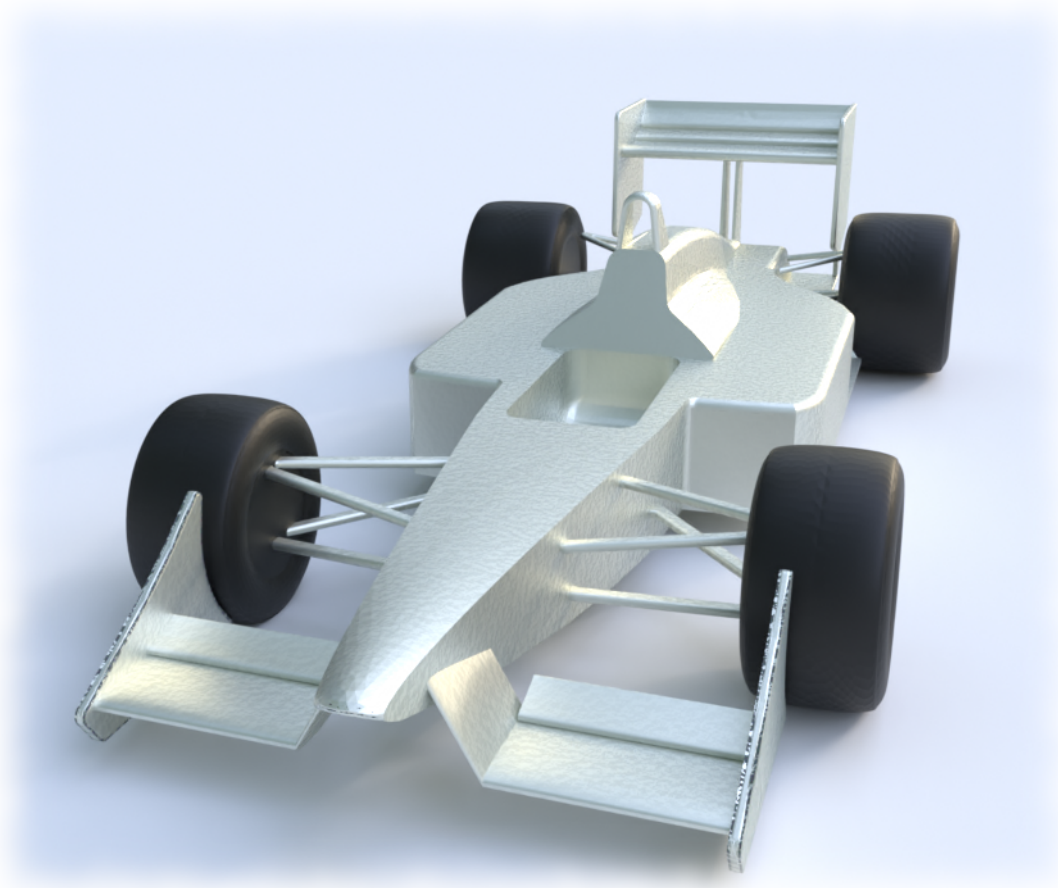


Figura C.1: Modelo CAD de la modificación 1 propuesta sobre el modelo original de vehículo.

La tabla C.1 muestra los resultados numéricos de la modificación 1.

Coeficiente	Valor	Fuerza	Valor
C_d	0,881	F_d	3453,5 N
C_l	-2,265	F_l	-11542,5 N

Tabla C.1: Valores de coeficientes y fuerzas aerodinámicas obtenidas en la simulación tras la modificación 1.

C.2. Modificación 2

La modificación 2 de la figura C.2 propone una mejora sobre la modificación 1 (figura C.1), donde la parte inicial se ensancha, obteniendo una nariz más gruesa, con el fin de

probar si una nariz más ancha genera más *downforce* en esta zona. Además, la conexión de la nariz con el alerón delantero se sitúa en un punto más bajo, y mantiene la geometría del perfil alar del primer flap del alerón, al igual que en la modificación 1.

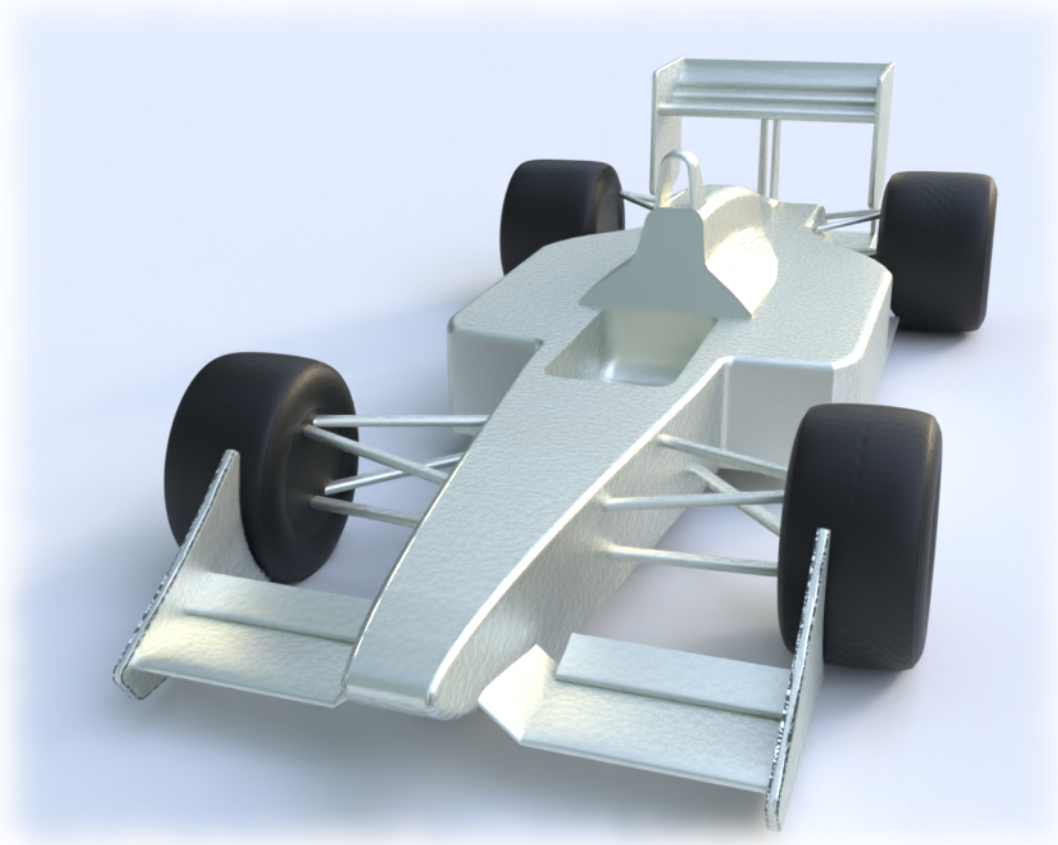


Figura C.2: Modelo CAD de la modificación 2 propuesta sobre el modelo original de vehículo.

La tabla C.2 muestra los resultados obtenidos en esta simulación.

Coeficiente	Valor	Fuerza	Valor
C_d	0,879	F_d	3445,7 N
C_l	-2,275	F_l	-11593,4 N

Tabla C.2: Valores de coeficientes y fuerzas aerodinámicas obtenidas en la simulación tras la modificación 2.

C.3. Modificación 3

La modificación 3 supone un diseño ligeramente distinto a los anteriores. La nariz se diseña similar a una geometría de perfil alar [1] capaz de generar una gran cantidad de *downforce* en un Reynolds alto (ver ecuación A.1). Este nuevo diseño permite estudiar si una nariz con forma de perfil alar es una buena solución para generar fuerza de sustentación en un vehículo de competición. Al igual que en las modificaciones anteriores, la parte central del alerón se elimina, y las conexiones con la nariz ahora están en una altura media entre la modificación 1 y la modificación 2. El resto del vehículo permanece igual que en las modificaciones anteriores.

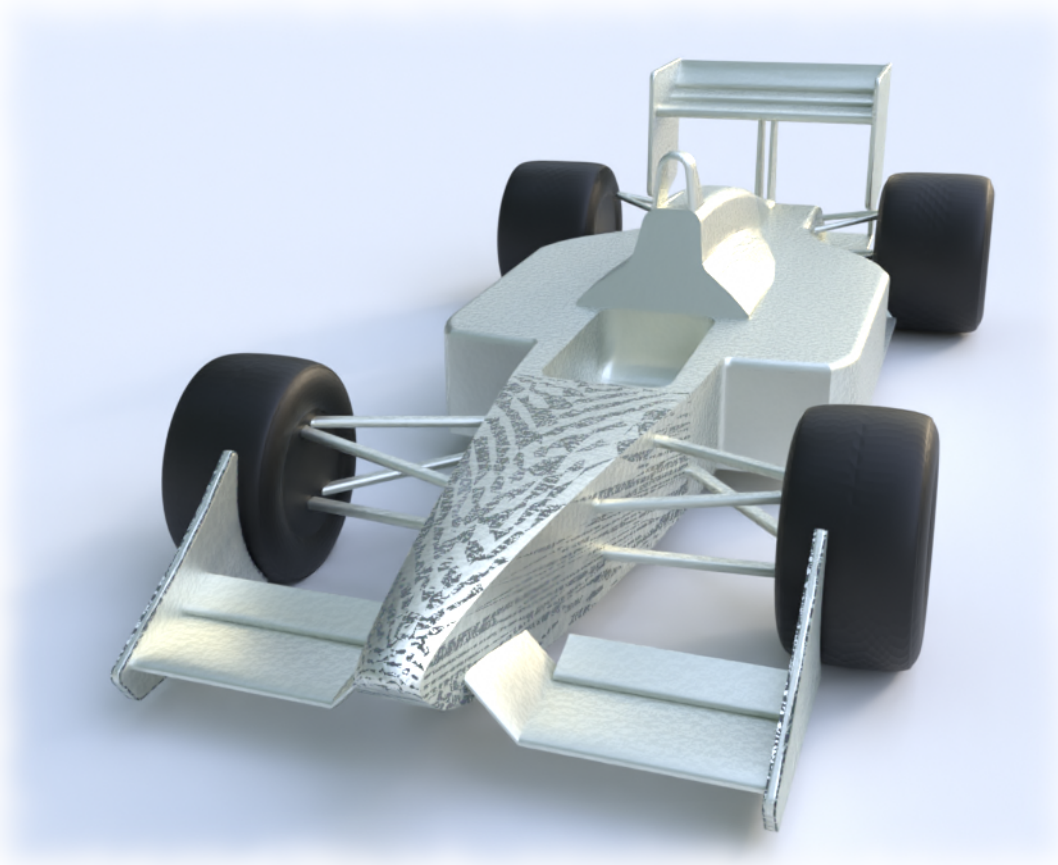


Figura C.3: Modelo CAD de la modificación 3 propuesta sobre el modelo original de vehículo.

La tabla C.3 muestra los resultados de esta modificación.

Coeficiente	Valor	Fuerza	Valor
C_d	0,892	F_d	3496,6 N
C_l	-2,261	F_l	-11522,1 N

Tabla C.3: Valores de coeficientes y fuerzas aerodinámicas obtenidas en la simulación tras la modificación 3.

C.4. Modificación 4

El diseño de la modificación 4 es una mezcla de las tres modificaciones anteriores, implementando lo mejor de cada una de ellas para ver cómo funcionan combinadas. La nariz se ensancha, al igual que en la modificación 2 (figura C.2), y cuenta con la geometría del perfil alar de la modificación 3. Además, las conexiones de la modificación 1 (figura C.2) son las que se implementan en la modificación 4. Es la primera modificación que se incluye en la memoria principal, ya que resume los dos primeros conceptos de diseño.

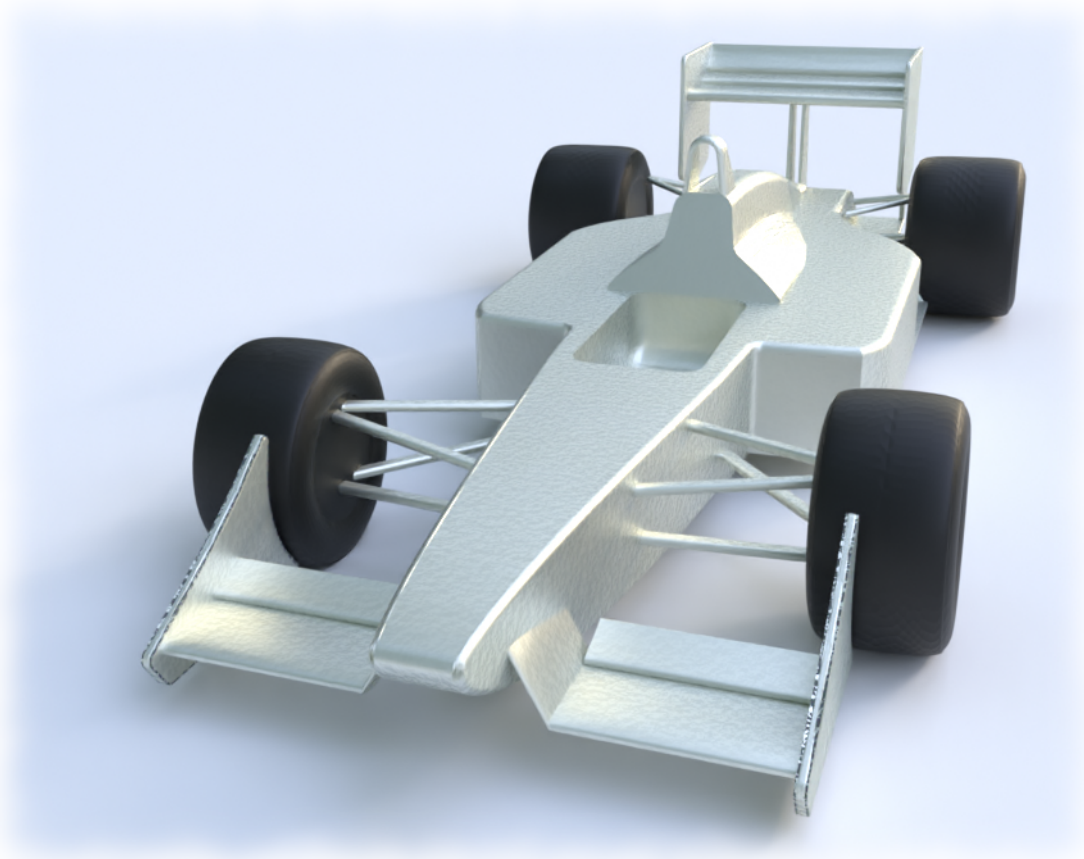


Figura C.4: Modelo CAD de la modificación 4 propuesta sobre el modelo original de vehículo.

Los resultados de esta modificación se muestran en la tabla 4.2 de la sección 4.2 de la memoria principal.

C.5. Modificación 5

La modificación 5 tiene un diseño totalmente distinto a las modificaciones anteriores. En ella, se implementa la extensión del fondo plano, el bifurcador de flujo y la nariz cóncava. El objetivo de la extensión del fondo plano es generar un gradiente de presiones entre sus superficies superior e inferior, para que el vehículo genere más *downforce*. Asimismo, el bifurcador se implementa con el fin de dividir el flujo en dos direcciones y evitar que esta zona genere una gran resistencia aerodinámica. Por último, la nariz cóncava se introduce con el fin de incrementar el flujo por debajo de la nariz, para así aumentar la fuerza de sustentación generada por la extensión del fondo plano. Además, se elimina solamente un flap en la zona central del alerón.

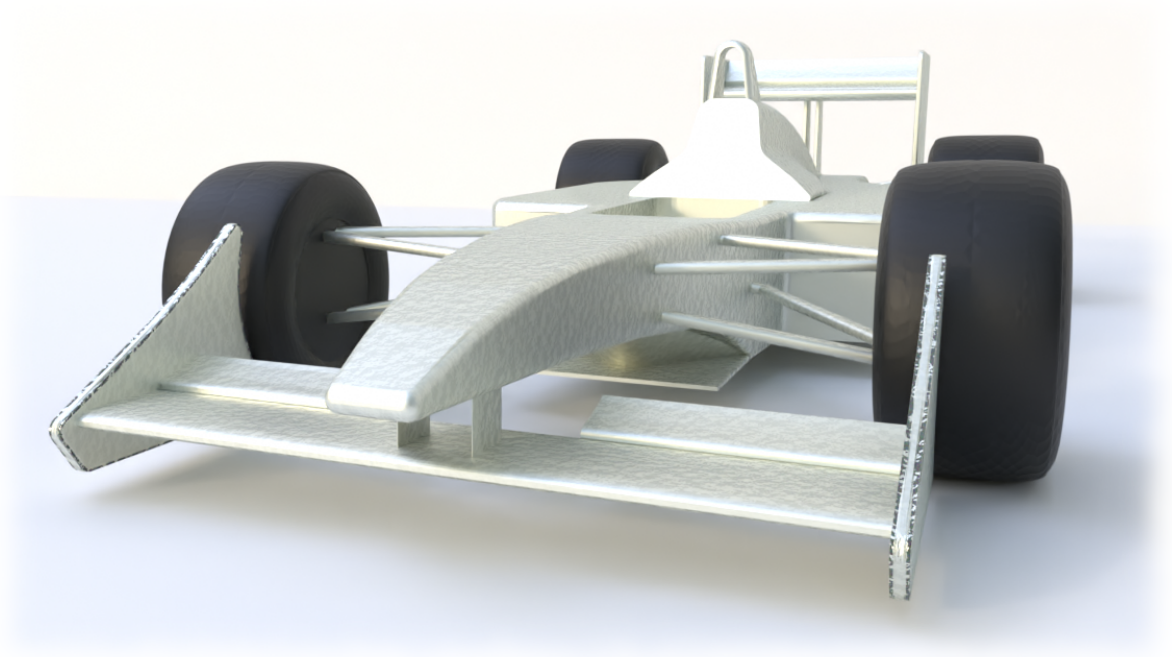


Figura C.5: Modelo CAD de la modificación 5 propuesta sobre el modelo original de vehículo.

La tabla C.4 muestra los resultados de la modificación 5.

Coefficiente	Valor	Fuerza	Valor
C_d	0,884	F_d	3465,3 N
C_l	-2,355	F_l	-12001,1 N

Tabla C.4: Valores de coeficientes y fuerzas aerodinámicas obtenidas en la simulación tras la modificación 5.

C.6. Modificación 6

La modificación 6 supone una mejora de la modificación 5, donde la nariz se alza ligeramente. La extensión del fondo plano ahora no excede la nariz en vista en planta (es decir, tiene la misma orientación angular), además de ser redondeada en su extremo. El bifurcador se estrecha para reducir el choque frontal del flujo con esta superficie, y el alerón delantero mantiene la misma geometría que en la modificación anterior. Es la segunda modificación que se incluye en la memoria principal, y los resultados se muestran en la tabla 4.3 de la sección 4.3 de la memoria principal.

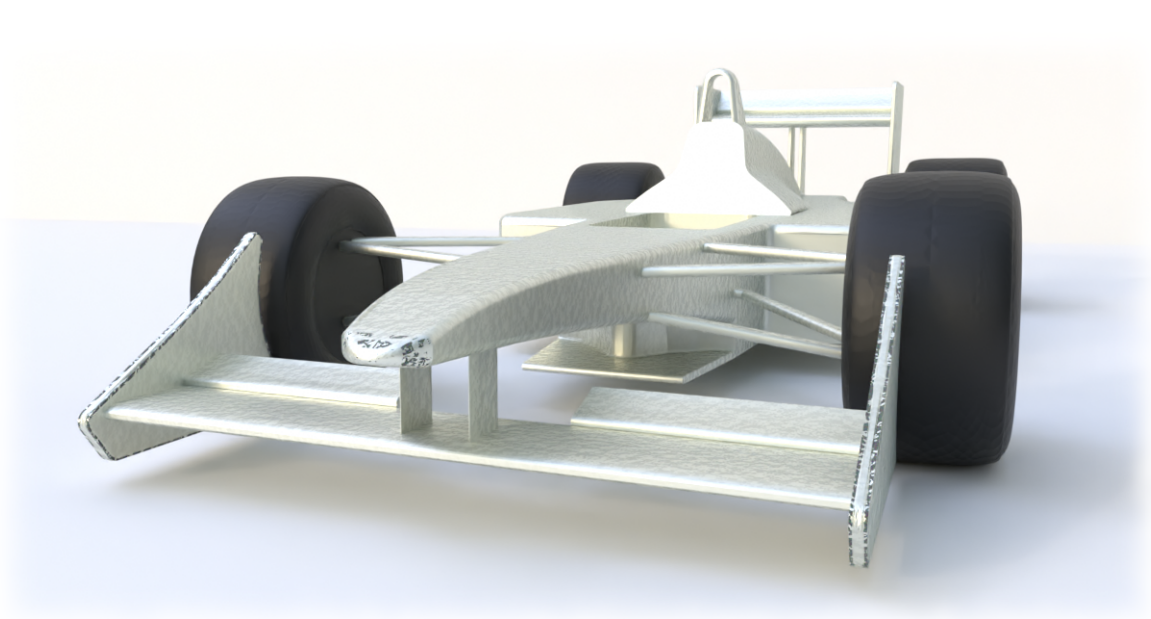


Figura C.6: Modelo CAD de la modificación 6 propuesta sobre el modelo original de vehículo.

C.7. Modificación 7

La modificación 7 únicamente tiene como objetivo rediseñar el bifurcador y la extensión del fondo plano, manteniendo intacto el resto del vehículo. Se sigue con la tendencia de estrechar el bifurcador, y el redondeo del extremo de la extensión del fondo plano ahora tiene forma de perfil alar, cuya principal característica es disminuir la resistencia aerodinámica que genera.

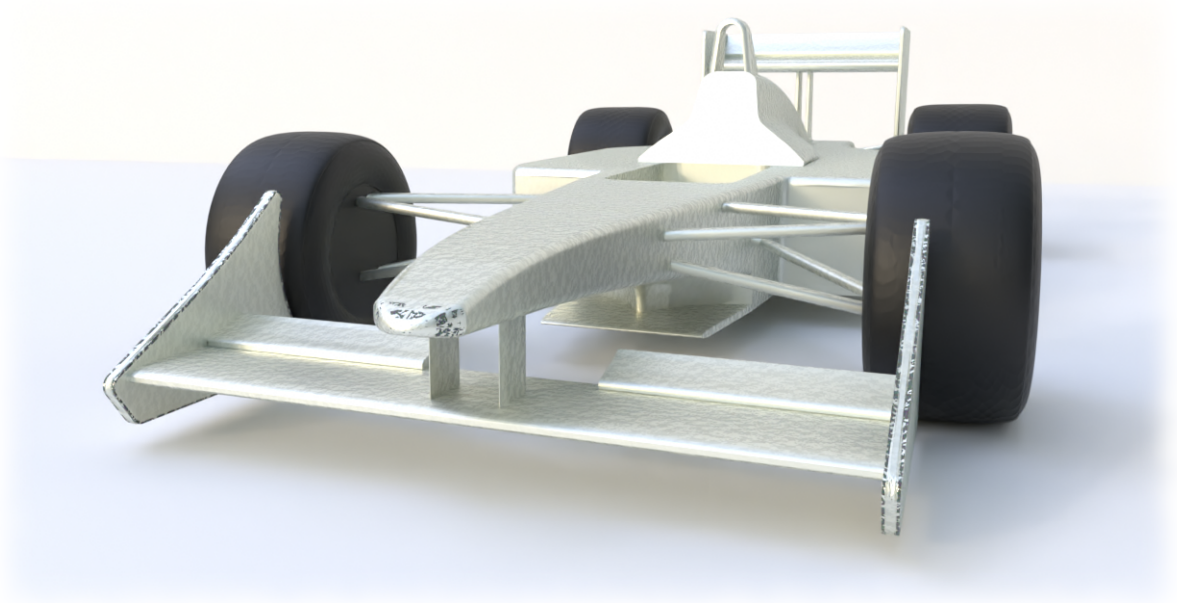


Figura C.7: Modelo CAD de la modificación 7 propuesta sobre el modelo original de vehículo.

La tabla C.5 muestra los resultados de la modificación 7.

Coefficiente	Valor	Fuerza	Valor
C_d	0,861	F_d	3375,1 N
C_l	-2,392	F_l	-12189,6 N

Tabla C.5: Valores de coeficientes y fuerzas aerodinámicas obtenidas en la simulación tras la modificación 7.

C.8. Modificación 8

La modificación 8 es la tercera y última modificación incluida en la memoria principal, y es la modificación que mejores resultados arroja de todas. Supone un modelo prácticamente idéntico a la modificación 7, con la única diferencia de incluir todo el alerón delantero (sin eliminar flaps). Esto permite evaluar si en el concepto de nariz alta, explicado en la subsección 2.3.1 de la memoria principal, importa el número de flaps a la hora de diseñar el vehículo. Los resultados de esta modificación se encuentran en la tabla 4.4 de la sección 4.4 de la memoria principal.

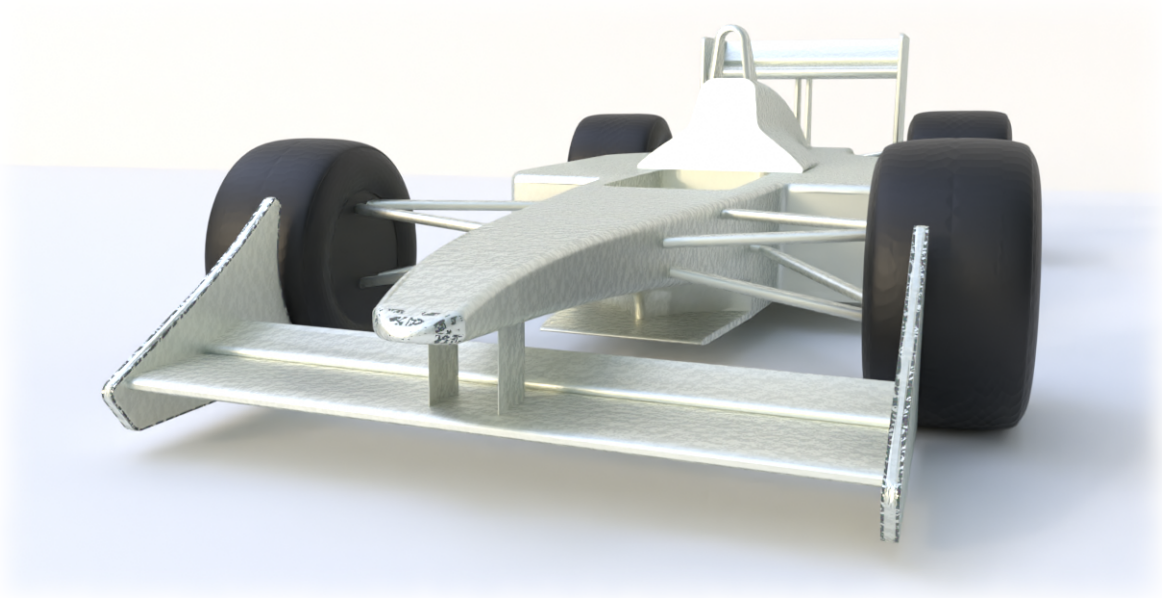


Figura C.8: Modelo CAD de la modificación 8 propuesta sobre el modelo original de vehículo.

C.9. Modificación 9

La modificación 9 es la última propuesta analizada. Continúa el diseño de la modificación 8, incluyendo todo el alerón, con la única diferencia de proponer un mayor estrechamiento del bifurcador. Al ser los resultados de esta modificación (ver tabla C.6) peores que los de la modificación 8 (ver tabla 4.4), se concluye que la modificación 8 es el diseño más óptimo de entre todos.

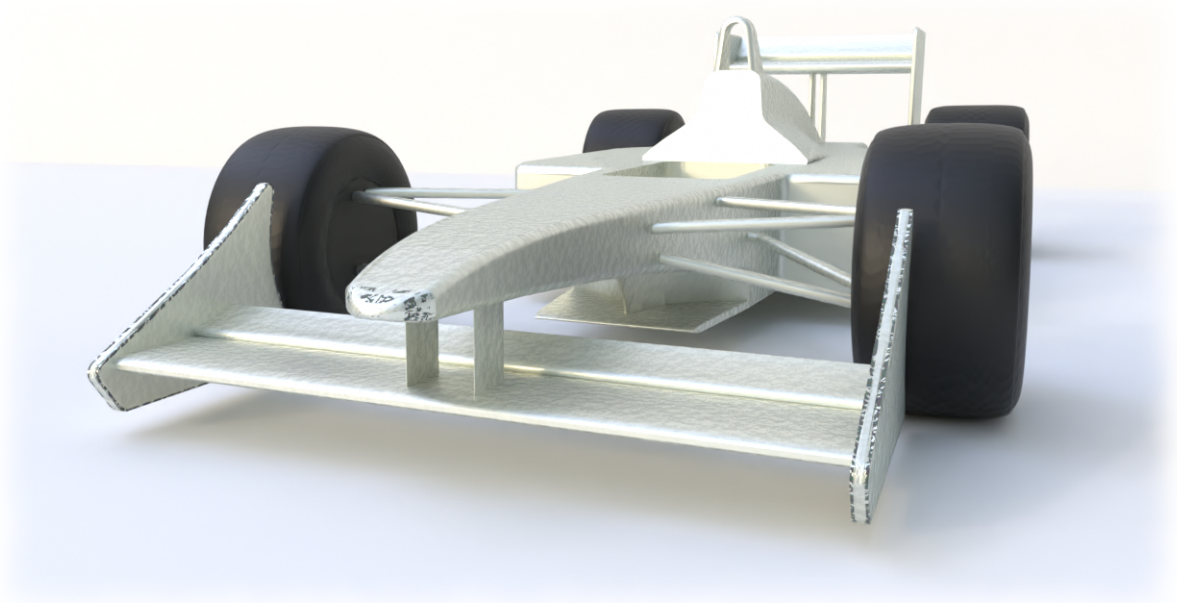


Figura C.9: Modelo CAD de la modificación 9 propuesta sobre el modelo original de vehículo.

Coeficiente	Valor	Fuerza	Valor
C_d	0,865	F_d	3390,8 N
C_l	-2,425	F_l	-12357,8 N

Tabla C.6: Valores de coeficientes y fuerzas aerodinámicas obtenidas en la simulación tras la modificación 9.

D | Librerías de OpenFoam

En este anexo se recogen las características principales de las librerías que se han usado en el paquete de simulación OpenFOAM para generar la malla de cálculo y configurar la simulación numérica.

D.1. fvSchemes

La librería fvSchemes [2] es una parte importante de la implementación de los solvers en OpenFOAM. En particular, se utiliza para especificar los esquemas de discretización numérica que se utilizarán para resolver los sistemas de ecuaciones diferenciales parciales que describen el comportamiento del flujo. Entre estos esquemas se encuentran los correspondientes a gradientes, divergencias, laplacianos, fuentes, o ajustes de estabilidad.

En este trabajo, el solver "*SimpleFoam*" descrito en la sección 3.1.2, utiliza esquemas como:

- Gaussiano, el cual pondera los valores de la variable en los puntos de malla cercanos. Esto significa que los puntos de malla más cercanos tienen más peso en el cálculo de la derivada que los puntos más lejanos.
- Linear, que utiliza una aproximación lineal para interpolar los valores de la variable en los puntos de malla cercanos. Esto significa que se utiliza una recta para conectar los valores en dos puntos de malla cercanos.
- Upwind, que utiliza la dirección del flujo en la malla para determinar si se utiliza un valor de la variable en la dirección *upwind* o *downwind* para aproximar la derivada en un punto de interés. Si la dirección del flujo es hacia el punto de interés, se utiliza el valor de la variable en la dirección *upwind* y viceversa.

D.2. BlockMesh

BlockMesh es una herramienta de generación de mallas estructuradas en forma de bloques. Una malla estructurada significa que los elementos de la malla se organizan en una estructura regular y uniforme, con un tiempo de resolución inferior a las no estructuradas. En nuestro caso, se utiliza para generar el dominio de la simulación, espacio que ocupará el flujo de aire alrededor del vehículo.

La malla se genera a partir de un archivo de diccionario llamado *blockMeshDict* [2]. Su

principio consiste en descomponer la geometría del dominio en un conjunto de uno o más bloques hexaédricos tridimensionales. Los bordes de los bloques pueden ser líneas rectas, arcos u otras geometrías curvas. La malla se especifica como un número de celdas en cada dirección del bloque, información suficiente para que *blockMeshDict* genere los datos de la malla.

Cada bloque de la geometría está definido por 8 vértices, uno en cada esquina de un hexaedro. Los vértices se escriben en una lista para que se pueda acceder a cada vértice usando su etiqueta, recordando que OpenFOAM siempre usa la convención de C++ de que el primer elemento de la lista tiene la etiqueta '0'. En cada vértice, se deben introducir las coordenadas x, y, z correspondientes, en la escala definida por el usuario, y considerando los siguientes aspectos:

- El primer vértice define el origen, siendo el punto con menores coordenadas posibles
- x_1 describe la dirección de movimiento del vértice 0 al vértice 1 y x_2 la dirección del vértice 1 al vértice 2
- Los vértices 0, 1, 2, 3 definen el plano $x_3 = 0$
- El vértice 4 se encuentra moviéndose desde el vértice 0 en la dirección x_3
- Los vértices 5, 6 y 7 se encuentran de manera similar moviéndose en la dirección x_3

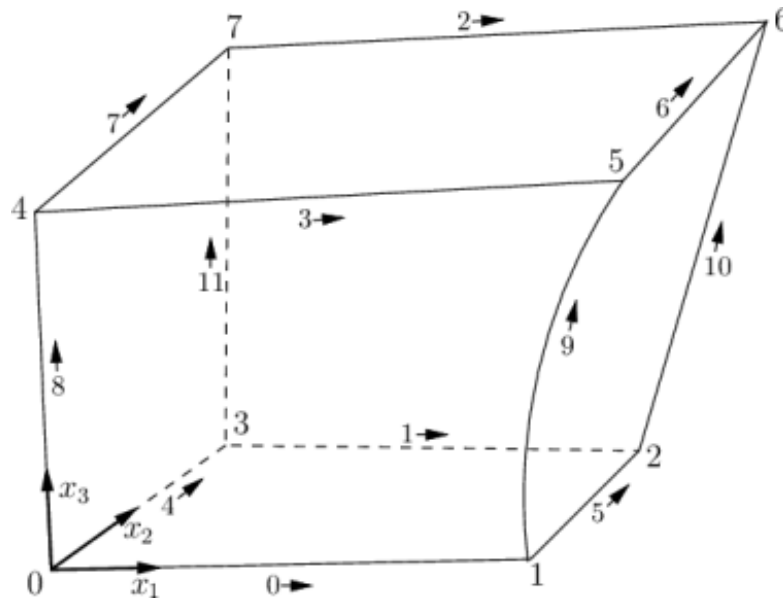


Figura D.1: Geometría de un solo bloque para generar la malla de cálculo.

Por defecto, se deben introducir obligatoriamente 8 vértices. Sin embargo, es posible colapsar uno o más pares de vértices entre sí para crear un bloque con menos de 8 vértices.

Cada borde que une 2 vértices se supone recto por defecto. Sin embargo, se puede especificar que sea curvo mediante la entrada "*edges*". Para el trabajo, al ser un dominio

semicilíndrico, algunos bordes se definen como arcos para conseguir esta forma, especificando qué vértices unen este borde y un punto de interpolación intermedio.

Posteriormente, se define el número de celdas uniformes en las que se desea dividir el dominio en cada dirección, además de especificar el ratio de expansión entre celdas, es decir, la proporción de anchos entre varias celdas consecutivas. En el trabajo, al ser un dominio uniforme, este último aspecto se omite.

Sucesivamente, en el apartado "*boundary*" se divide el dominio en parches o regiones, donde cada uno es llamado según la elección del usuario. Dentro de cada una de estas regiones, se define el tipo de superficie que es, siendo parche si se quiere aplicar una condición de contorno posteriormente, u otro tipo de superficie como pared, como se ve en la sección 3.3. Además, se debe especificar la cara correspondiente a esa región, introduciendo los vértices que la conforman.

Finalmente, se puede crear una malla uniendo más de un bloque si se especifica, pudiendo emparejar o fusionar las caras entre ellos mediante la función "*mergePatchPairs*", función que se utiliza en el trabajo para favorecer la simplicidad del dominio. El resultado se puede visualizar en la figura 3.1 de la sección 3.2.

D.3. SnappyHexMesh

SnappyHexMesh es una herramienta de malla hexaédrica generada a partir de una malla tetraédrica existente. Se utiliza para generar una malla de alta calidad, especialmente para geometrías complejas con superficies curvas y detalles finos como el flujo alrededor del vehículo a simular. *SnappyHexMesh* utiliza un enfoque de malla de deformación, lo que significa que ajusta la malla tetraédrica original (*BlockMesh*), descrita en el anexo D.2 anterior, para adaptarse a la geometría de la superficie y luego genera una malla hexaédrica a partir de ella. Esto permite una mayor precisión y eficiencia en la simulación numérica.

Para ello, la malla se ajusta a la superficie del modelo refinando iterativamente una malla inicial y transformando la malla hexagonal dividida resultante en una superficie. Se ejecuta en paralelo, es decir, usando múltiples núcleos de procesador, reduciendo así el coste computacional. El diccionario *SnappyHexMeshDict* [2] permite controlar las diversas etapas de mallado, al igual que la herramienta *blockMesh* con su diccionario correspondiente. El mallado se realiza en tres etapas, después de haber definido previamente la o las geometrías a mallar. Para clarificar la metodología, se incluye un ejemplo sencillo [3], donde ya se ha definido el dominio de la simulación con la herramienta *blockMesh* previamente.

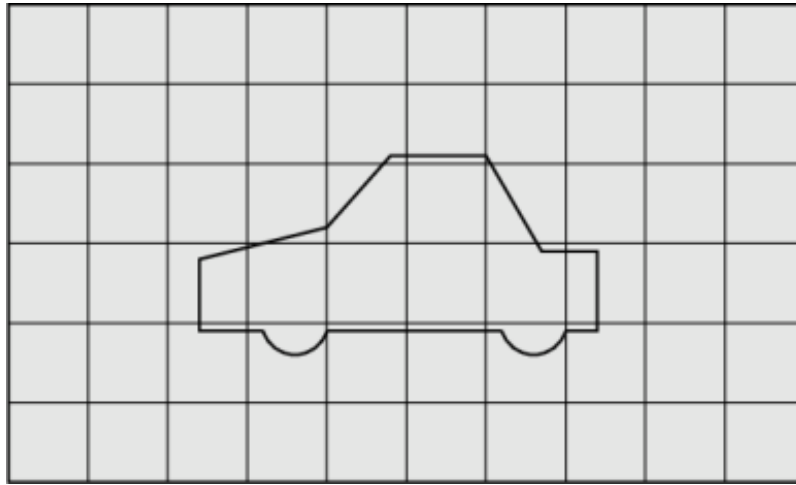


Figura D.2: Geometría de un ejemplo a mallar.

D.3.1. CastellatedMesh

En esta etapa se crea una malla tosca que se ajusta a la geometría de base mediante la generación de una red de celdas hexaédricas con una distribución más o menos uniforme. Para este paso se usa el subdiccionario "*castellatedMeshControls*"[2].

En este subdiccionario se pueden definir diferentes parámetros, como la densidad de la malla en diferentes zonas o el número máximo de celdas. Primeramente, se especifica el nivel de refinamiento deseado de cada una de las "*edge Mesh*" de las geometrías definidas, es decir, su malla de contorno, que puede ser obtenida a través del comando "*surfaceFeatureExtract*", obteniendo un resultado como muestra la siguiente figura:

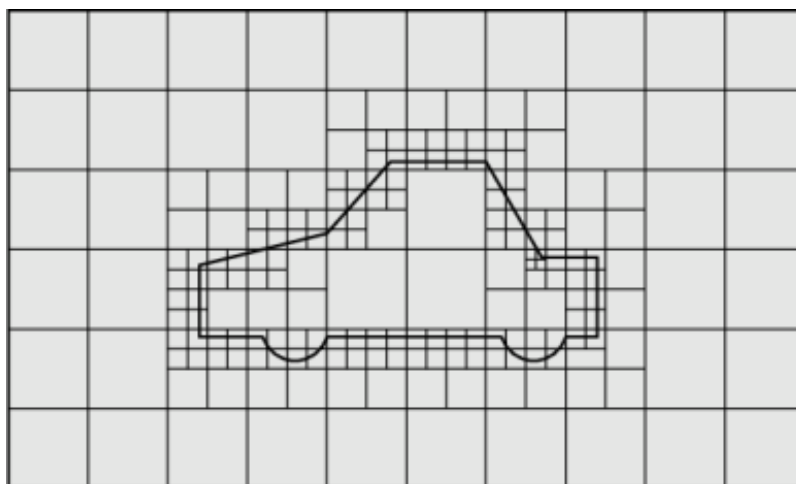


Figura D.3: Primera división de celdas en malla de ejemplo.

Después, se refinan las superficies deseadas, especificando un nivel mínimo y un nivel máximo. El nivel mínimo se aplica en toda la superficie, mientras que el nivel máximo se

aplica a las celdas cuyas intersecciones forman un ángulo superior al especificado por el parámetro "*resolveFeatureAngle*". Además, se pueden agrupar en un mismo grupo varias superficies o geometrías, como es en nuestro trabajo.

Una vez especificadas las superficies a mallar y su nivel de refinamiento correspondiente, mediante el parámetro "*LocationInMesh*", se puede definir si la malla es externa (especificando un punto externo a todas las superficies y dentro del dominio), o bien interna (especificando un punto interior a una o varias superficies). De esta forma, si la malla es externa, como es el caso del trabajo, se obtiene un resultado similar al de la siguiente figura:

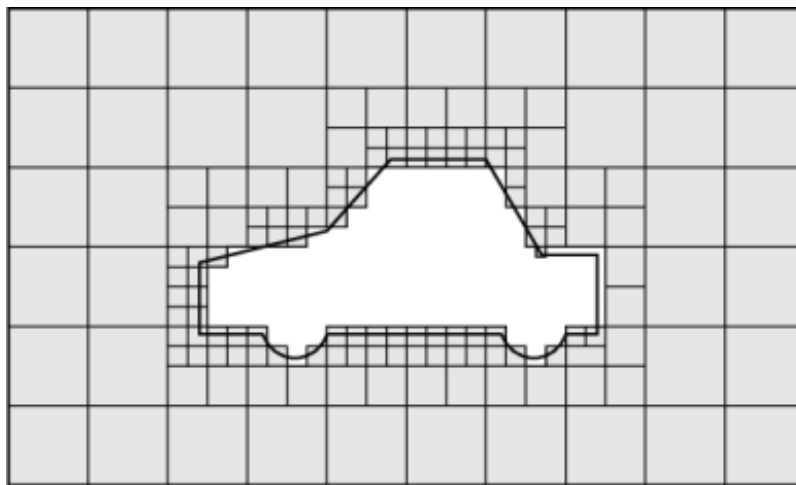


Figura D.4: Refinamiento de superficie en malla ejemplo.

Finalmente, se puede definir también una zona de refinamiento dentro del dominio, especificada por una geometría a elección del usuario. Uniendo esto último con el resultado anterior, el resultado final de esta parte es similar al siguiente:

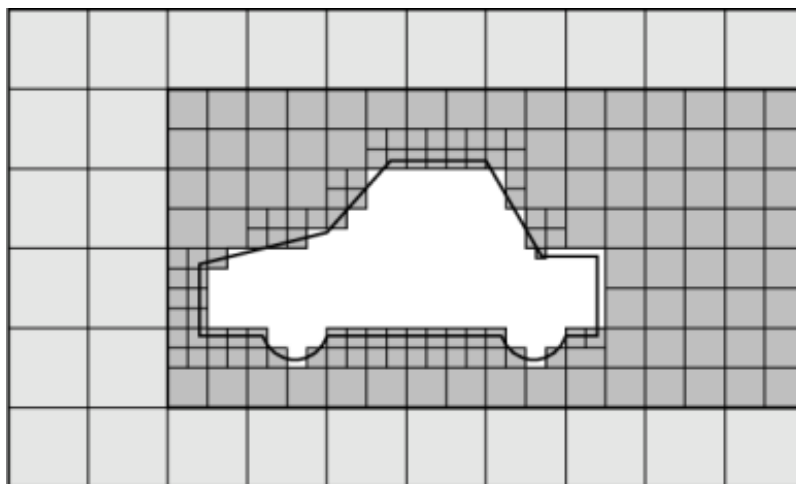


Figura D.5: Malla de ejemplo refinada con zona de refinamiento (zona oscura).

D.3.2. Snapping

El siguiente paso consiste en mover los puntos de los vértices de las celdas a la geometría de la superficie para eliminar la superficie almacenada irregular de la malla.

En primer lugar, se mueven los vértices del contorno almacenado a lo largo de la superficie de la geometría. Luego, se aborda la suavidad de la malla interna con los vértices de límite recién desplazados. A continuación, se identifican los vértices que no cumplen con los parámetros de calidad de la malla, utilizando una tolerancia definida por el usuario en el subdiccionario "*SnapControls*"[2], junto a otros parámetros, y se disminuye el desplazamiento de estos vértices desde su posición original, repitiendo a partir del segundo paso hasta que se cumpla la calidad de la malla deseada. El resultado final se puede ver en la figura D.6.

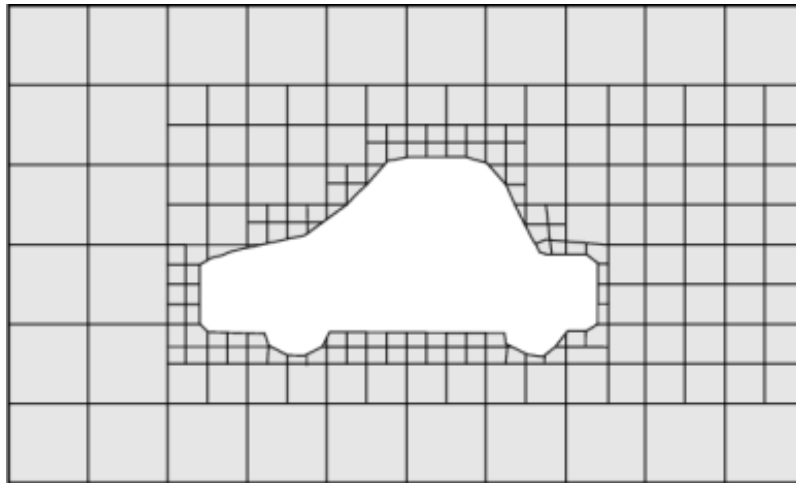


Figura D.6: Malla ejemplo después del proceso de *Snapping*.

D.3.3. Layers

Por último, se pueden definir capas adicionales de elementos de malla cerca de la superficie de una geometría. Estas capas adicionales se agregan para mejorar la calidad de la malla en la región cercana a la superficie. Con el subdiccionario "*addLayers*"[2] se pueden modificar parámetros acerca de la generación de estas capas adicionales como la ubicación y el grosor, así como el tamaño de la malla y la calidad de los elementos. También puede incluir información sobre cómo se generan estas capas adicionales.

Para ello, la malla se proyecta desde la superficie con un grosor determinado en la dirección normal a la superficie. Luego, se aborda el problema de la suavidad de la malla interna utilizando los últimos vértices proyectados del límite. Si los criterios de validación definidos por el usuario no se cumplen, se reduce el grosor proyectado y se vuelve a proyectar. Si no es posible cumplirlos con ningún grosor, no se insertan capas. Sin embargo, si se pueden cumplir, se insertan las capas de celdas y se vuelven a comprobar las condiciones. Si las comprobaciones no se cumplen, las capas se eliminan y se reinicia el proceso. Finalmente, el resultado se muestra en la figura D.7.

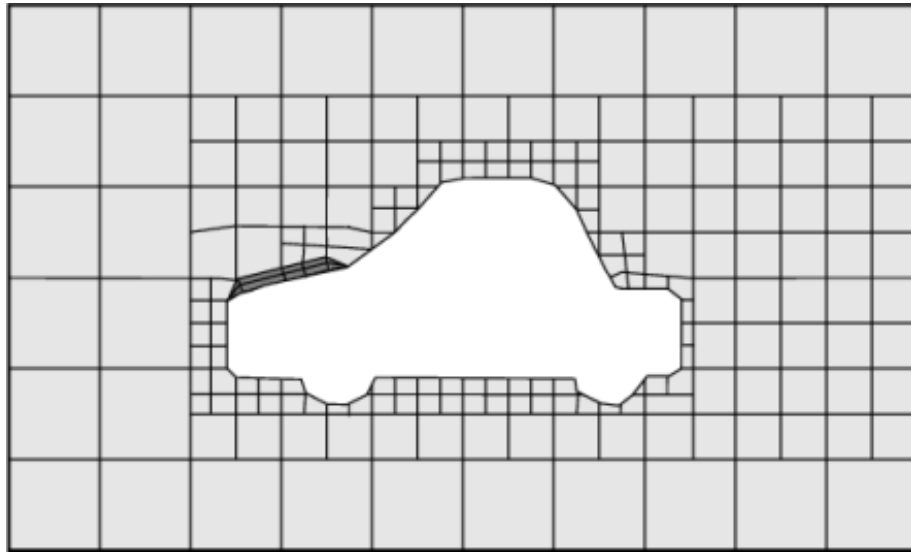


Figura D.7: Malla ejemplo con las capas adicionales.

D.4. ControlDict

La librería "*ControlDict*" [2] es una parte fundamental de OpenFOAM. Esta librería se utiliza para definir y controlar los parámetros de simulación de acuerdo a las necesidades específicas del problema que se desea resolver.

Algunos parámetros modificables son: el solver, que en el caso del trabajo se utiliza "*SimpleFoam*" (ver sección 3.1.2), el número de iteraciones de la simulación y la frecuencia con la que se guardan los resultados. En el capítulo 3.3 se establecen los valores de estos parámetros.

D.5. DecomposeParDict

La librería "*DecomposeParDict*" [2] es otra herramienta importante que se utiliza para realizar simulaciones en paralelo. Esta librería se encarga de dividir la malla de la simulación en múltiples subdominios y distribuirlos a través de varios procesadores, lo que permite realizar simulaciones más grandes y complejas de manera más eficiente y rápida.

En ella, se pueden modificar parámetros clave como el número de subdominios en los que se dividirá la malla, es decir, el número de procesadores que se utilizarán para la simulación, o el método para dividirla. Al igual que con la librería "*ControlDict*", estos datos se especifican en el capítulo 3.3.

D.6. ForceCoeffs

La librería "*ForceCoeffs*" [2] es una herramienta muy útil para calcular los coeficientes relacionados con las fuerzas en una simulación CFD. Estos coeficientes se describen en el anexo A, y proporcionan información valiosa sobre la interacción de un objeto con el fluido. Utiliza métodos numéricos avanzados para calcular con precisión las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre el objeto, y con ello coeficientes de fuerza como el coeficiente de arrastre (ver anexo A.4.2) y el coeficiente de sustentación (ver anexo A.4.4), los cuales son necesarios para hacer el análisis post-simulación del vehículo .